

HYMOSED

Modélisation du fonctionnement HYdro- MOrpho-SEDimentaire de l'estuaire de Seine

J. Ammann, F. Ardhuin, M. Beauverger, C. Delacourt, J. Deloffre, D. Doxaran,
P. Grandjean, F. Grasso, M. Jaud, V. Lafon, N. Le Dantec, P. Le Hir, J. Le Mercier,
E. Maneux, E. Schulz, M. Simon, B. Thouvenin, R. Verney



Laboratoire de Géologie de Lyon
Terre Planètes Environnement



Séminaire Seine-Aval 5, Rouen, 17 mai 2017

Objectif du projet

Apporter une meilleure compréhension du fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine (échelles événementielles, saisonnières, annuelles)



Organisation du projet

MESURES

Contribuer à l'évaluation des transferts sédimentaires intra-estuariens

Rôle des vasières intertidales sur le stockage des sédiments fins

Evaluer différentes approches altimétriques pour accéder aux évolutions morphologiques

Dynamique du bouchon vaseux par imagerie satellite

Utilisation des images couleur de l'eau pour quantifier les concentrations en MES de surface

MODÉLISATION

Etudier et quantifier la dynamique hydro-morpho-sédimentaire de l'estuaire aval

Dynamiques du bouchon vaseux

Influence des forçages (débit, marée, vagues)

Flux et bilans sédimentaires

Tempêtes, saisons, années (sèche, humide, tempétueuse)

Morphodynamique et substrat sédim.

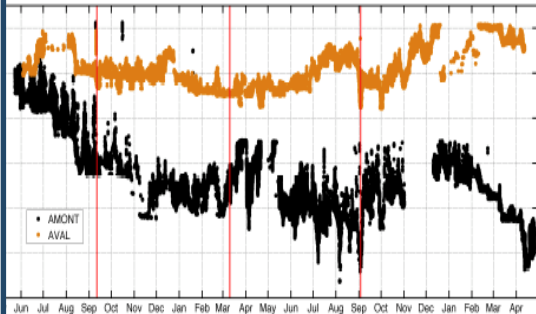
Evolutions de l'embouchure, des vasières intertidales

Suivi altimétrique des vasières intertidales



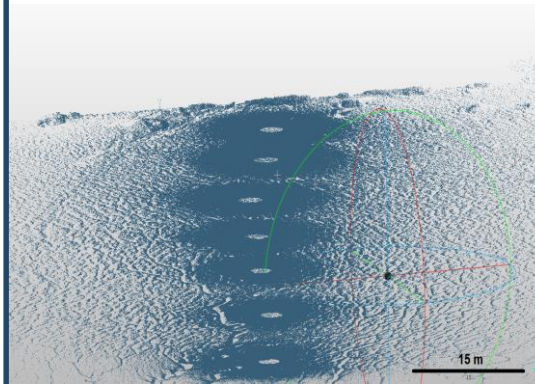
Différentes méthodes de suivi altimétrique

Echosondeur (Altus)



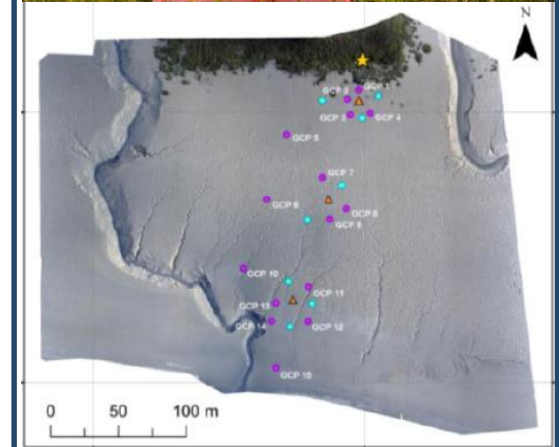
Résolution : $\sim 0,1$ mm
Surface : ~ 1 cm²
Mesures continues

Terrestrial Laser Scanner (TLS)



Résolution : ~ 1 mm
Surface : ~ 2000 m²
Mesures ponctuelles

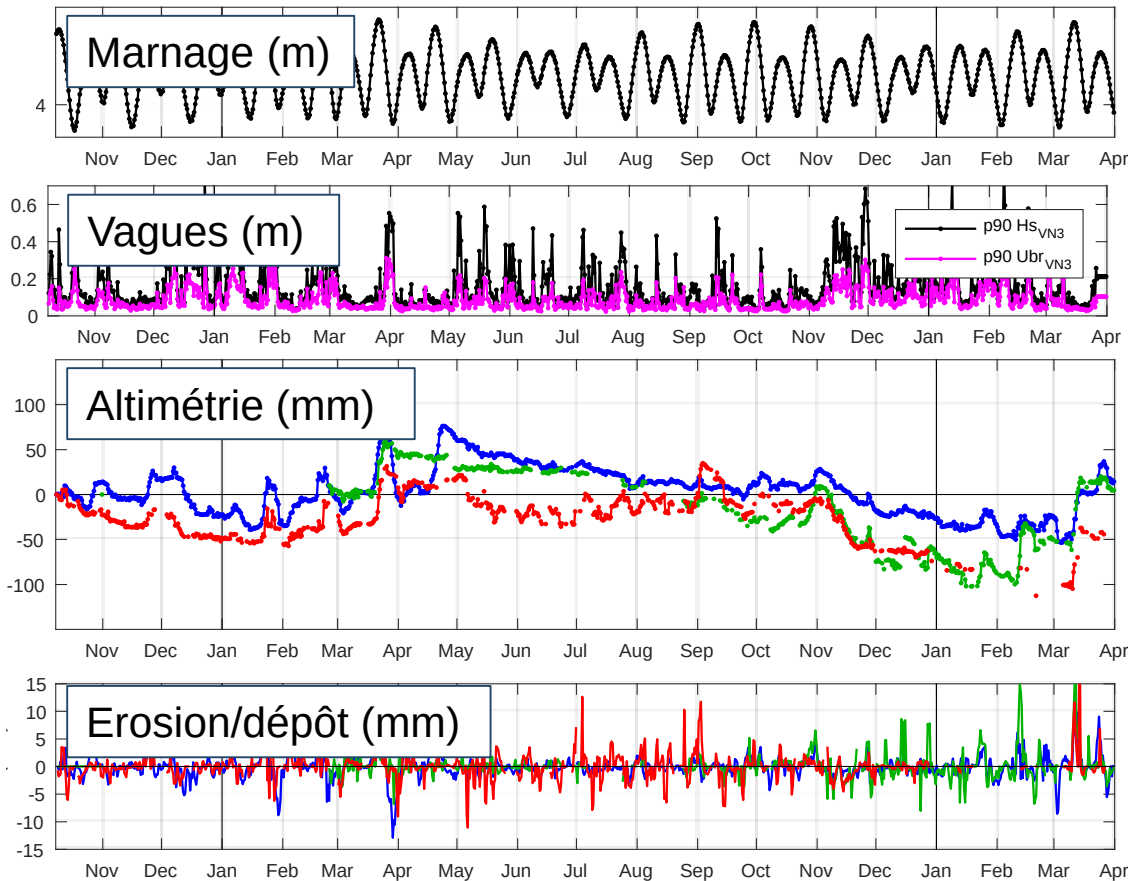
Imagerie drone (stéréoscopie)



Résolution : 2 cm
Surface : 50 000 m²
Mesures ponctuelles

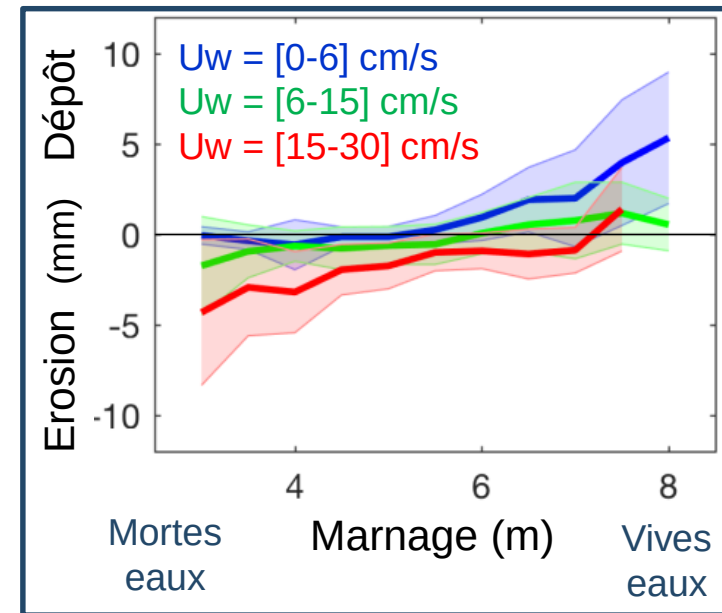
Compromis : fréquence / résolution / spatialisation

Mesures haute-fréquence Altus en Vasière Nord



Années 2014-2016

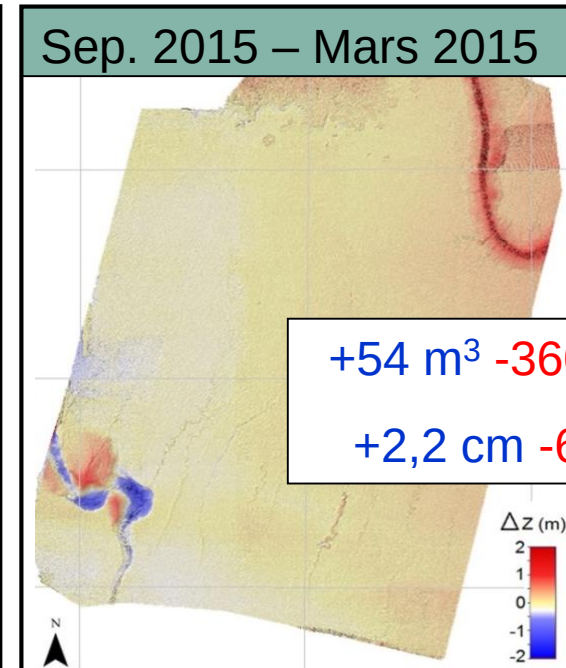
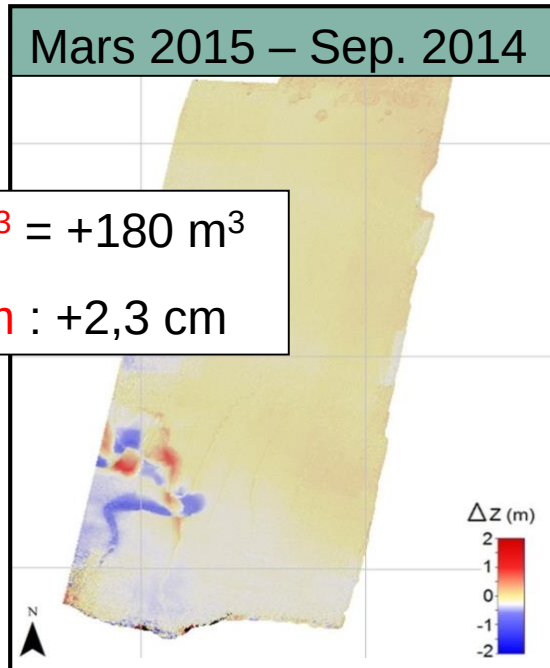
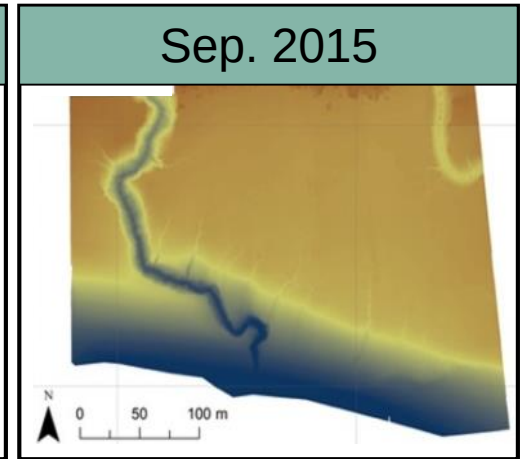
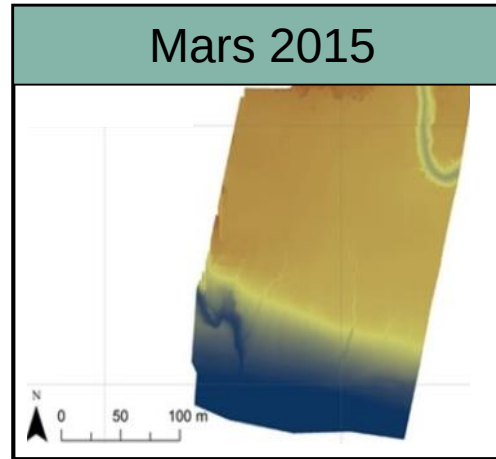
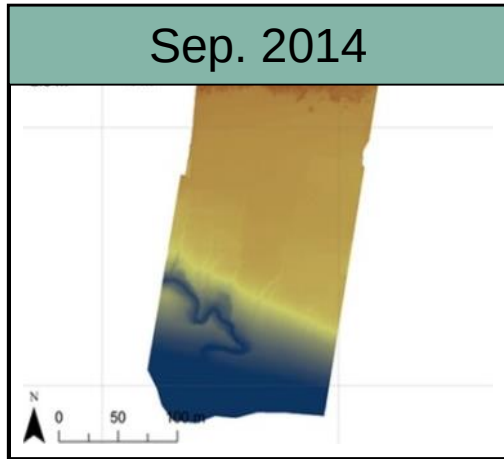
U_w = vitesse orbitale des vagues



Augmentation des dépôts en vives eaux
Réduction des dépôts (ou érosion) en période de vagues (U_w)

Compromis : fréquence / résolution / spatialisation

Morphodynamique de la Vasière Nord (drone)



Suivi altimétrique des vasières intertidales

Pertinence des approches TLS et drone pour le suivi altimétriques des vasières intertidales (environnement vaseux, saturé, plat)

Complémentarité des approches Altus, TLS et drone (fréquence, résolution, spatialisation, mise en œuvre)

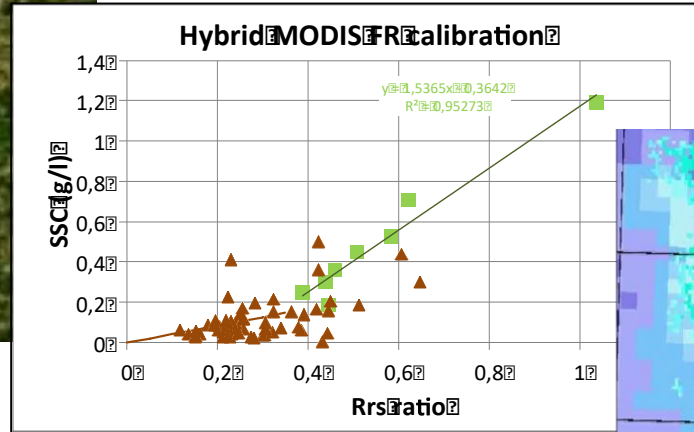
→ Quantification des évolutions morphologiques des structures sédimentaires des différentes vasières (transferts sédimentaires) en relation avec les forçages hydrométéorologiques (position du bouchon vaseux)

Satellite : couleur de l'eau → MES surface

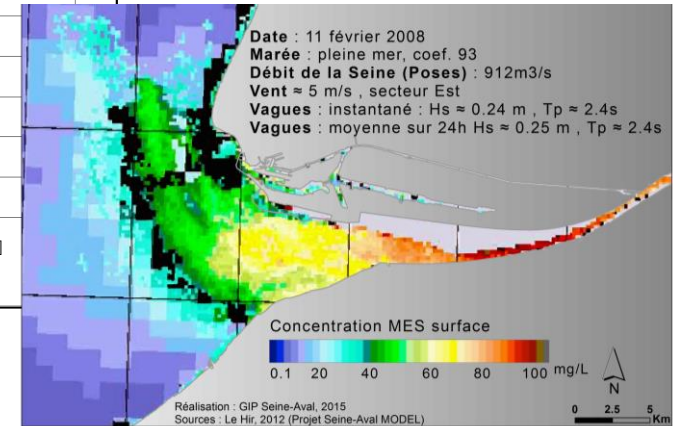
Archive MODIS AQUA FR 2002-2014 (250m) – 2 bandes spectrales



Images couleur de l'eau

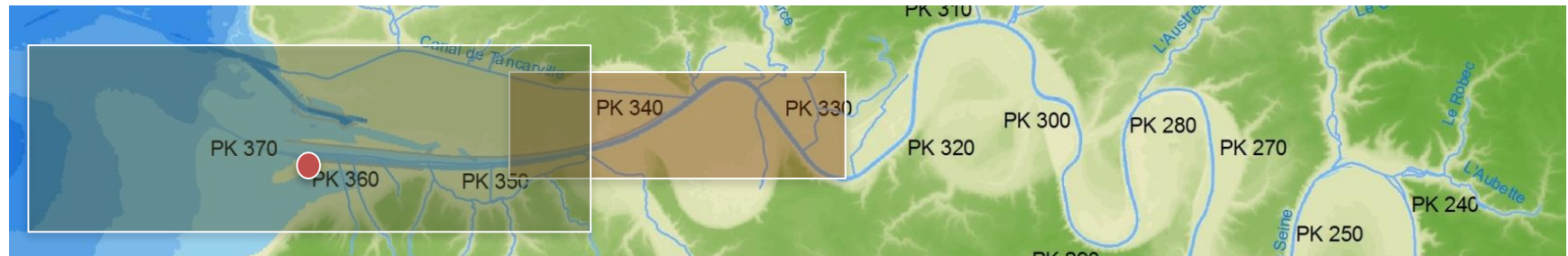


Nouvelle calibration



Concentration MES m(g/l)

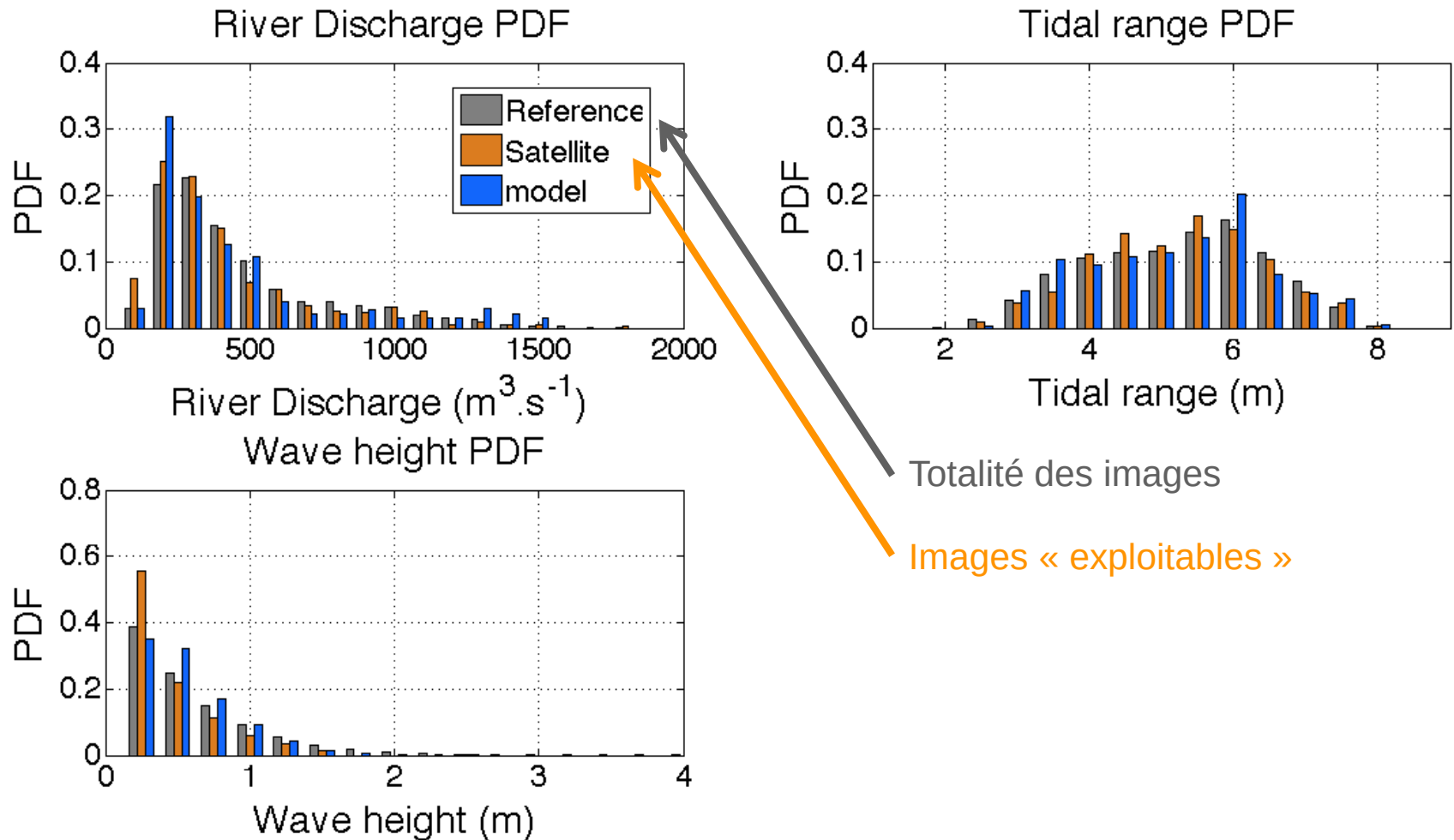
Images satellite à ~12h



Mortes eaux,
Marée basse

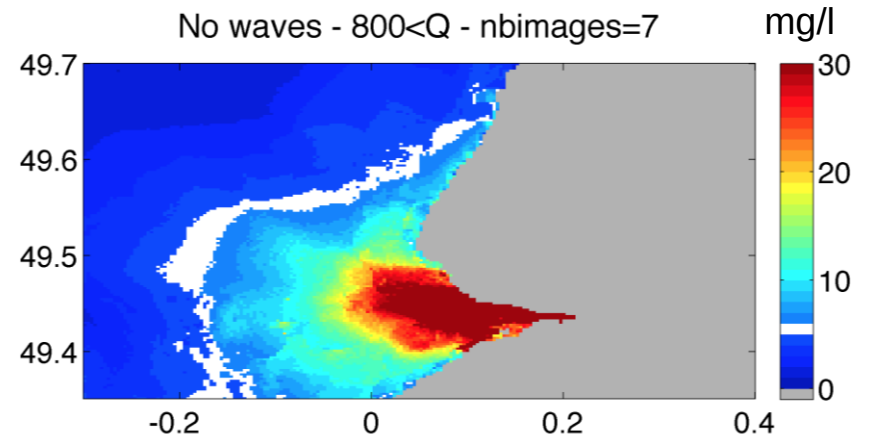
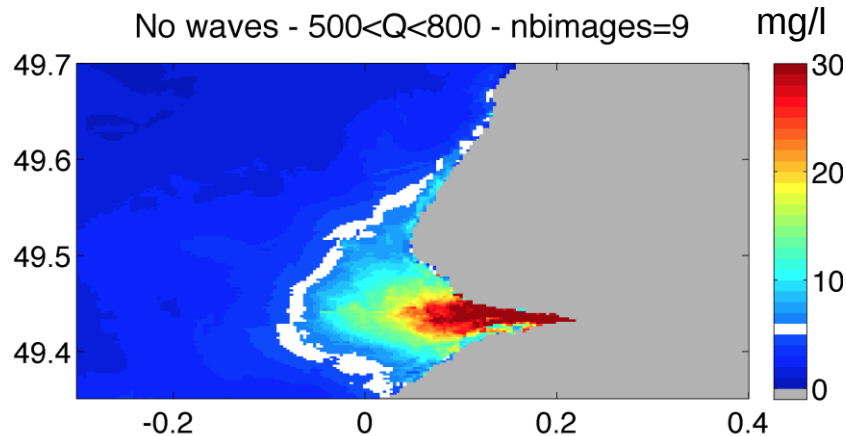
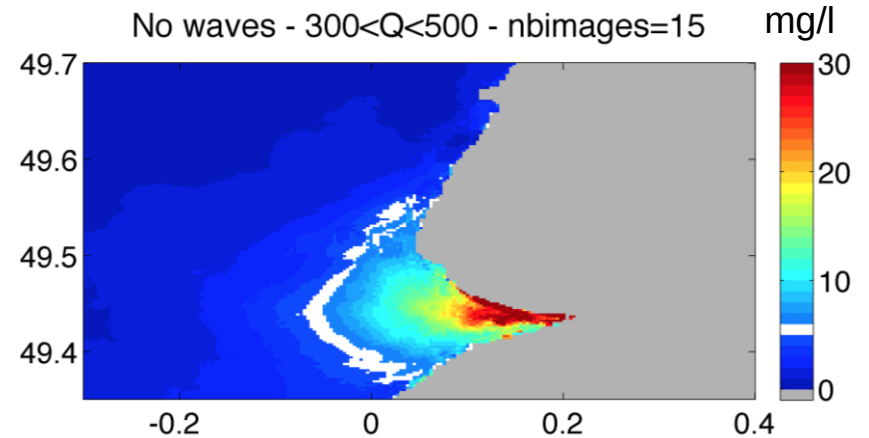
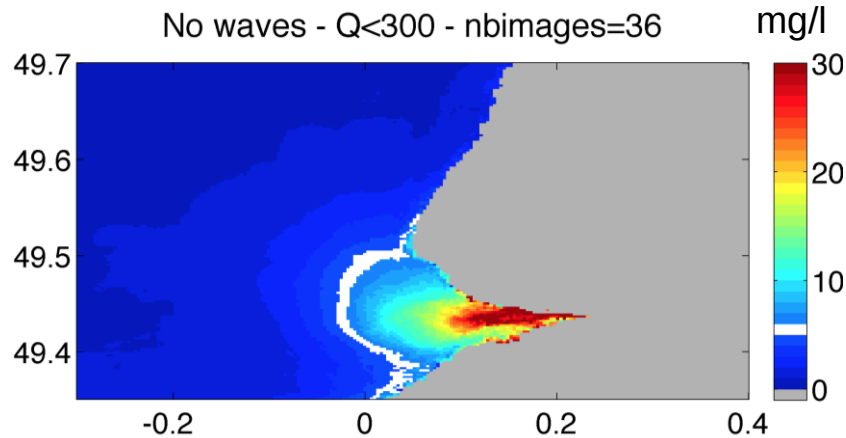
Vives eaux,
Marée haute

Occurrence des images satellite



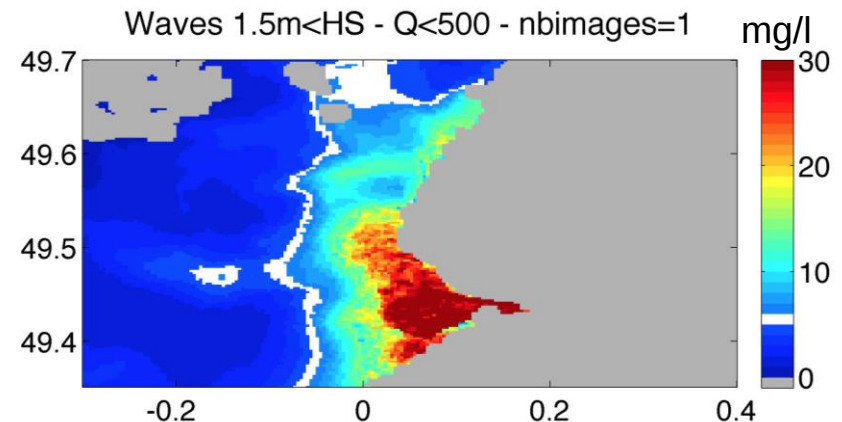
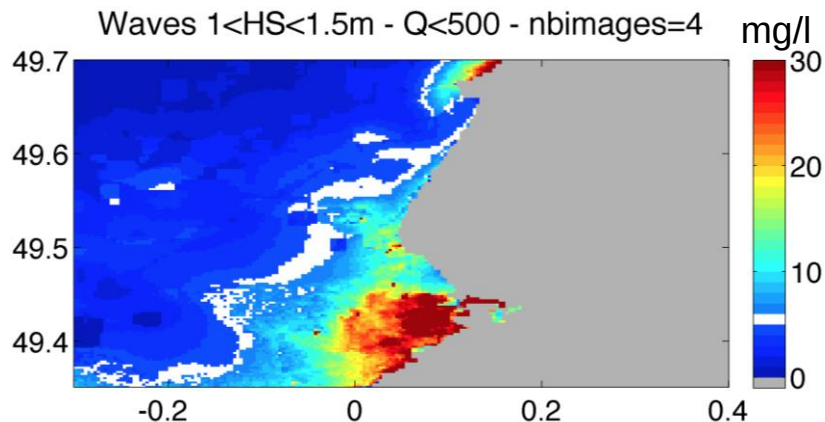
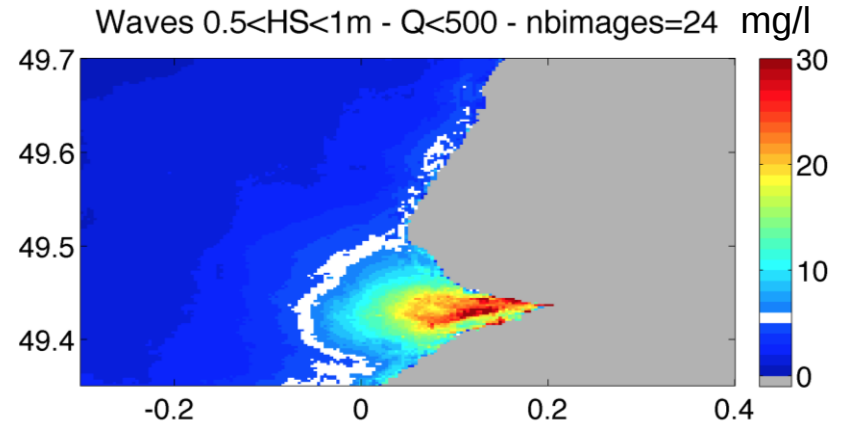
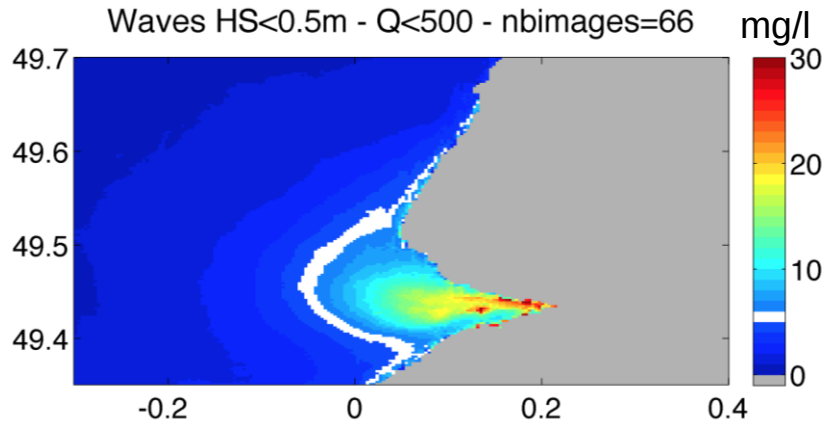
Images satellite « exploitables » représentatives des conditions annuelles
(période 2002-2016)

MES par satellite : influence du débit



Extension du panache turbide à l'embouchure en période de crue...
... mais la masse du bouchon vaseux n'augmente pas nécessairement

MES par satellite : influence des vagues



Remise en suspension des sédiments
à l'embouchure en période de vagues

➔ Quantification du panache
(aire, masse) pour $\neq$ conditions
hydrométéorologiques

Modélisation numérique 3D (curviligne)

Maillage curviligne : ~30 m à l'embouchure / ~2 km au large

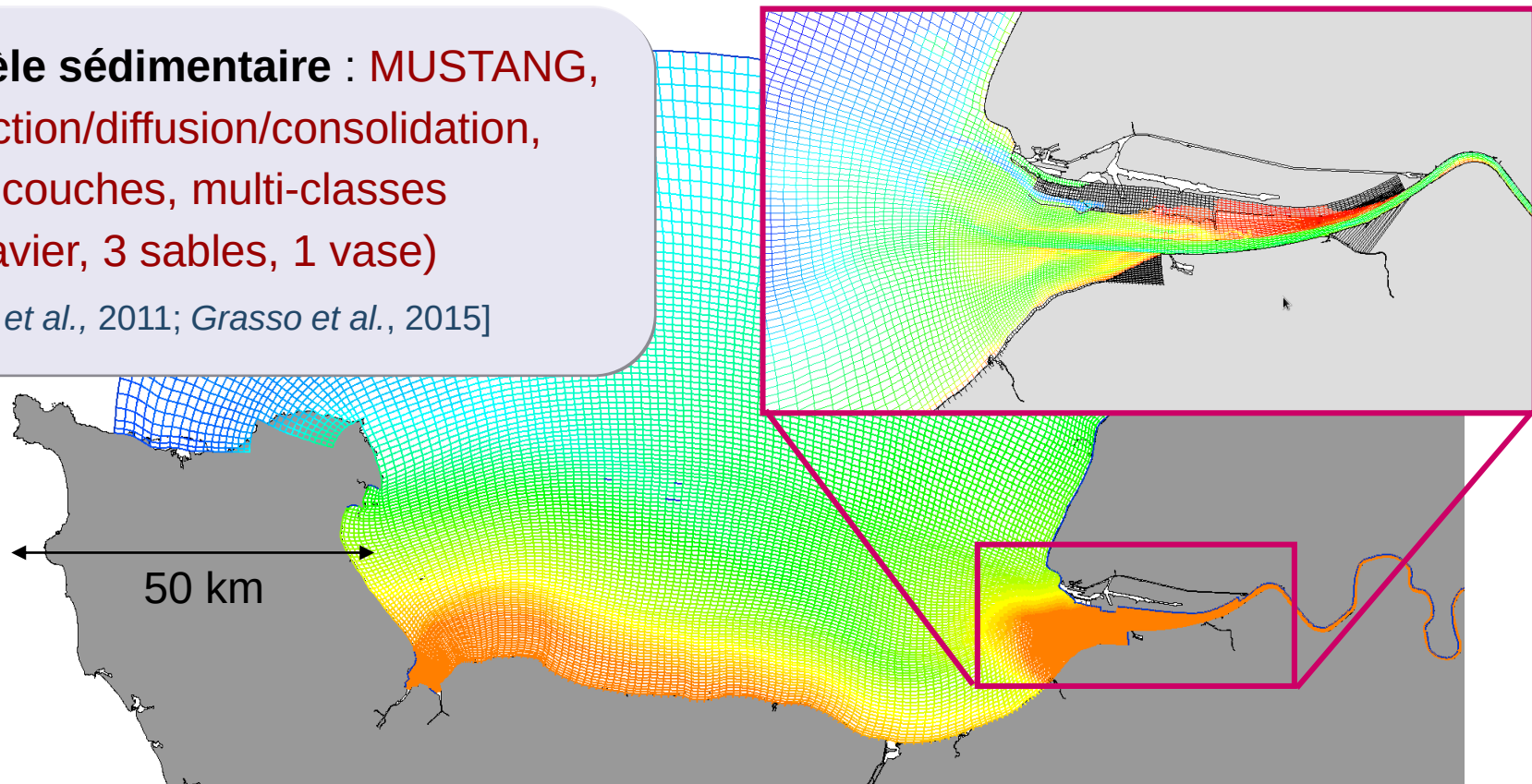
Modèle hydrodynamique : MARS3D, 10 couches verticales

Forçages réalistes : vent, vagues, marée, débits liquides/solides (Seine ± tribut)

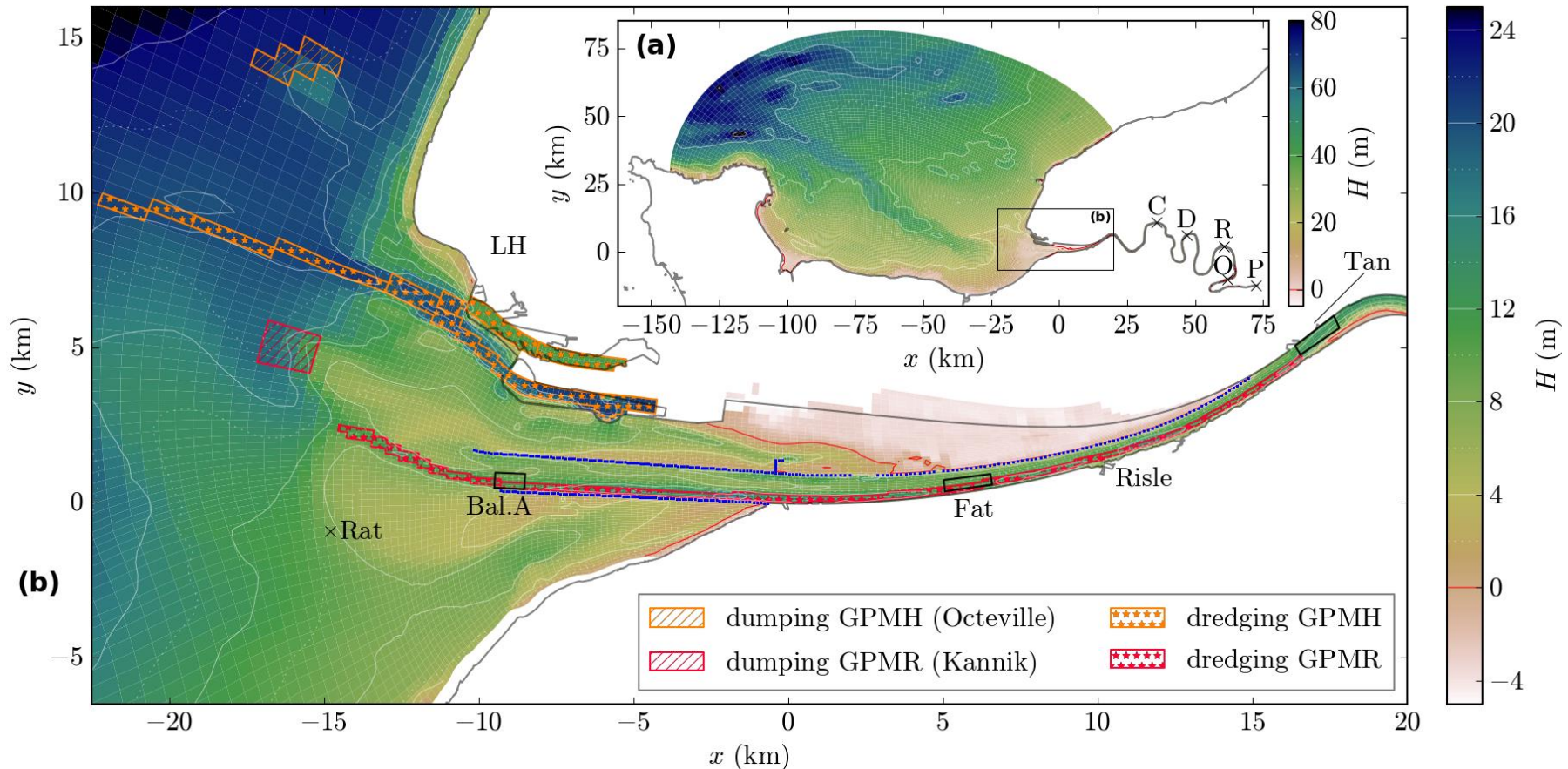
[Lazure and Dumas, 2008 ; Kervella et al., 2012 ; Roland and Ardhuin, 2014]

Modèle sédimentaire : MUSTANG,
advection/diffusion/consolidation,
multi-couches, multi-classes
(1 gravier, 3 sables, 1 vase)

[Le Hir et al., 2011; Grasso et al., 2015]



Validation du modèle hydro-sédimentaire

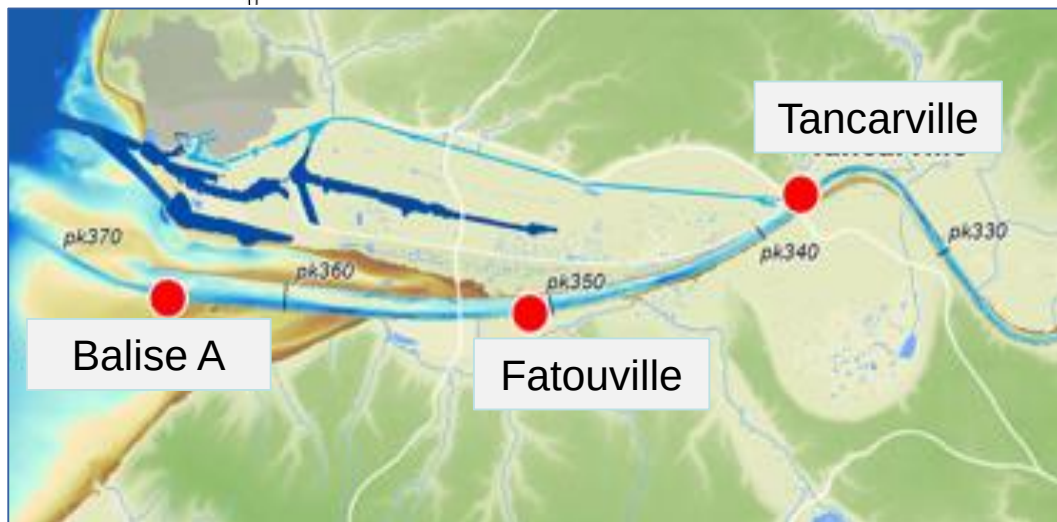
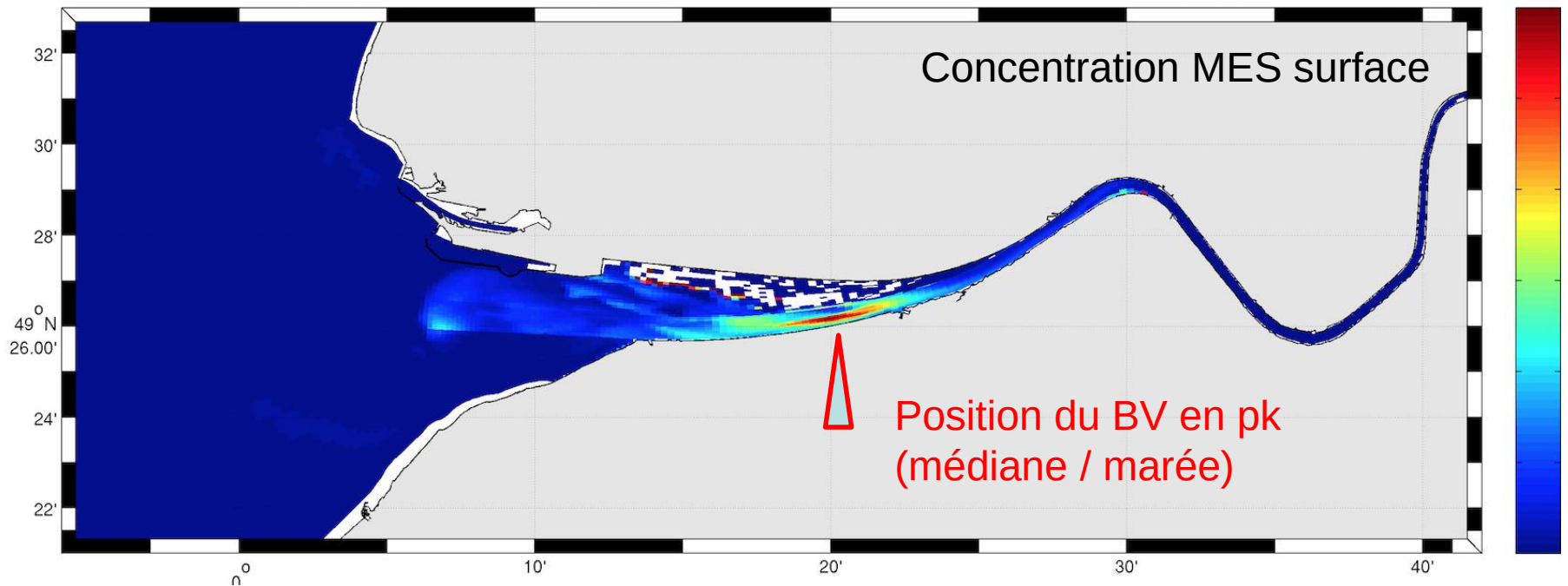


Période 2010-2011 et 2014-2015 :

Hauteur d'eau, courants, vagues, salinité fond/surface, turbidité fond, dragages
GPMH/GPMR

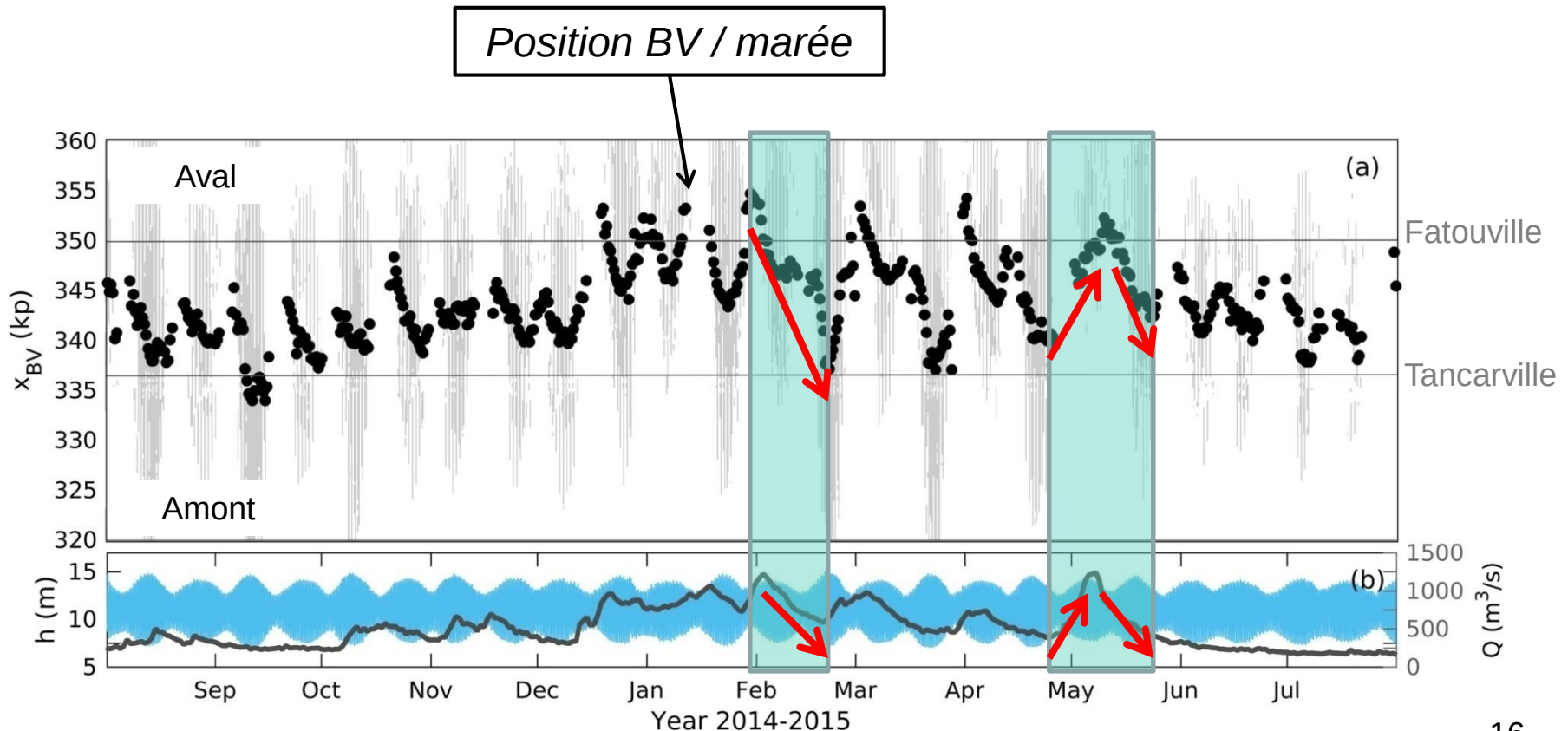
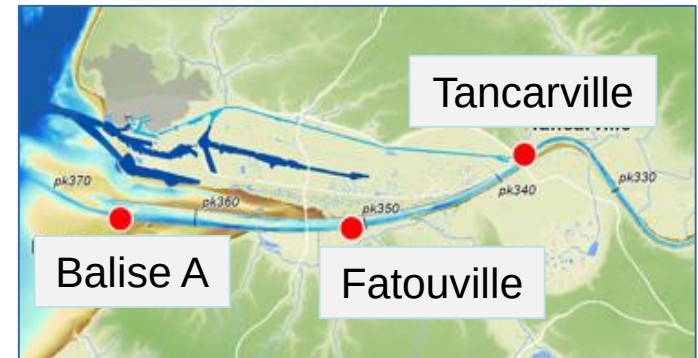
[Projets MODEL, FLUMES (Seine-Aval 4), réseau SYNAPSES]

Position du bouchon vaseux

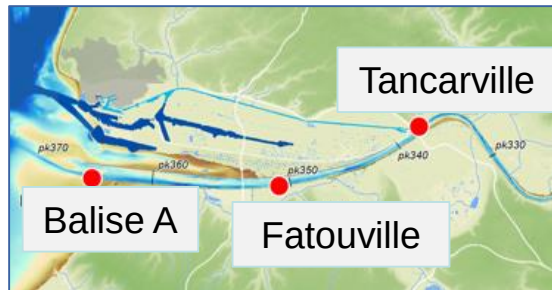


Position du bouchon vaseux

- Position du BV modulée par les cycles de marée semi-diurne, les cycles VE/ME et le débit
- Forte réactivité du BV aux variations de débit de la Seine



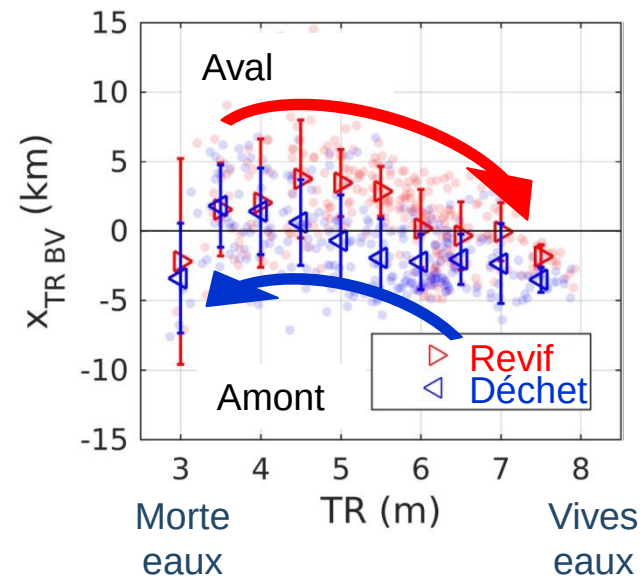
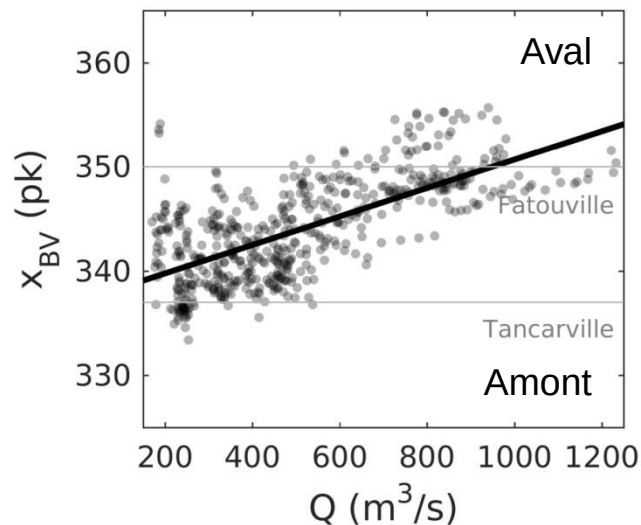
Position du bouchon vaseux



$$X_{BV} = X_{Q\ BV} + X_{TR\ BV} \quad (TR = \text{Tidal Range})$$

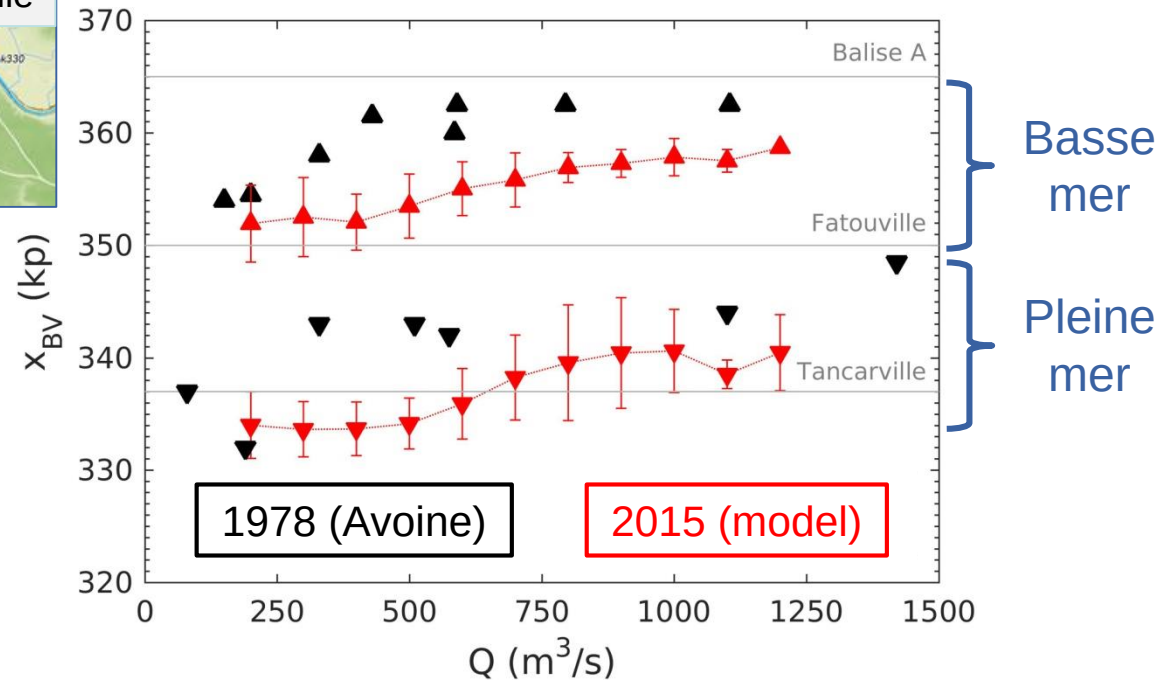
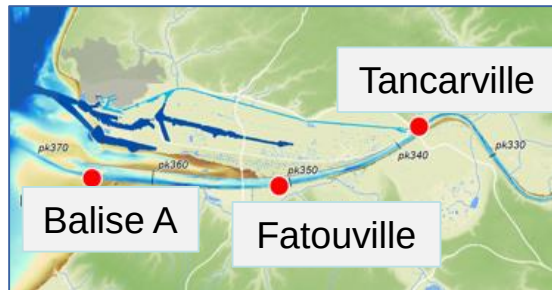
Revif : augmentation du marnage (ME → VE)

Déchet : diminution du marnage (VE → ME)



- BV en amont en VE (pompage tidal)
- BV remonte en forte ME (gradient de salinité)
- Hystérésis : inertie pour mettre en place le pompage tidal

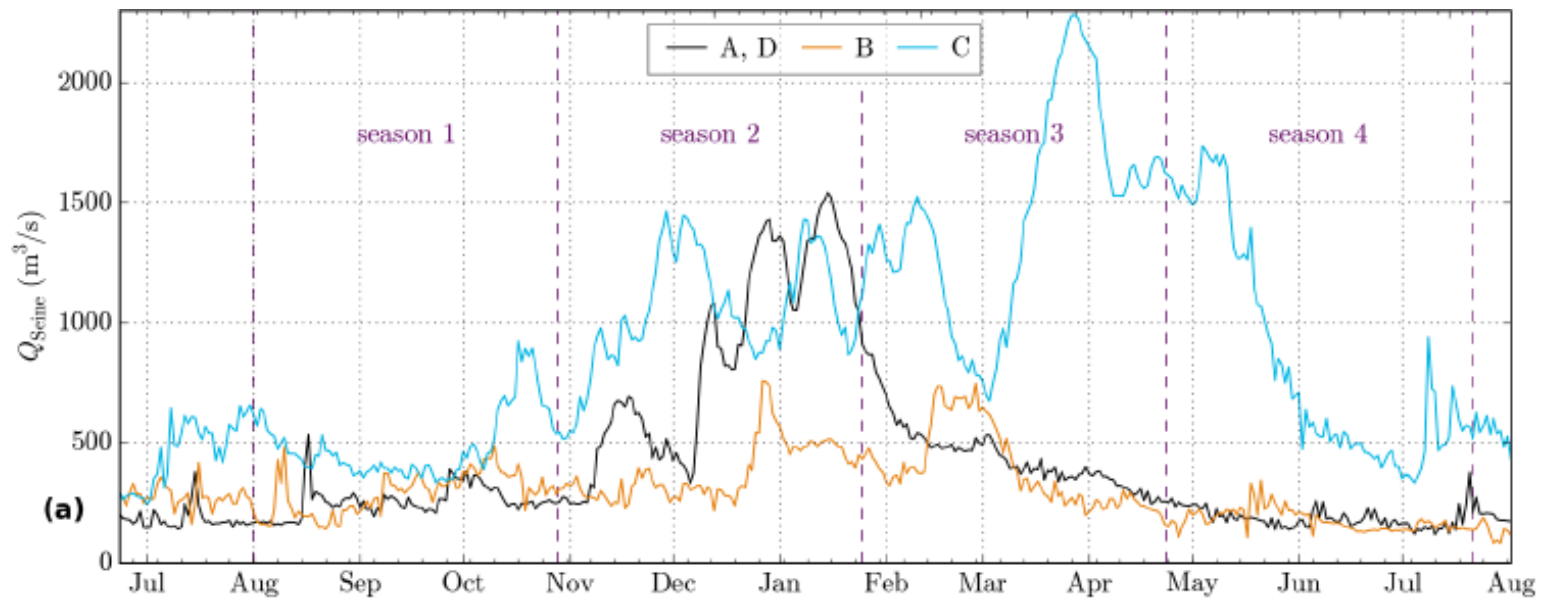
Position du BV : 2015 vs 1978 [*Avoine et al.*, 1981]



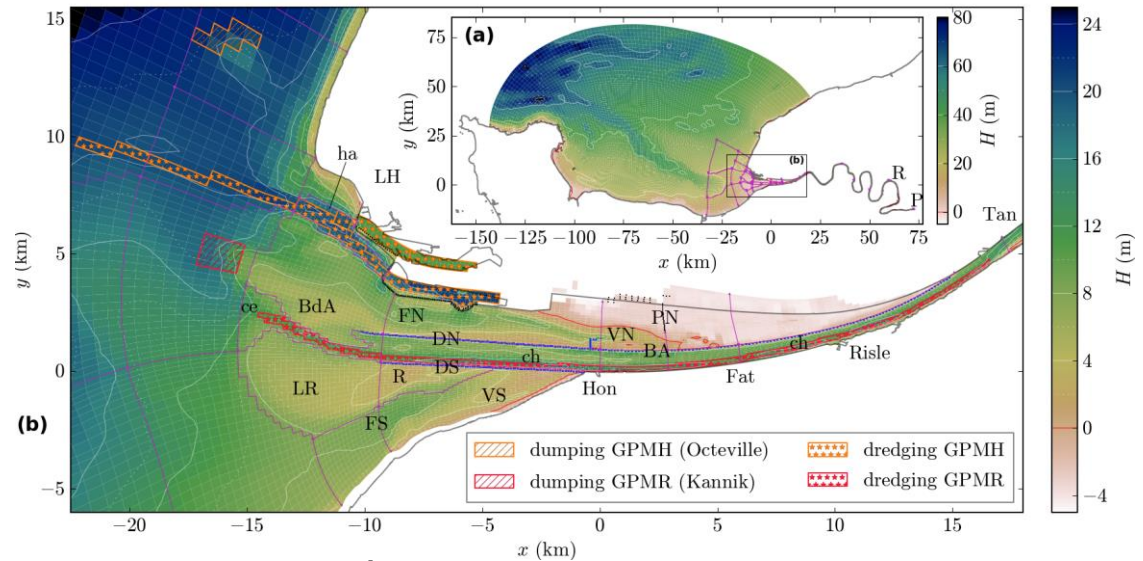
- 1960 → 1978 : Migration du BV vers l'aval [*Avoine et al.*, 1981]
 - 1978 → 2015 : Migration du BV vers l'amont (2-14 km)
 - Asymétrie de marée plus forte en 1960 et 2015 qu'en 1978 [*ANPHYECO (SA5)*]
- ➔ Renforcement du pompage tidal ➔ BV plus en amont en 1960 et 2015**

Flux et bilans sédimentaires : forçages

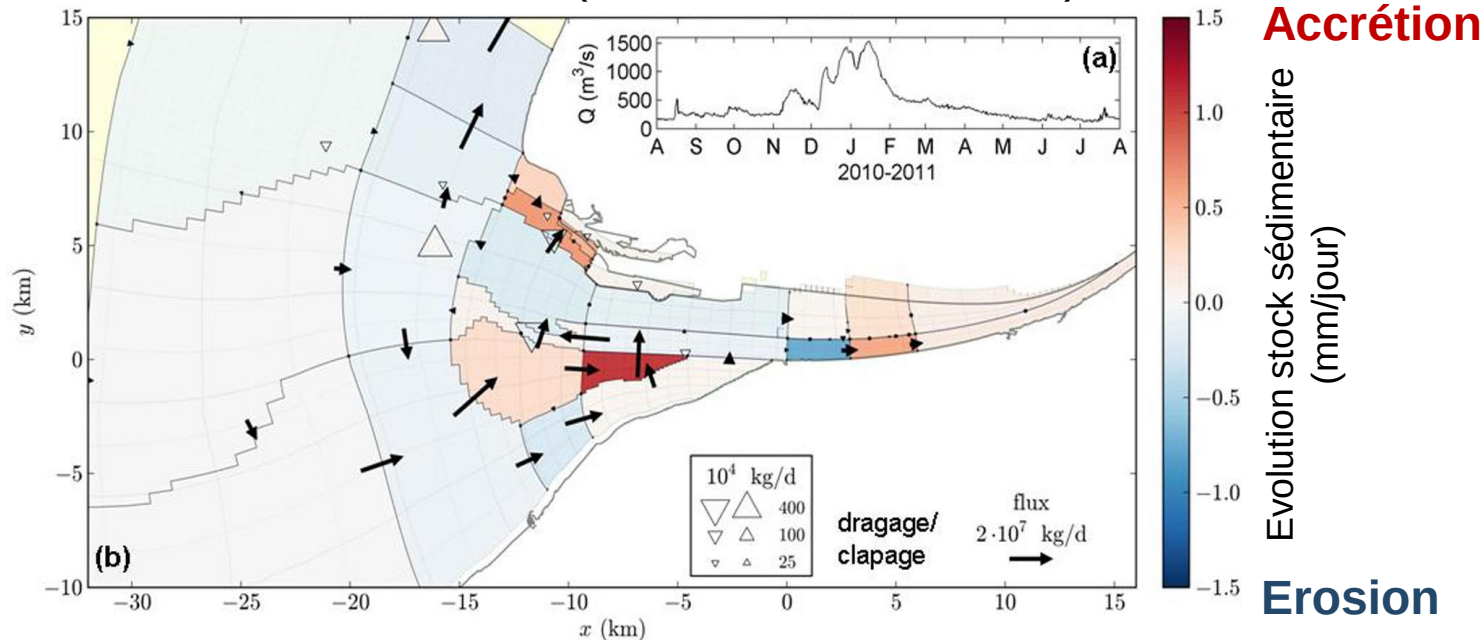
experiment	river discharge (m^3/s)	wind, waves, tides
A reference	typical (433), 2010-2011	calm, 2010-2011
B low Q	low (309), 1995-1996	calm, 2010-2011
C high Q	high (958), 2000-2001	calm, 2010-2011
D stormy	typical (433), 2010-2011	stormy, 2011-2012



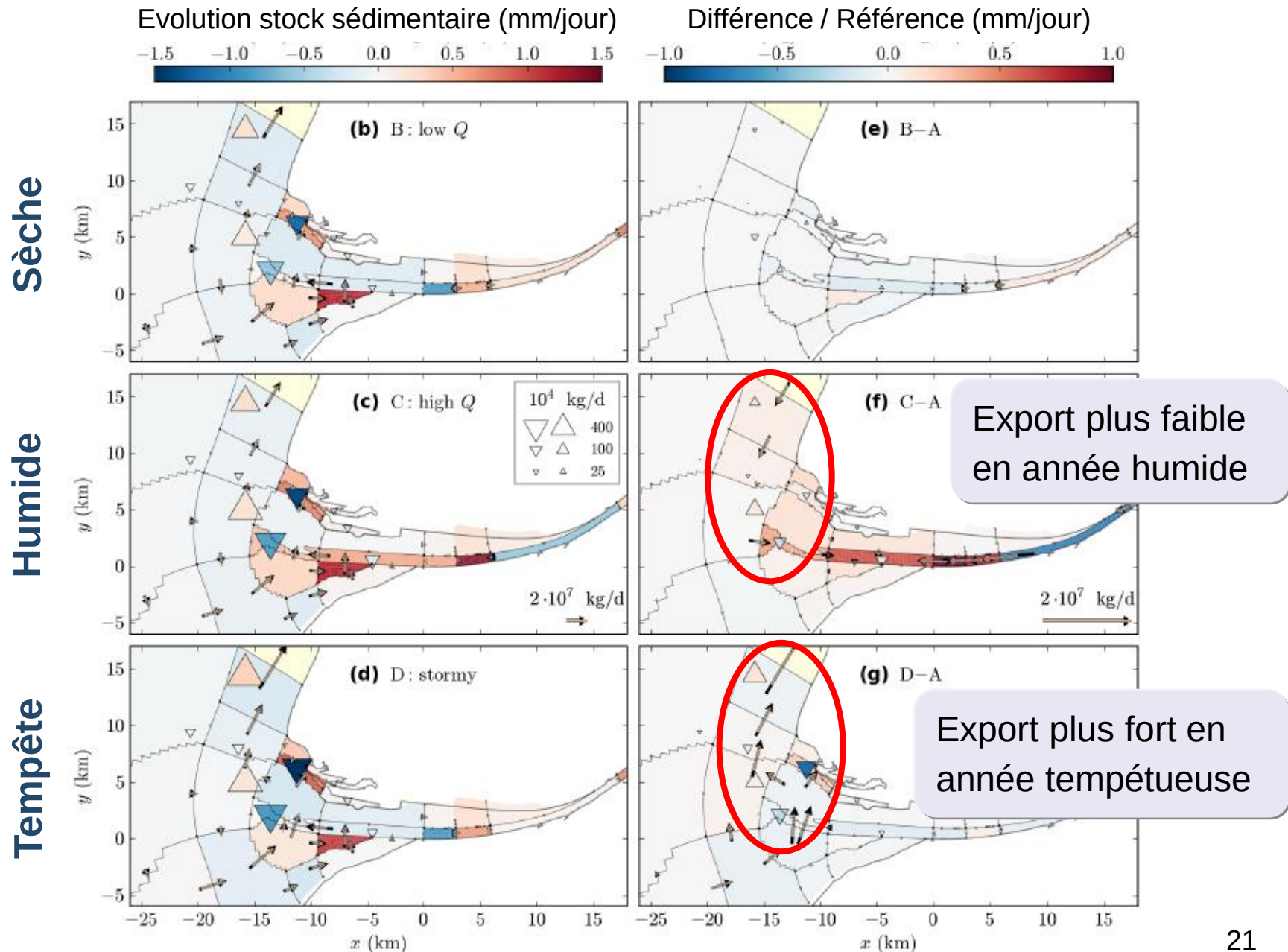
Flux et bilans sédimentaires : frontières / zones



Année de référence (aout 2010 – aout 2011)

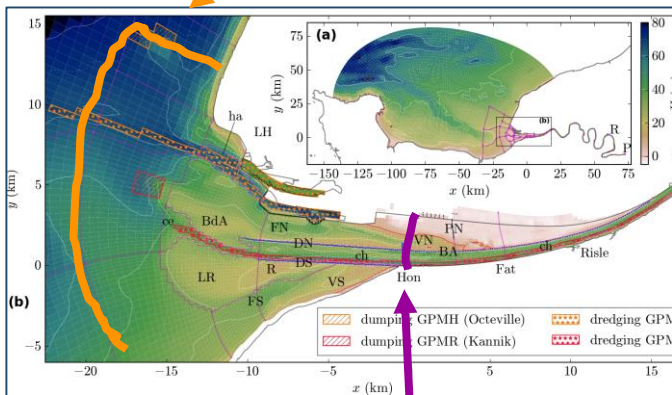


Résiduels annuels : années sèche / humide / tempête

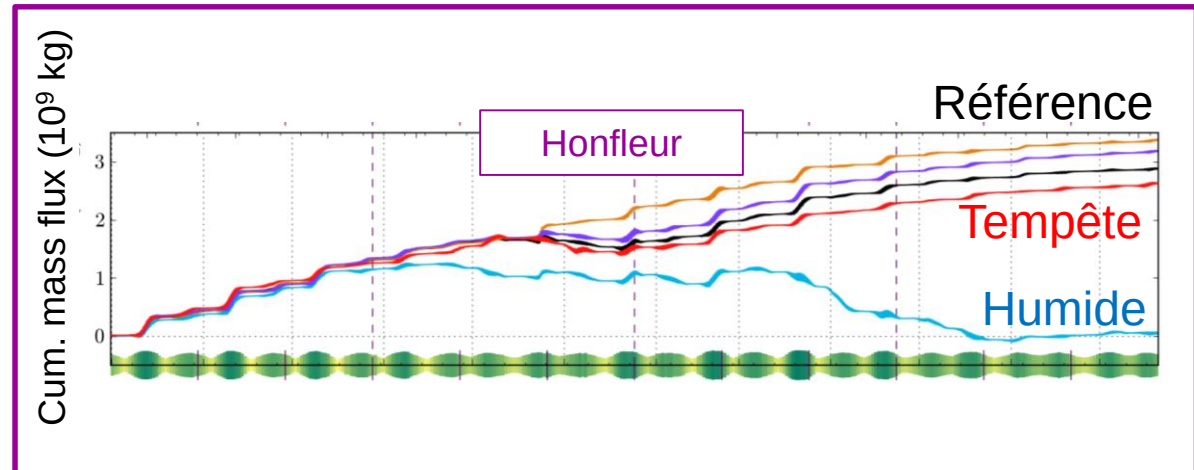
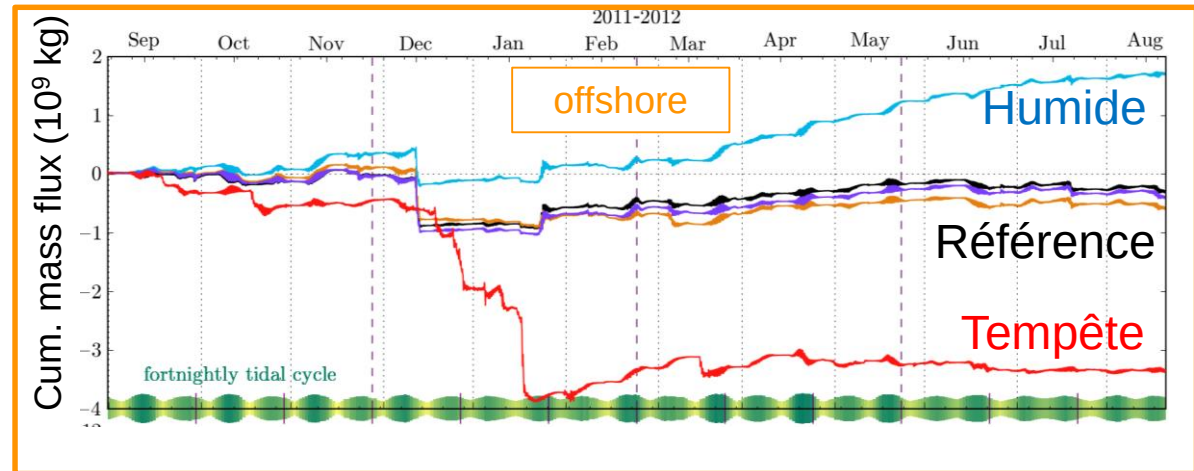


Flux sédimentaires : offshore, embouchure

Limite « offshore »



Limite « Honfleur »



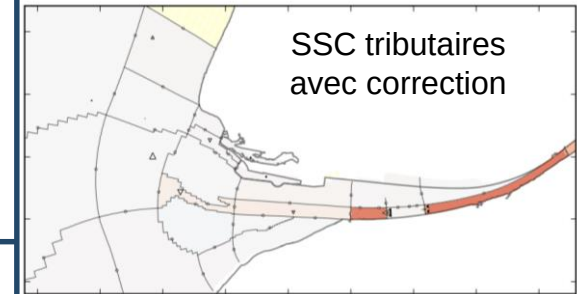
Flux sédimentaires : influence tributaires

+ débits liquides/solides tributaires [Projet AFFLUSEINE (SA5)]
(Austreberthe, Cailly, Eure, Risle, Andelle, Ste Gertrude)

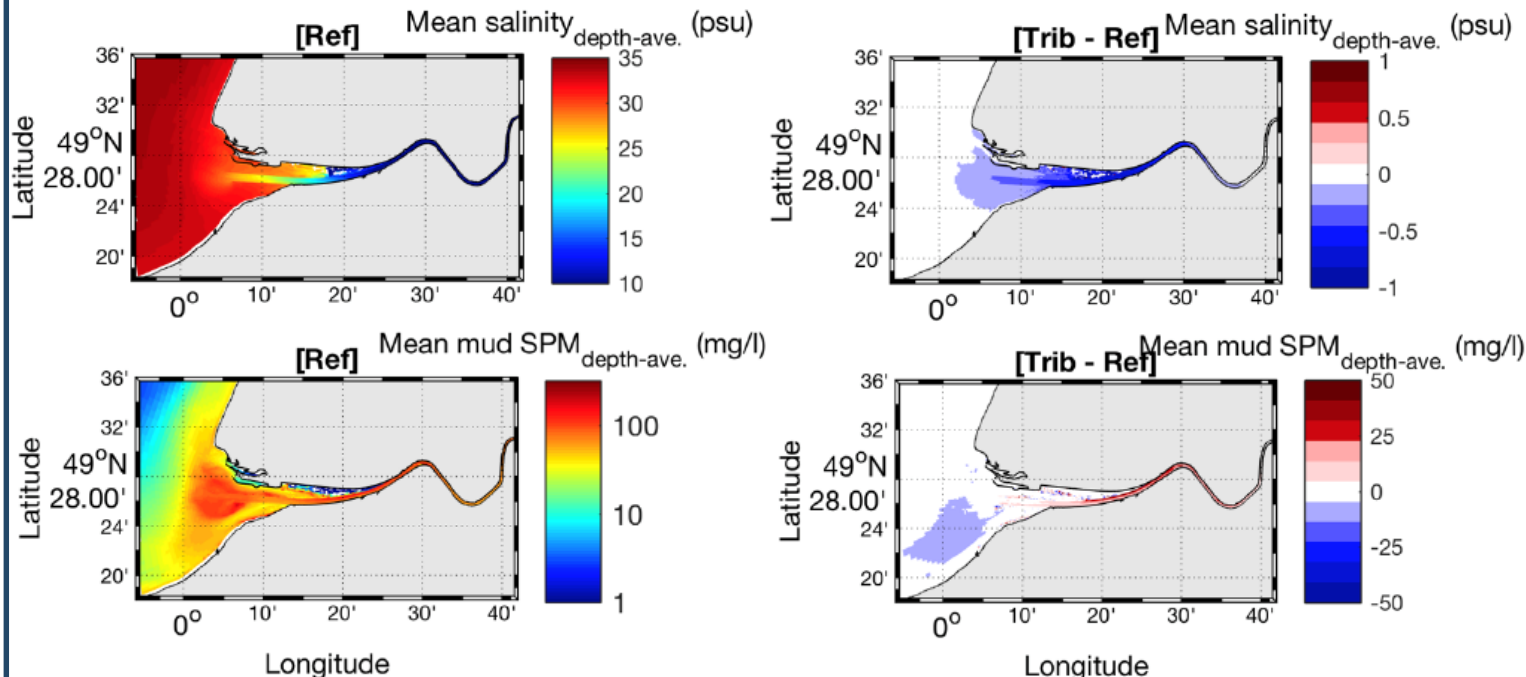
	1991-2012	1995-1996	Juin 1996
$Q_{\text{tributaires}}/Q_{\text{total}}$	~ 9%	~ 15%	~ 25%

Différence AVEC – SANS tributaires (année 1995-96)

Stock sédimentaire (mm/jour)

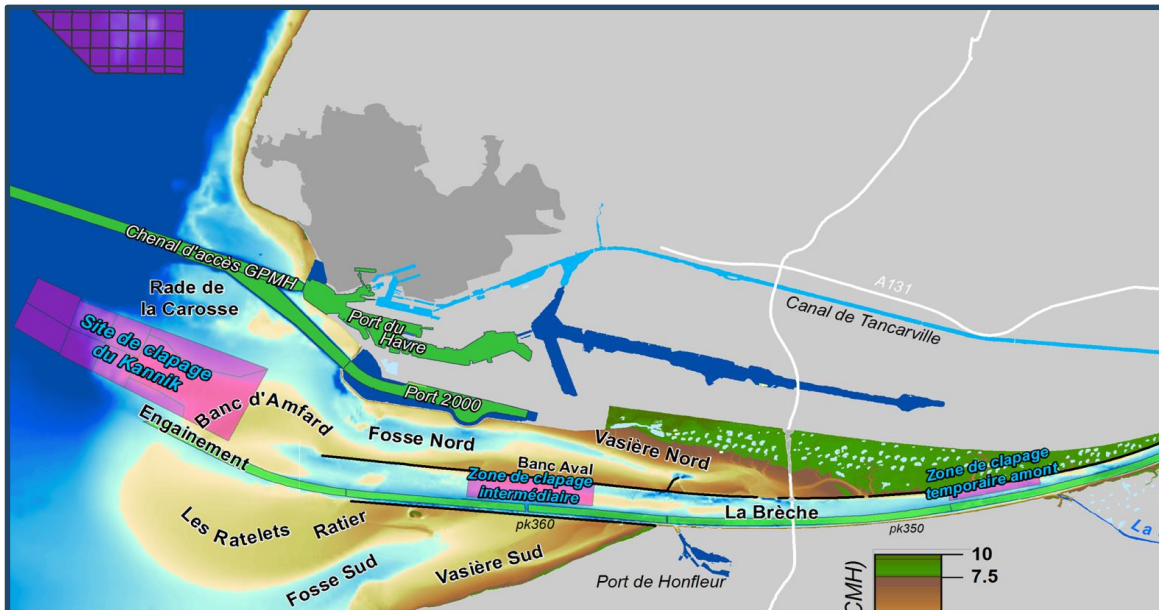
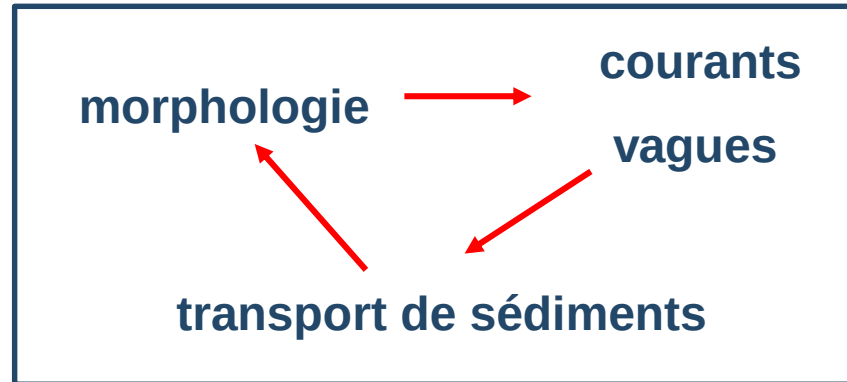


Différence AVEC – SANS tributaires (VE-ME, juin 1996)



Morphodynamique : stratégie de modélisation

Couplage
morphodynamique

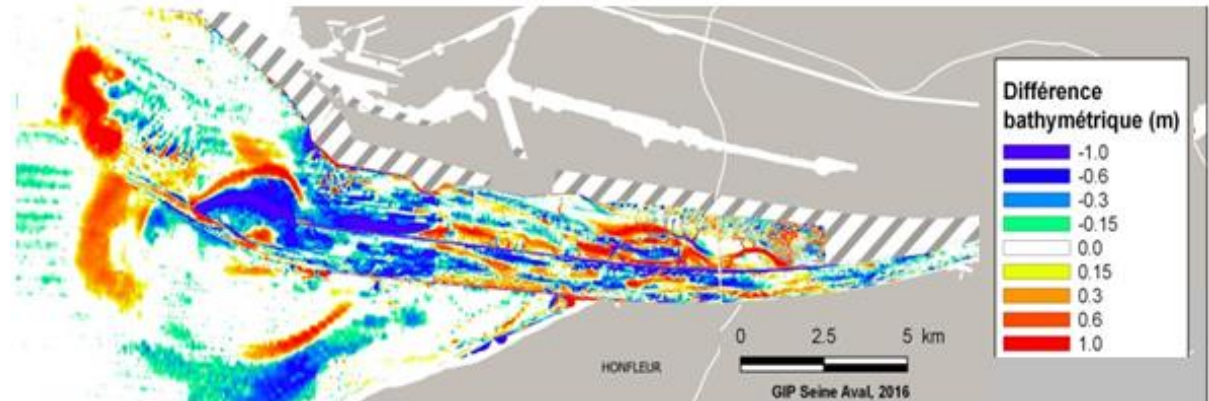


Méthode de validation

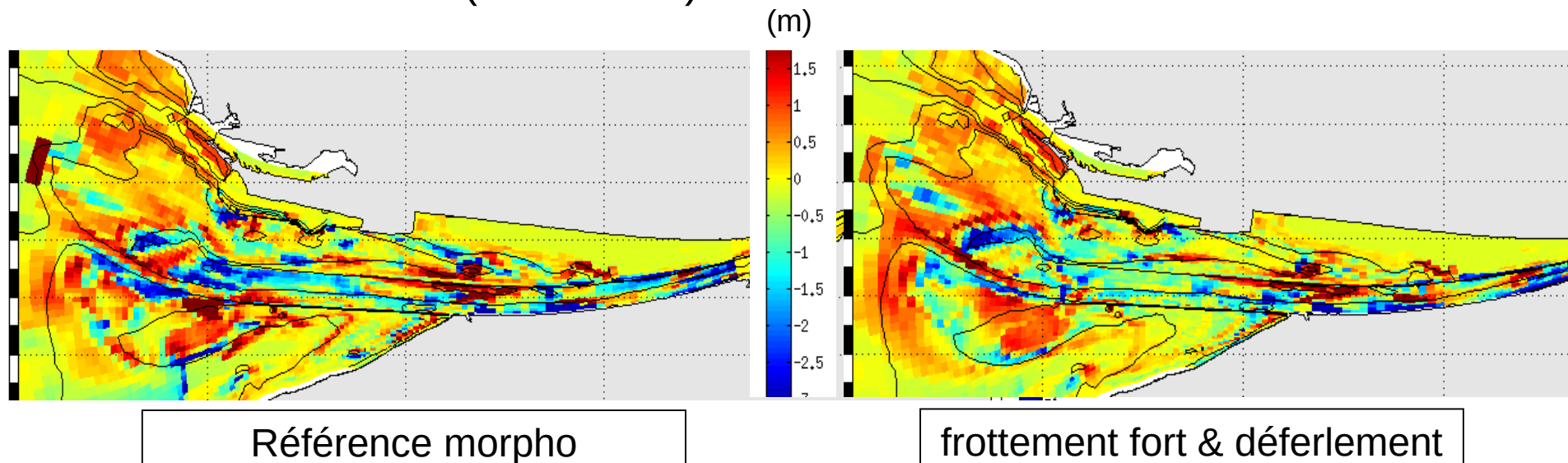
Marégraphes
Turbidité (SYNAPSES)
Altus (COLMATAGE, SA4)
Levés RH + LiDAR
Carte sédim (COLMATAGE)
Dragages (GPMH, GPMR)

Différentiels bathymétriques

Observé sur 2 ans
(2010-2012)

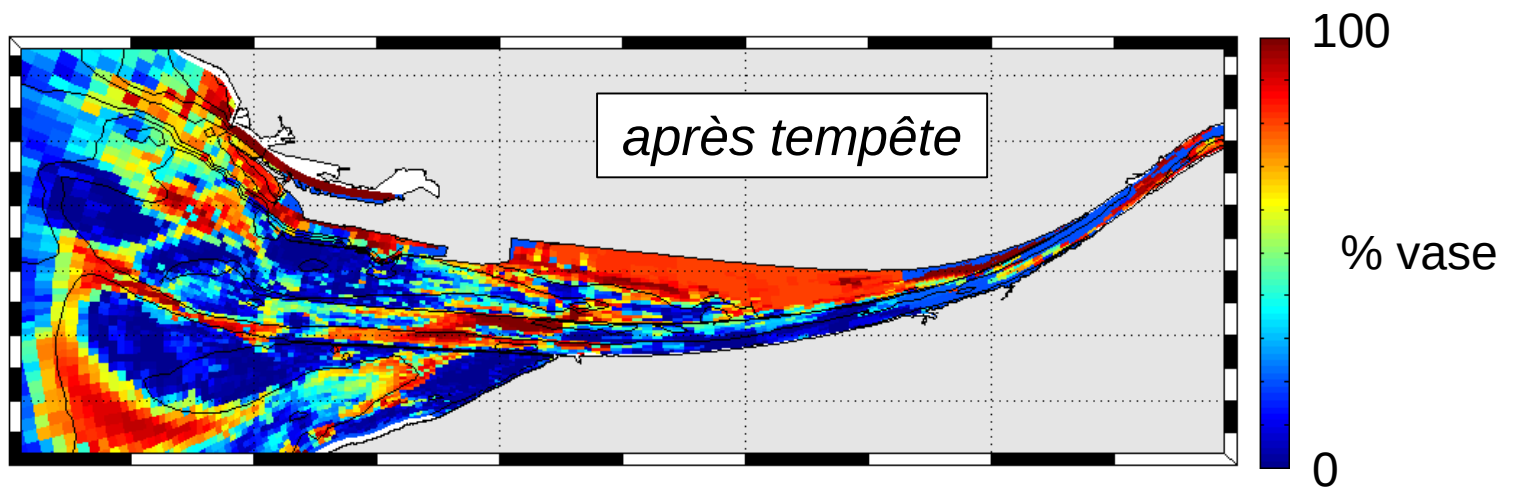
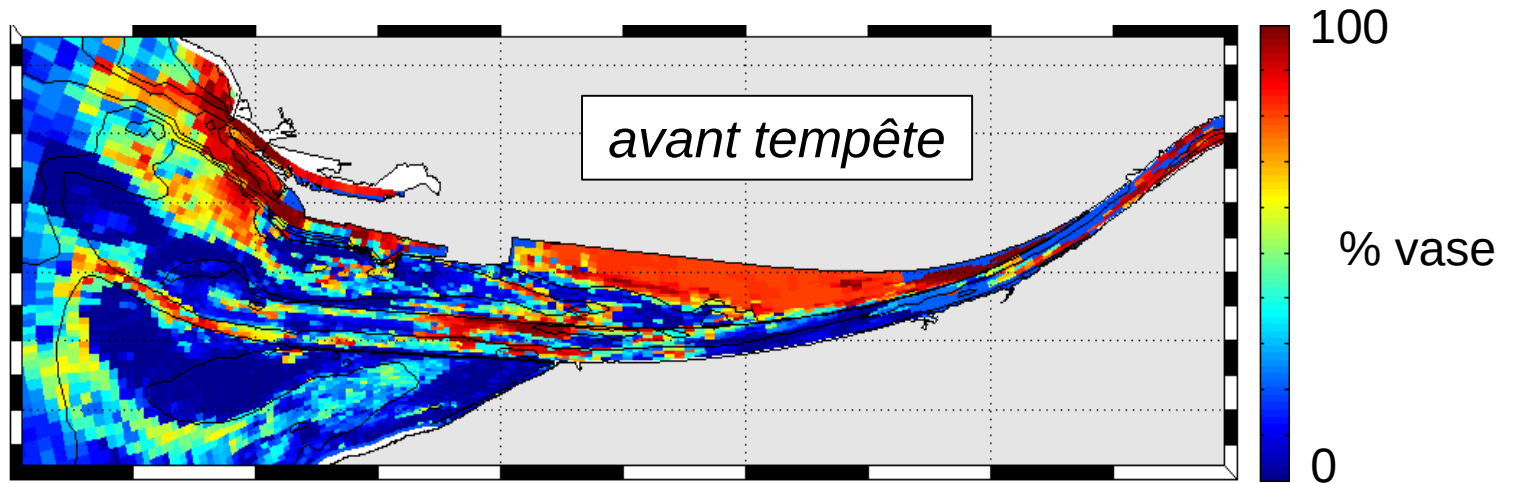


Calculé sur un an (2010-2011)

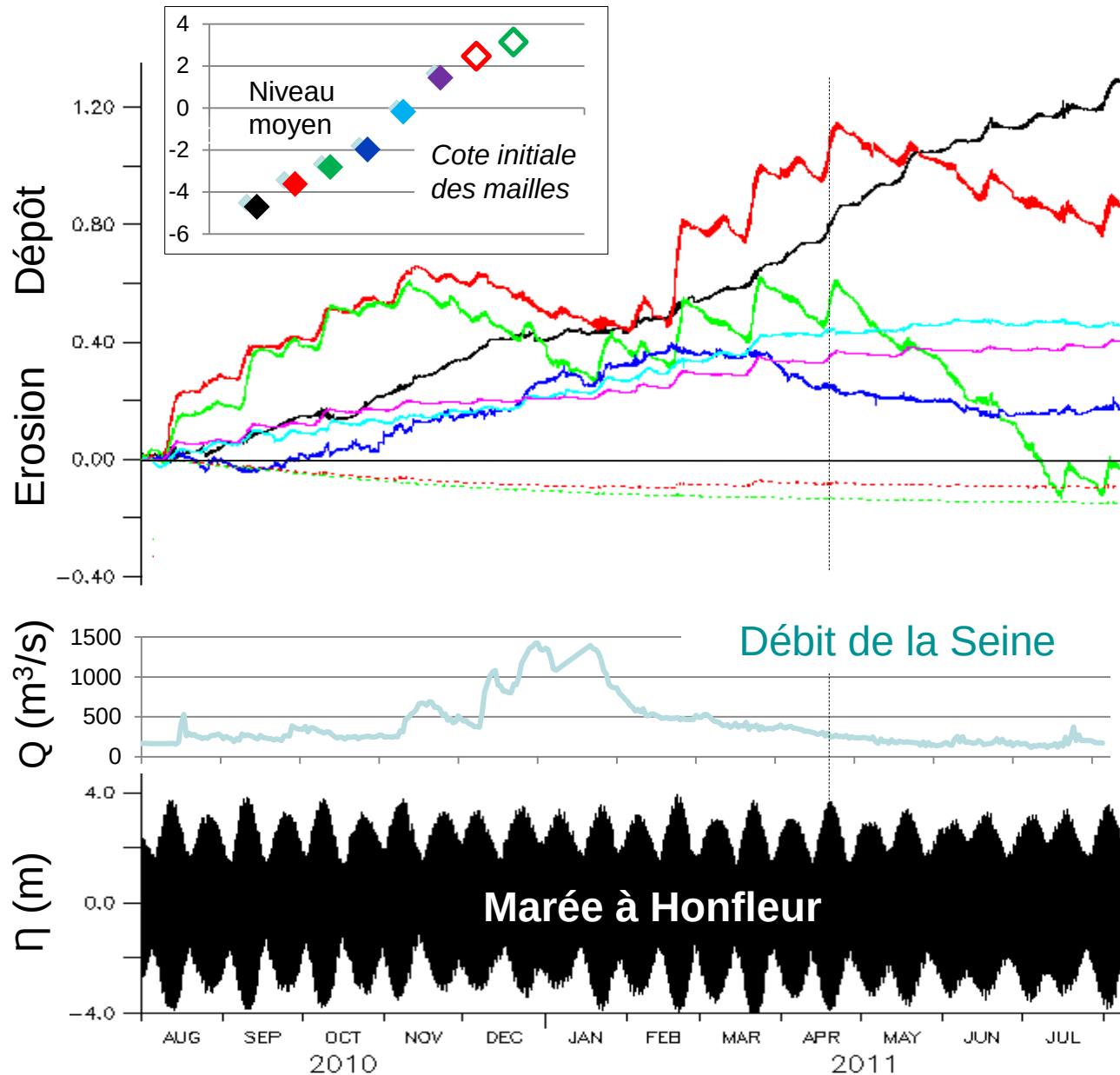


Variabilité de la couverture sédimentaire

Pourcentage de vase dans les 16 mm de surface des sédiments



Simulation des érosions/dépôts sur la Vasière Nord



Conclusions

MESURES

Objectif : Contribuer à l'évaluation des transferts sédimentaires intra-estuariens

Complémentarité des différentes approches altimétriques (Altus, TLS, drone) pour le suivi des vasières intertidales

Pertinence des images satellite pour étudier la dynamique du panache par forte turbidité (**limite pour l'étude du bouchon vaseux**)

MODÉLISATION

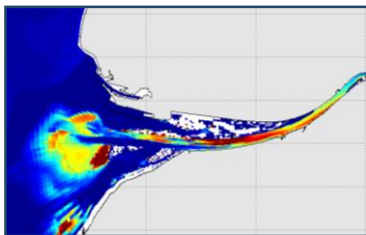
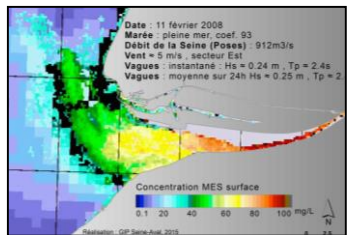
Objectif : Etudier et quantifier la dynamique hydro-morpho-sédimentaire de l'estuaire aval

Influence du débit, de la marée et des vagues sur la position et la masse du bouchon vaseux

Augmentation de l'export de sédiment en année tempétueuse (réduction en année humide)

Morphodynamique cohérente à l'échelles annuelle (**à étudier pour le long terme...**)

Données environnementales 2010-11, 2014-15 (**courant, turbidité, salinité,...**)
[Projets SA5 : ANPHYECO, BARBÈS, SUSPENSE, ZOOGLOBAL ; Projets SA6 : MEANDRES, MORPHOSEINE, PHARESEE ; SIG Habitat fonctionnel (GIPSA)]



HYMOSED

Modélisation du fonctionnement HYdro- MOrpho-SEDimentaire de l'estuaire de Seine

J. Ammann, F. Ardhuin, M. Beauverger, C. Delacourt, J. Deloffre, D. Doxaran,
P. Grandjean, F. Grasso, M. Jaud, V. Lafon, N. Le Dantec, P. Le Hir, J. Le Mercier,
E. Maneux, E. Schulz, M. Simon, B. Thouvenin, R. Verney

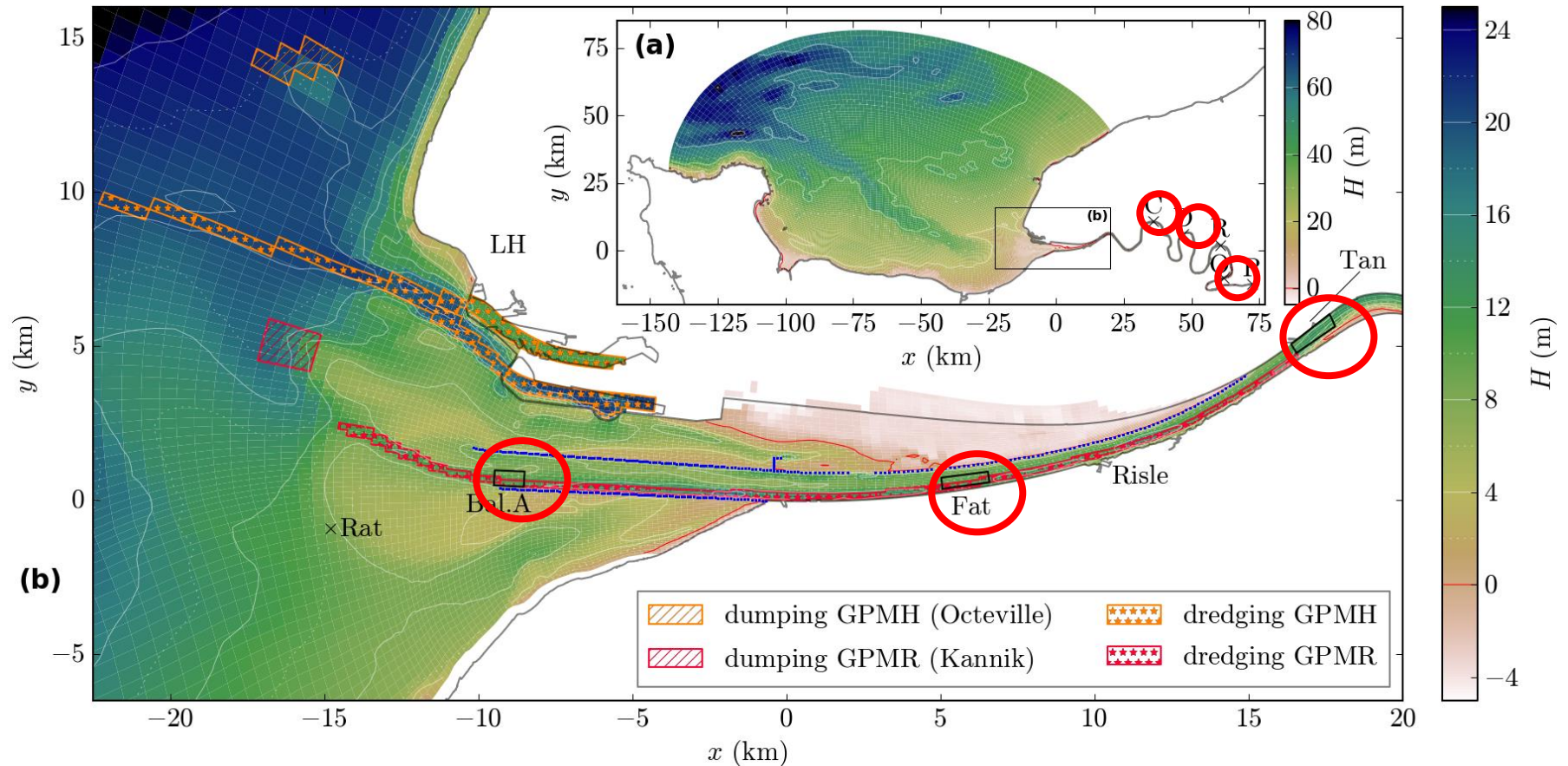


Laboratoire de Géologie de Lyon
Terre Planètes Environnement

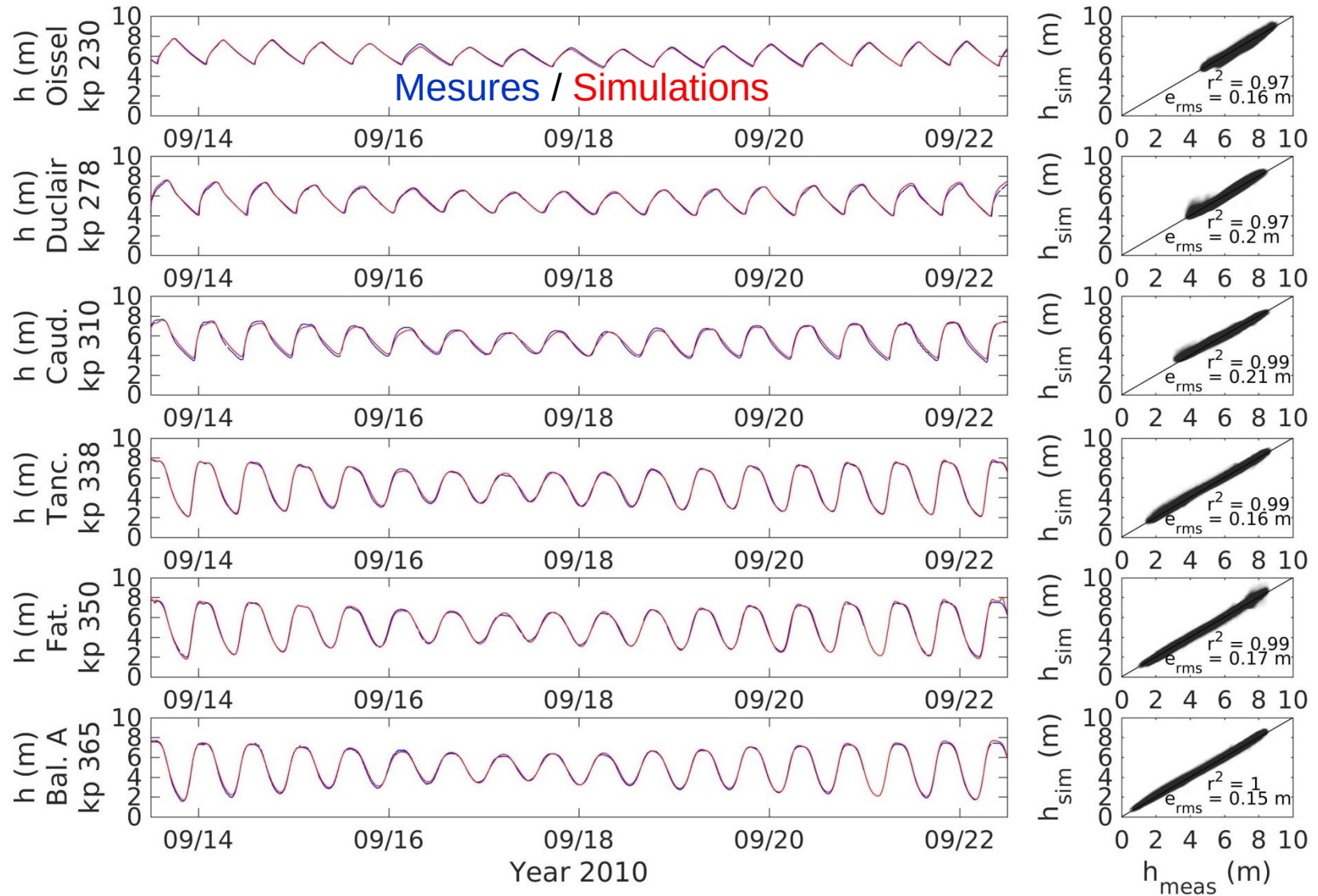


Séminaire Seine-Aval 5, Rouen, 17 mai 2017

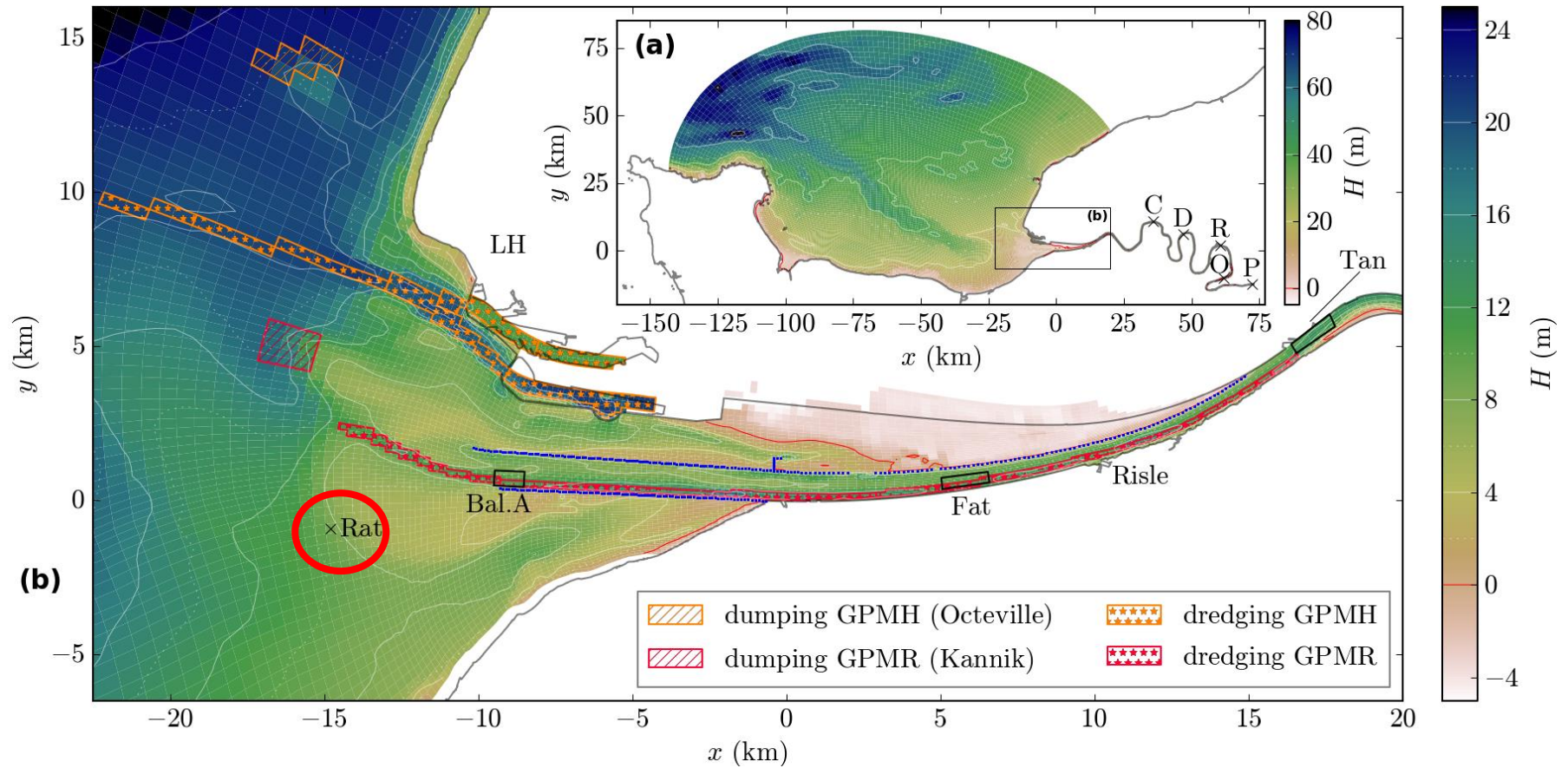
Hauteurs d'eau [Kervella et al., 2012]



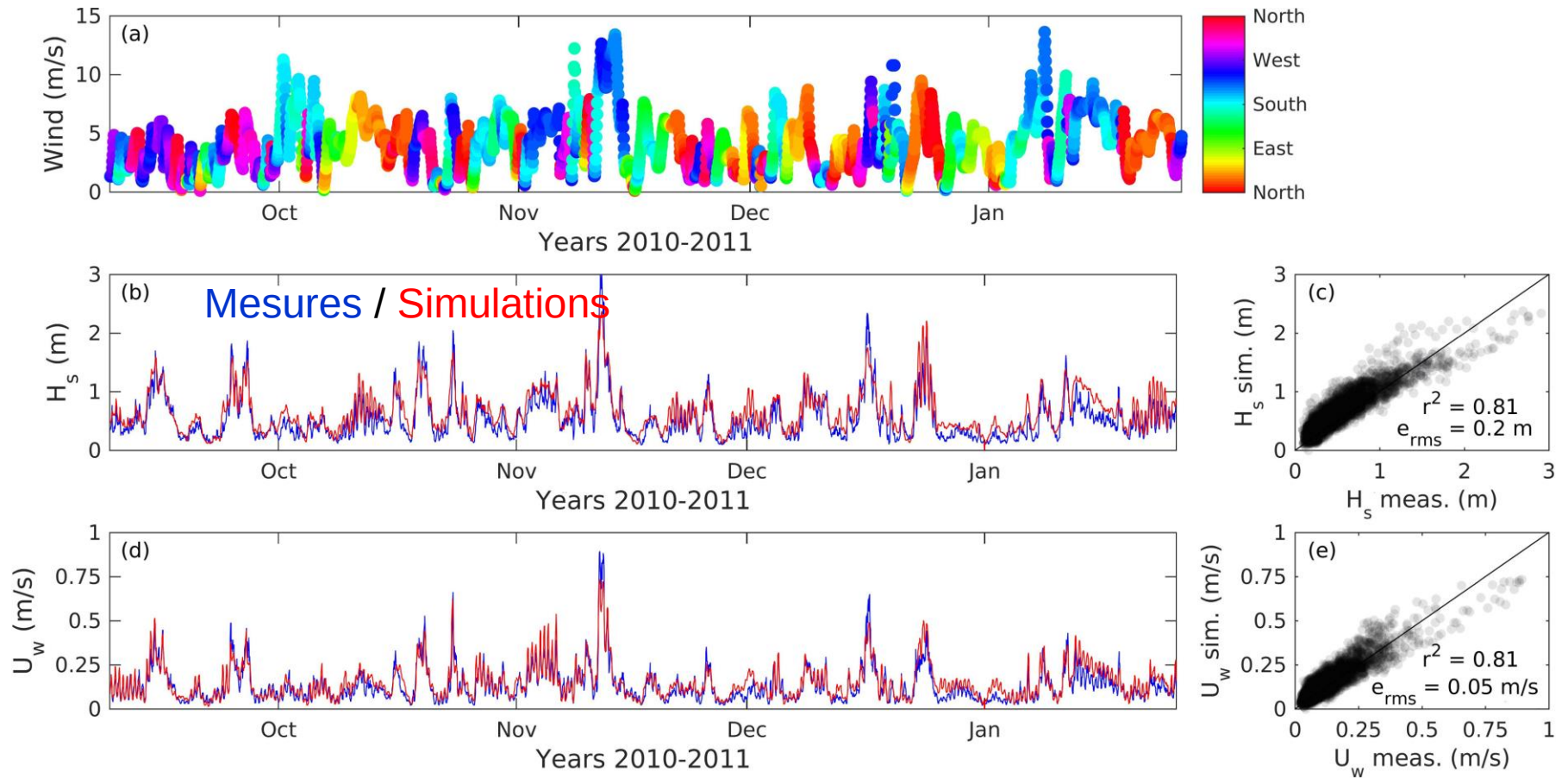
Hauteurs d'eau [Kervella et al., 2012]



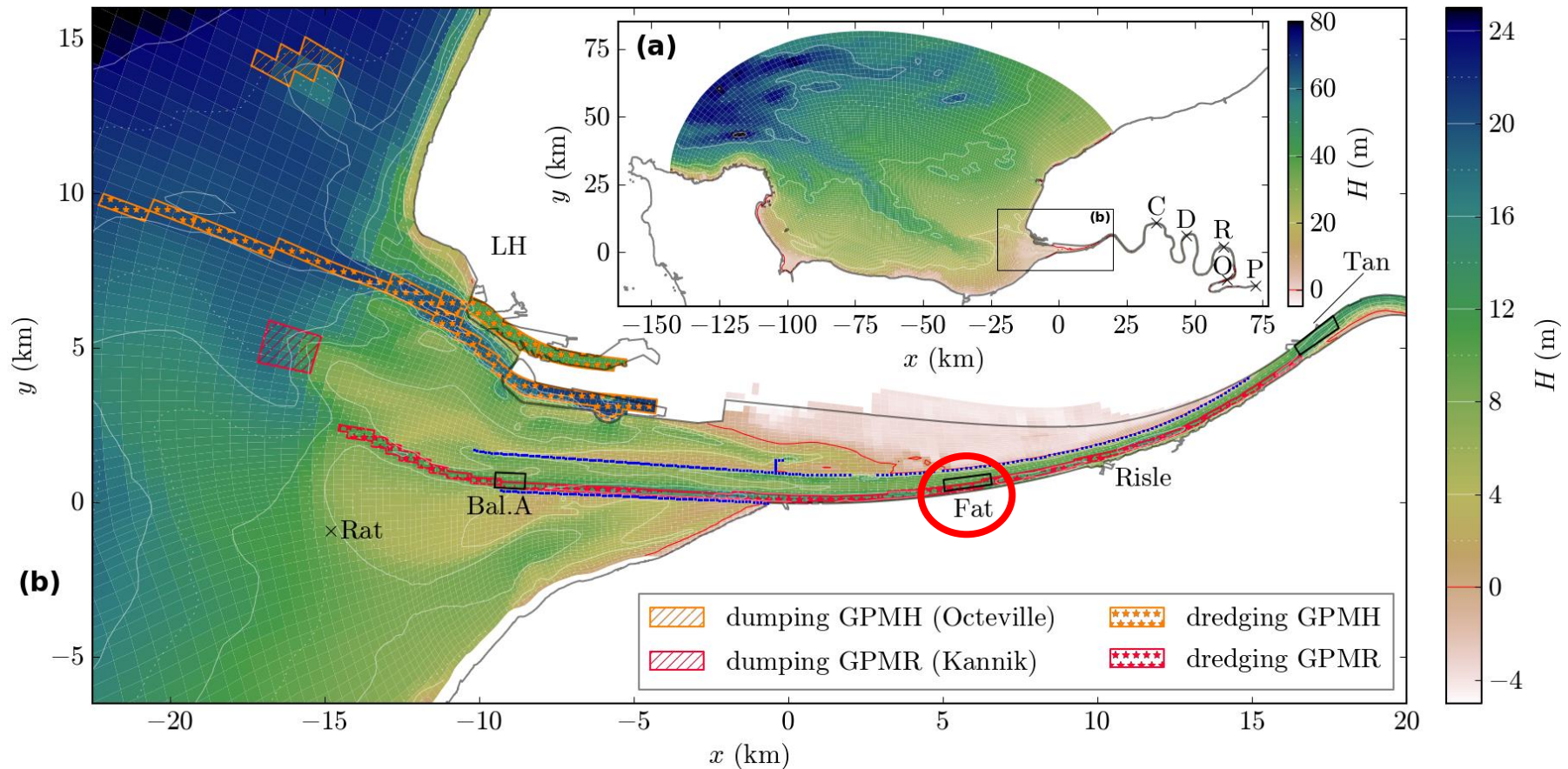
Vagues



Vagues

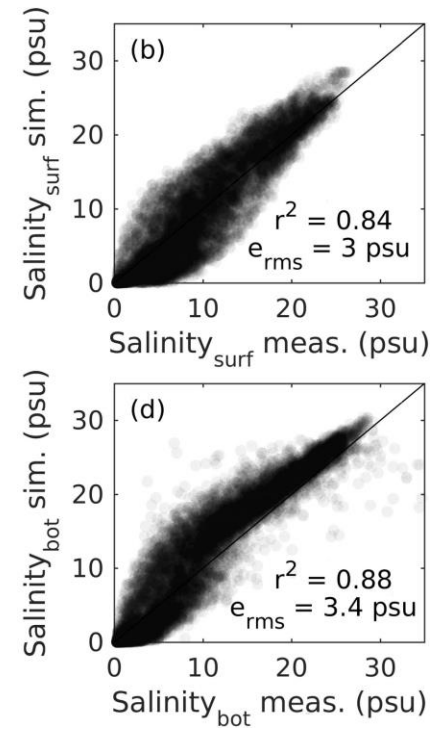
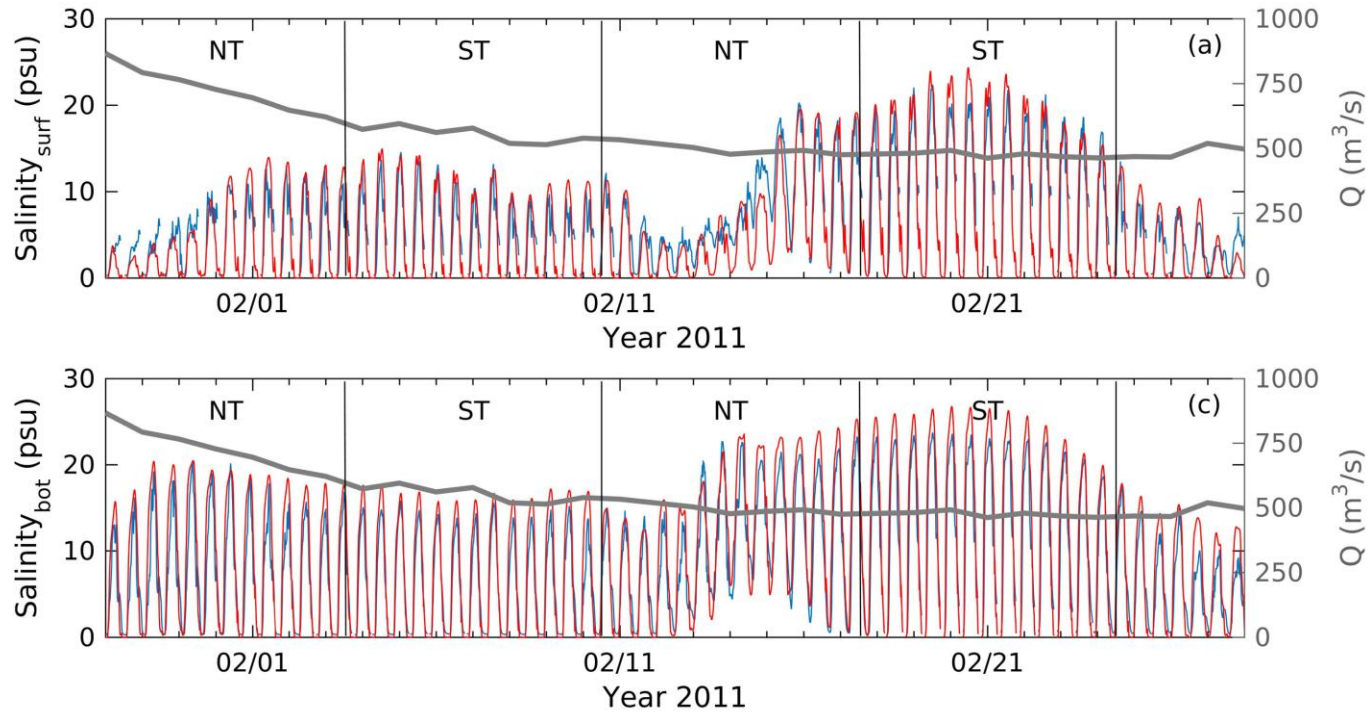


Salinité

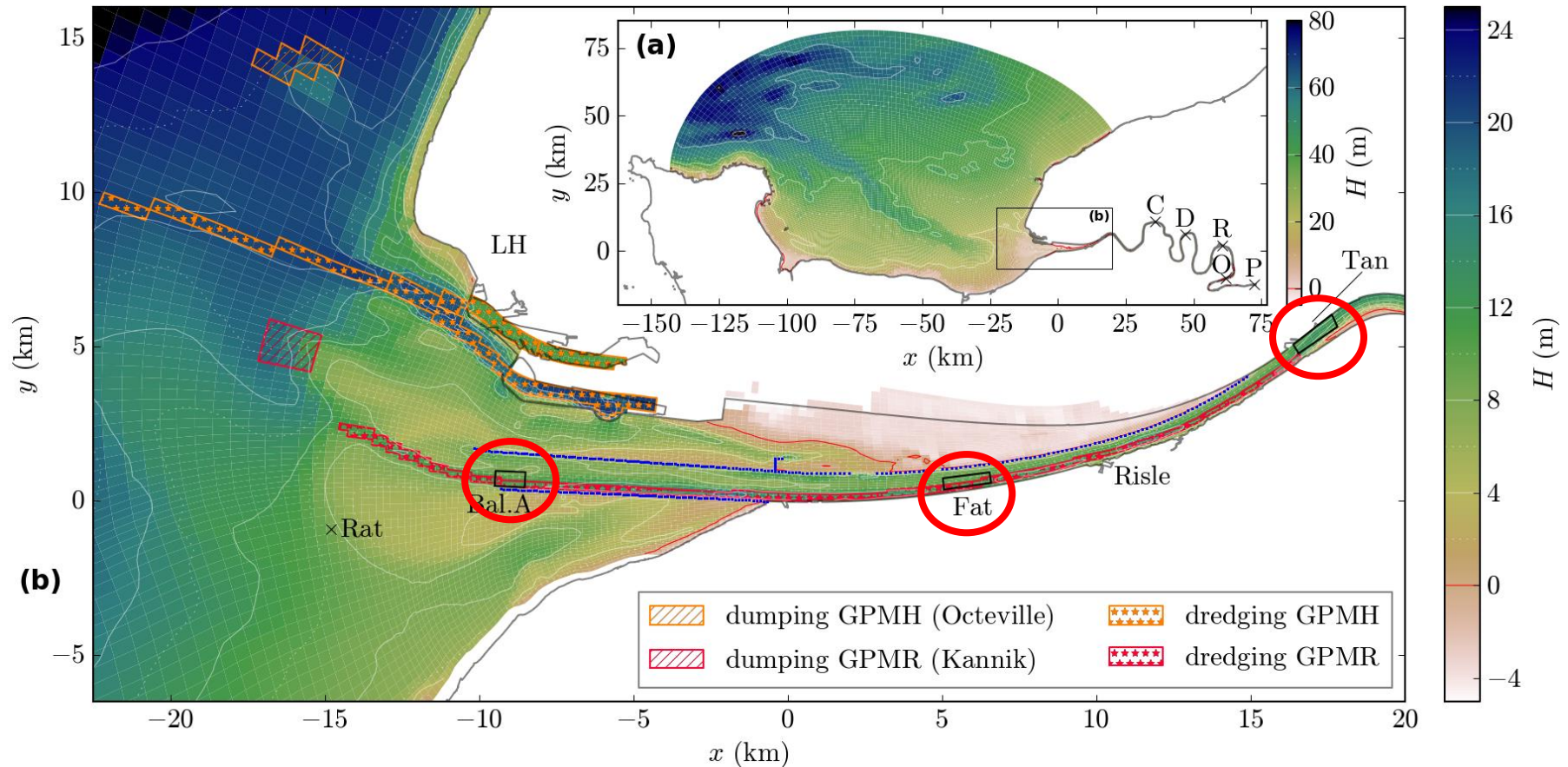


Salinité

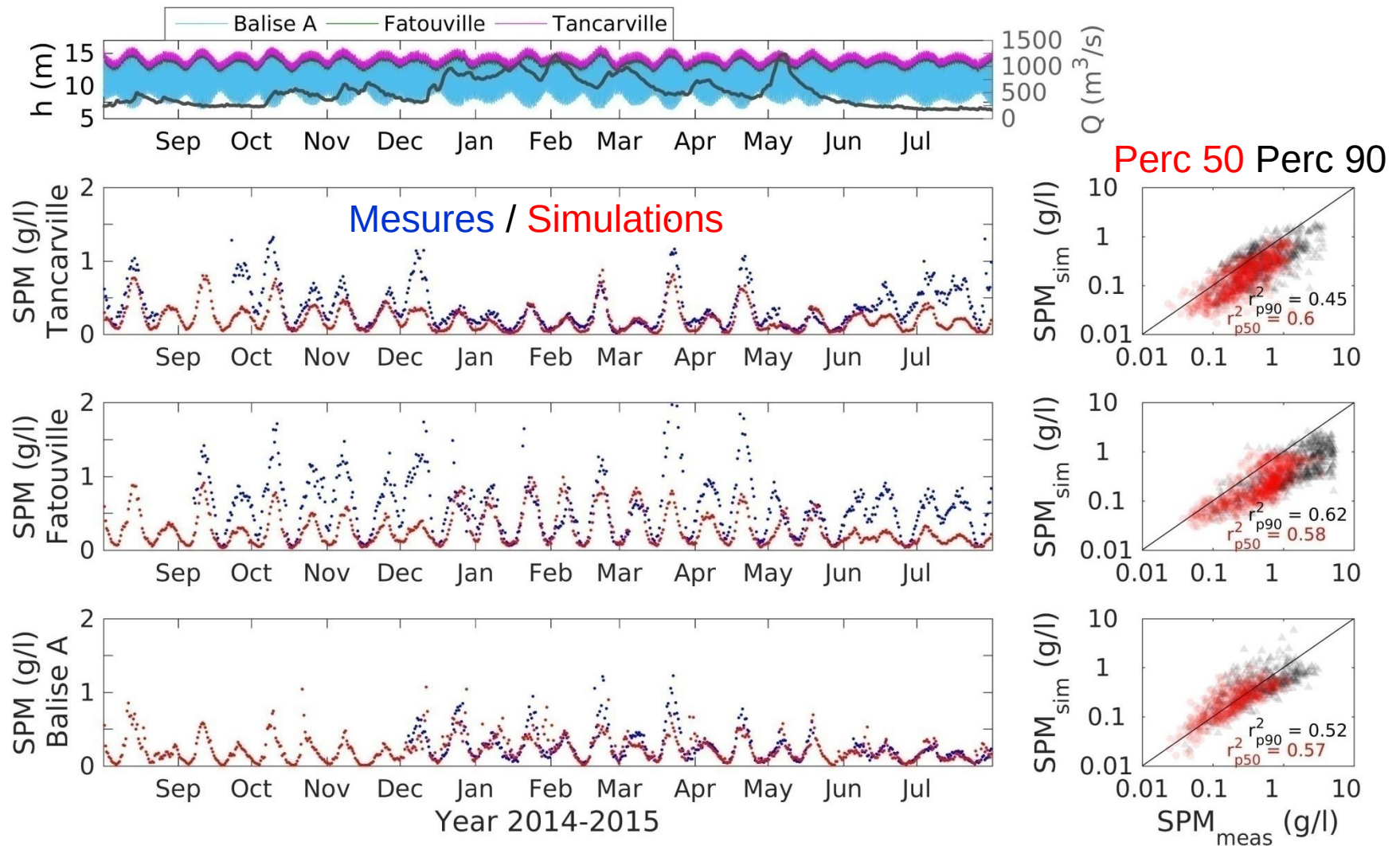
Mesures / Simulations



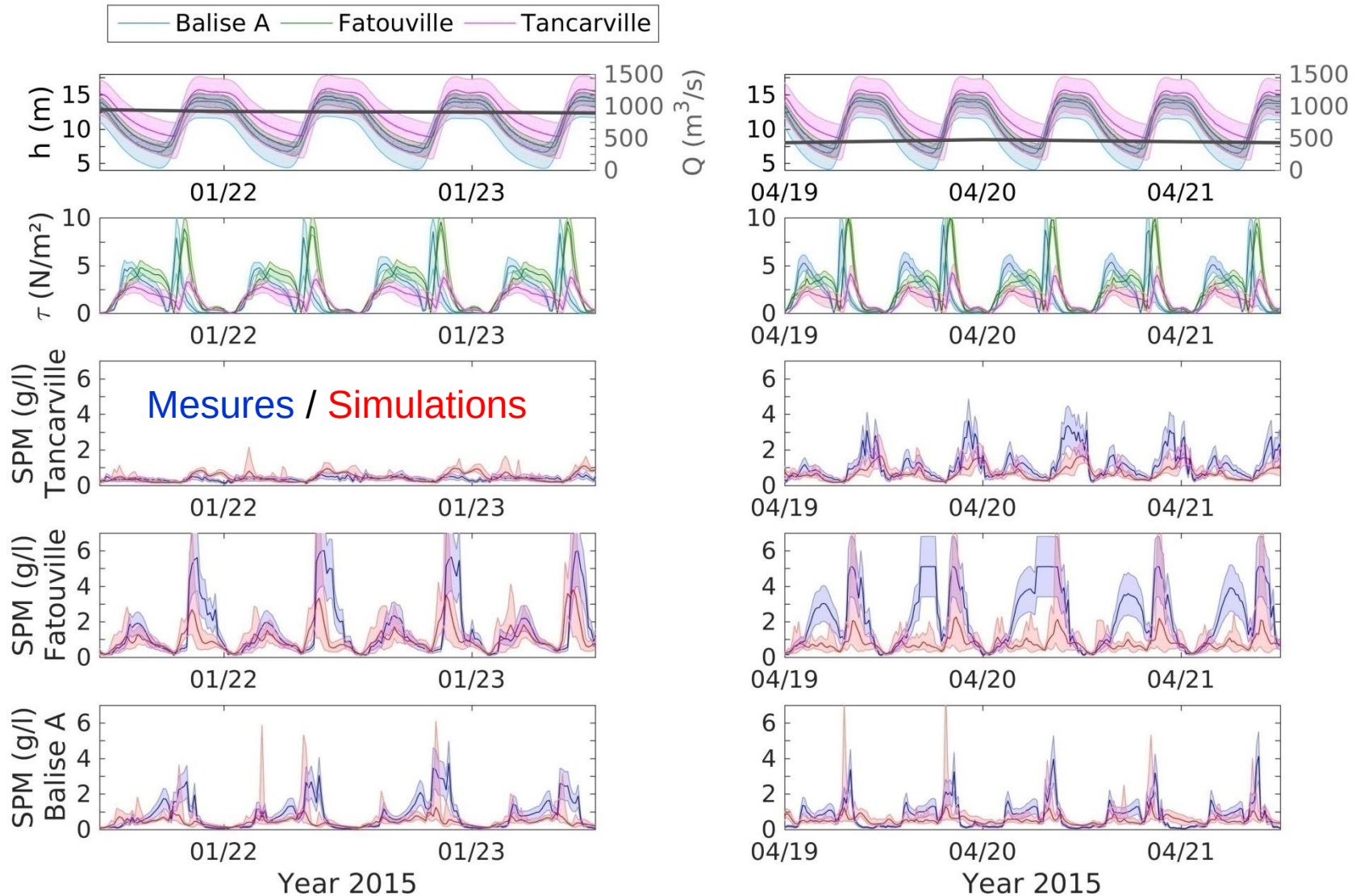
Concentration sédiment en suspension (SPM)



Concentration SPM : par cycle de marée



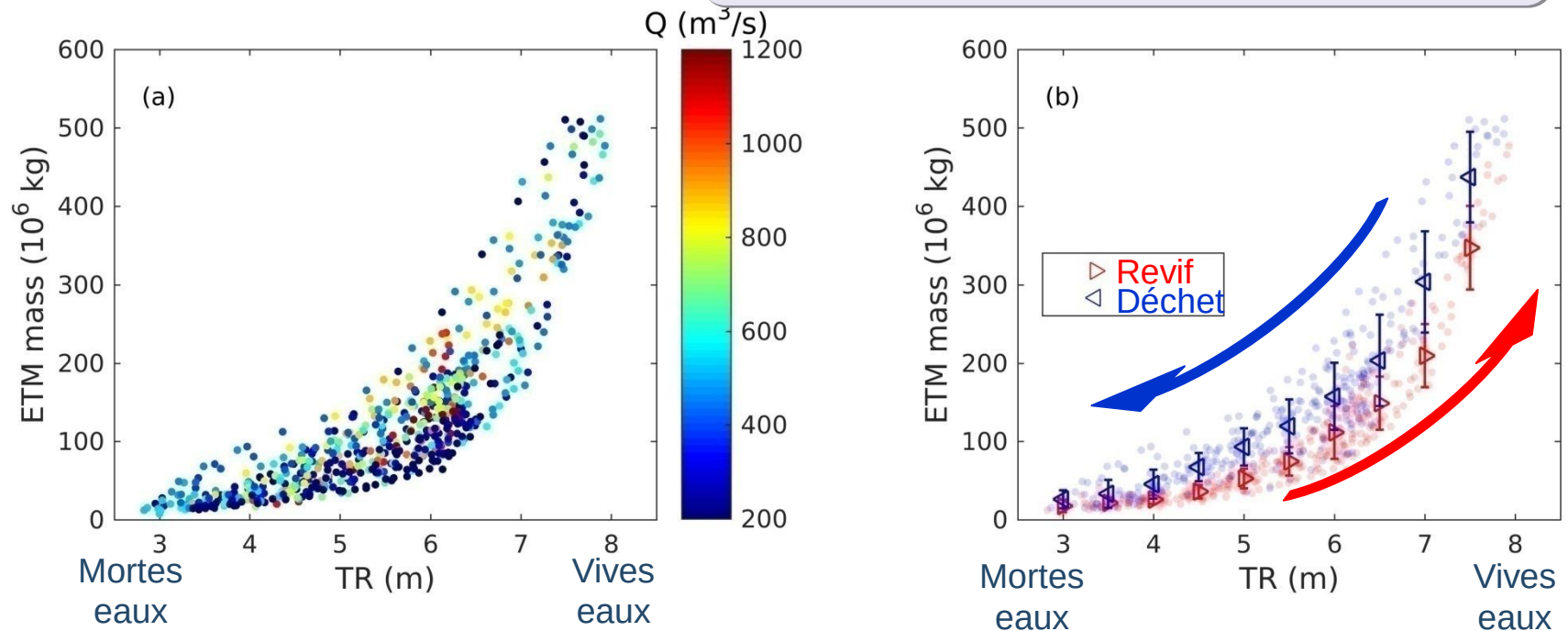
Concentration SPM : haute fréquence (15')



Masse du bouchon vaseux

Revif : augmentation du marnage (ME → VE)

Déchet : diminution du marnage (VE → ME)



- Masse du BV fortement liée au marnage (pompage tidal)
- Très peu d'influence du débit sur la masse du BV
- Hystérésis : inertie pour mettre en place le pompage tidal

Forçage hydrodynamique : contraintes sur le fond

