

## INTERACTIONS FLUVIO-TIDALES DANS L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE

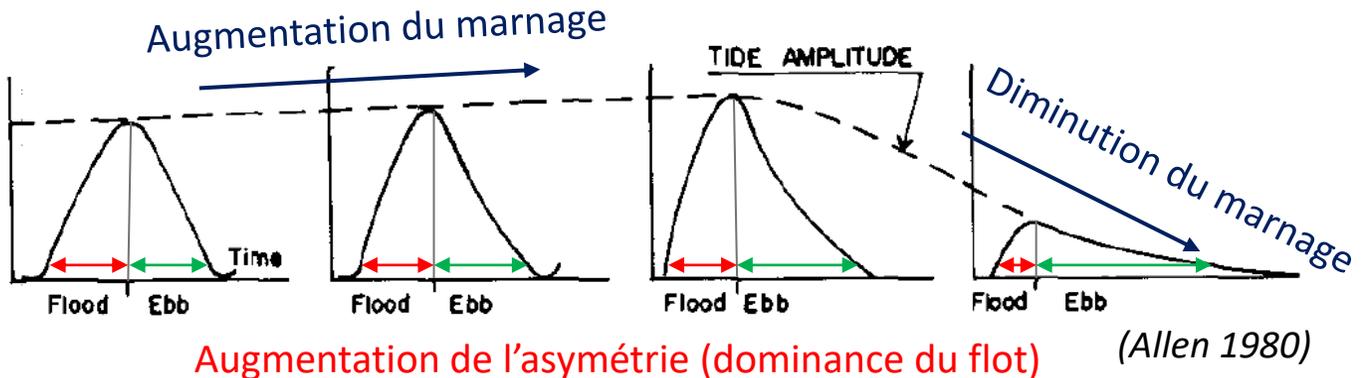


Julie Cheynel, Isabel Jalón-Rojas, Sophie Defontaine  
*Laboratoire EPOC, UMR 5805 CNRS Université de Bordeaux*

19 octobre 2022

### Contexte scientifique : Déformation de la marée en estuaire

- Nombreuses études sur propagation de la marée en estuaire (Friedrichs et Aubrey 1988, Matte 2014, Guo 2015)
- Nombreux facteurs impactant la déformation : morphologie de l'estuaire, rugosité du fond, débit fluvial
- Impacts sur le transport des sédiments encore mal compris, rétroactions



### Site d'étude : le laboratoire naturel de la Gironde / Garonne tidale

- L'un des plus grands estuaires d'Europe (635 km<sup>2</sup>)
- Débit fluvial très variable (100 - 6000 m<sup>3</sup>/s pour la Garonne)
- Estuaire macrotidal (marnage 2 - 5 m), hypersynchrone
- Bouchon vaseux très concentré : jusqu'à 10 g/L en surface

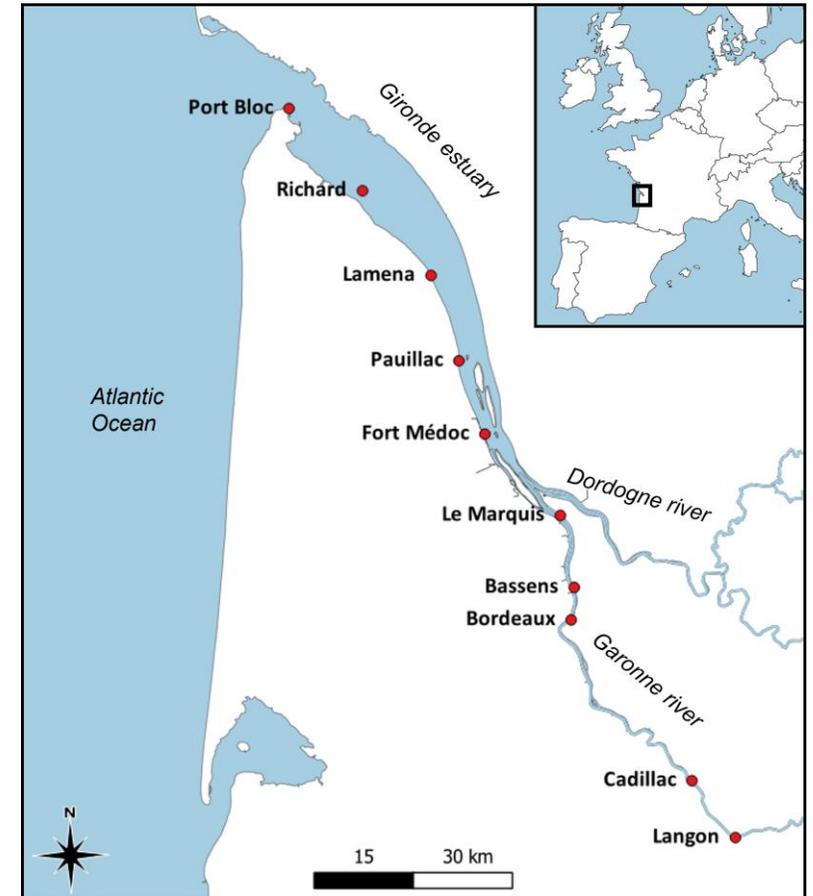


## Objectifs scientifiques

- 1) Caractériser l'évolution spatio-temporelle du marnage et de l'asymétrie dans l'estuaire
- 2) Étudier les liens déformation de la marée / morphologie de l'estuaire et hydrologie
- 3) Évaluer l'impact des changements saisonniers et interannuels : hydrologie (rugosité du fond, bouchon vaseux) et bathymétrie

## Données

- **Hauteur d'eau** : 10 marégraphes entre Port Bloc (embouchure) et Langon (140 km en amont), données entre janvier 2017 et avril 2022
- **Débit fluvial** : Données débit-métriques de Tonneins (Garonne)
- **Bathymétrie** :
  - Bathymétries du chenal réalisées par le GPMB entre 2017 et 2019, zéro hydrographique
  - Bathymétrie du projet PAPI : profondeur moyenne entre Bordeaux et La Réole, en 2015, IGN69
- **Turbidité** : Rapports et site web MAGEST (<https://magest.oasu.u-bordeaux.fr/>)



# Méthodes

1) Calcul du **marnage** :

$$\text{Facteur d'amplification} = \frac{\text{Marnage}}{\text{Marnage à l'embouchure}}$$

2) Calcul de l'**asymétrie** (Friedrichs-Aubrey 1988)

$$\eta = A_{M2} \cos(\omega t - \theta_{M2}) + A_{M4} \cos(2\omega t - \theta_{M4})$$

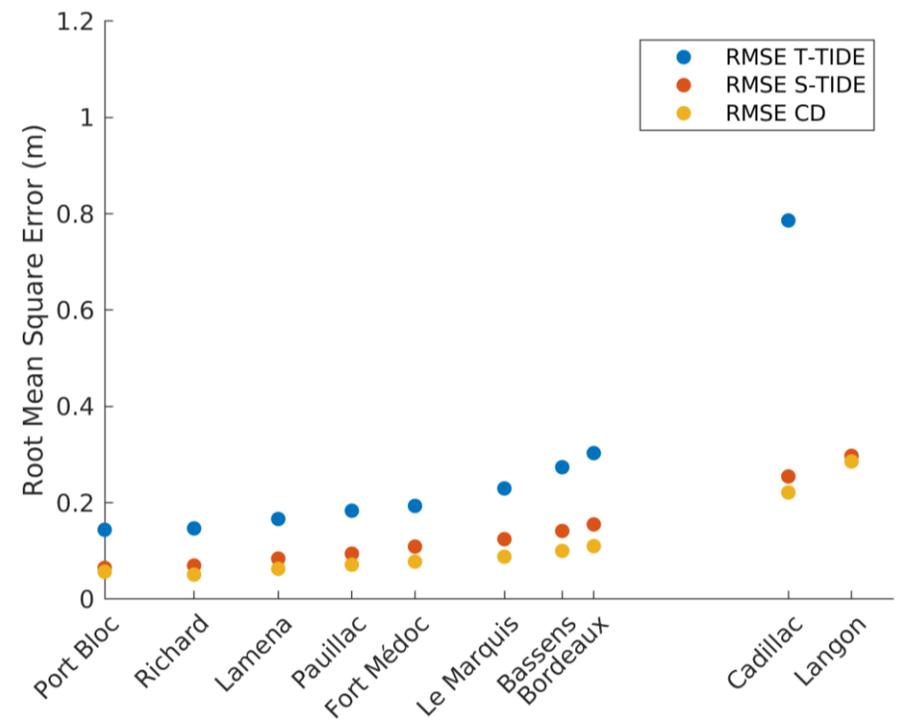
Intensité de l'asymétrie :  $\frac{A_{M4}}{A_{M2}}$

Direction de l'asymétrie :  $2\theta_{M2} - \theta_{M4}$

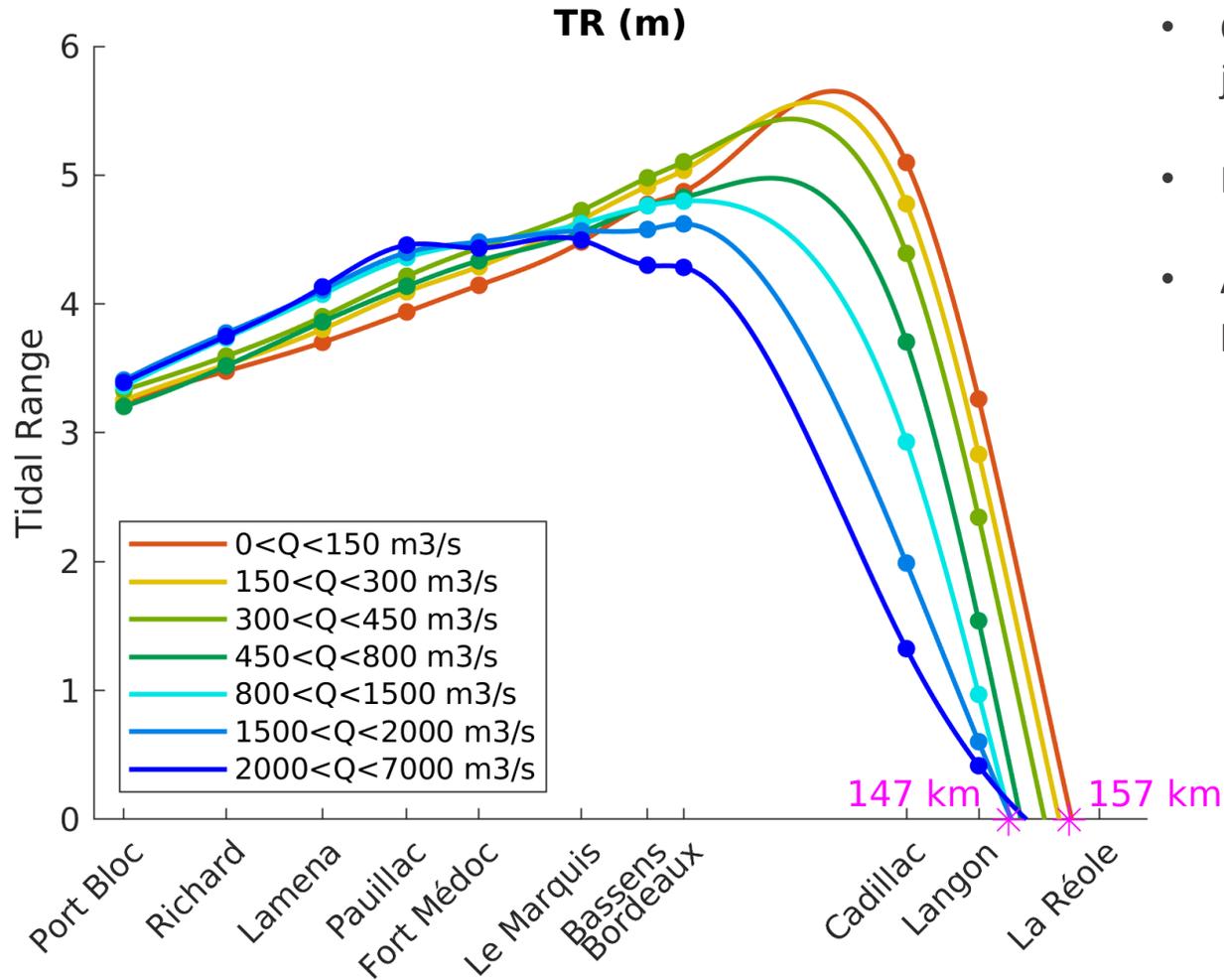
## Analyses harmoniques pour le calcul de l'asymétrie

- Analyse harmonique stationnaire T-TIDE : non adaptée en estuaires
- Analyse harmonique non stationnaire S-TIDE : résultats très dépendants du choix des paramètres
- Démodulation complexe : calcul des espèces tidales

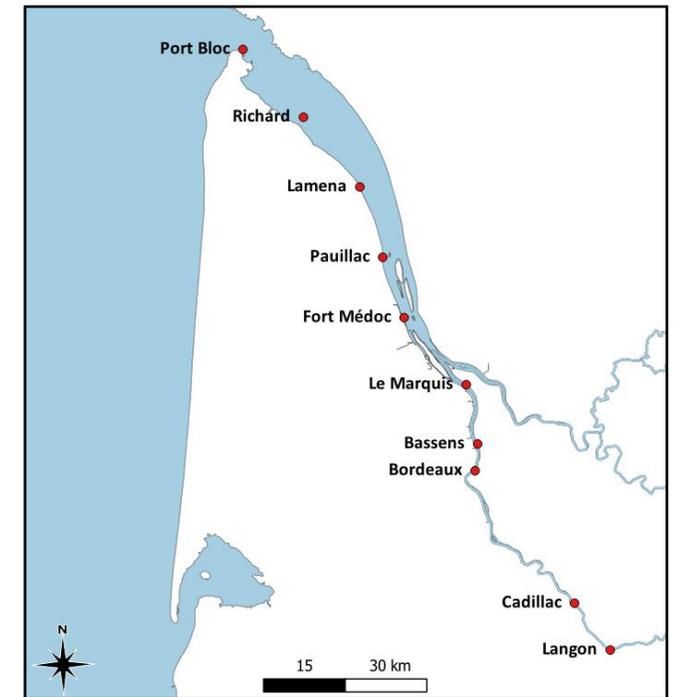
➤ Résidus légèrement plus élevés pour S-TIDE, mais moins de résultats aberrants autour des zones sans données : Choix de S-TIDE



# Évolution spatiale de la marée et influence de l'hydrologie : Marnage

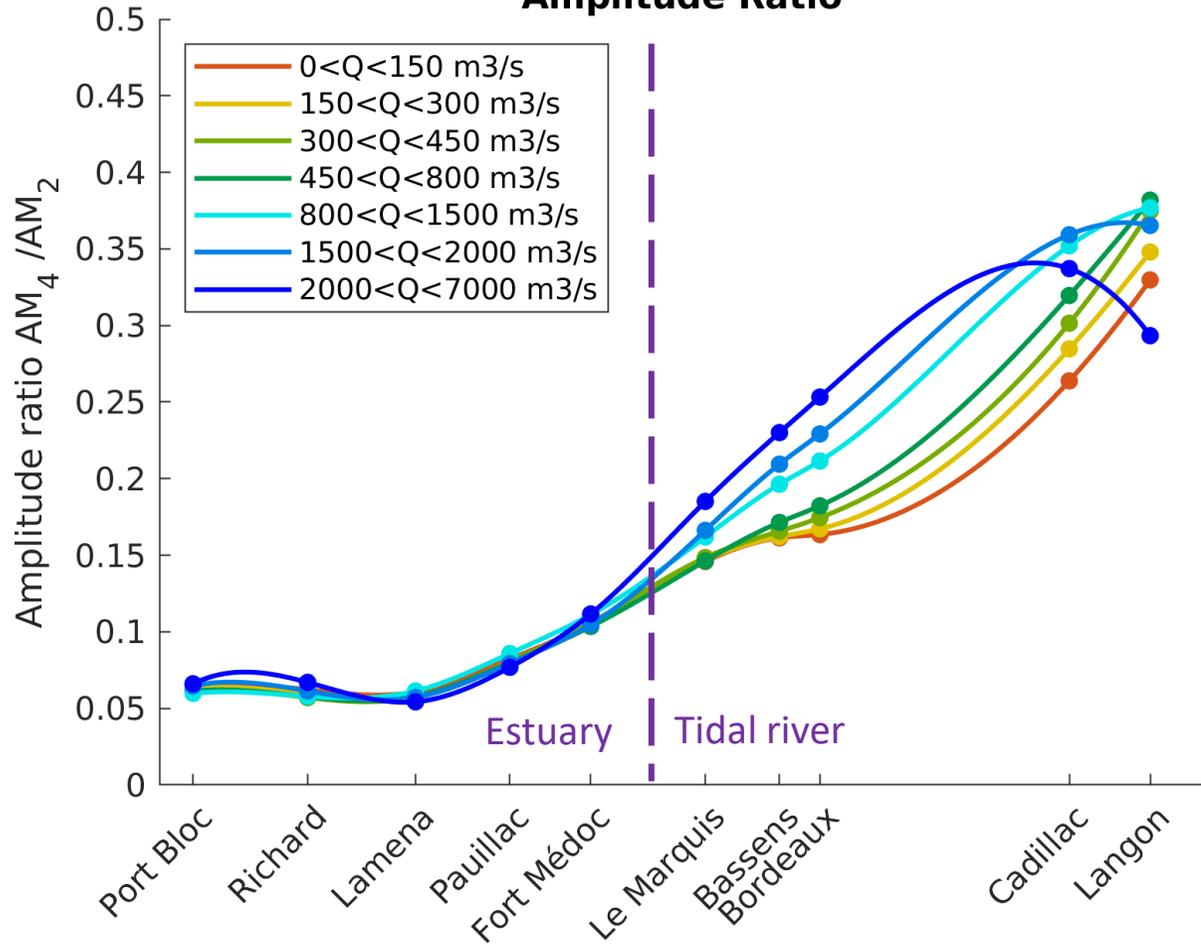


- Convergence de l'estuaire provoque une amplification de la marée jusqu'à Bordeaux en période humide, et Cadillac en période sèche
- Disparition du signal de marée entre Langon et La Réole
- Amplification maximale, région d'amortissement et limite de propagation de la marée dépendent fortement du débit fluvial



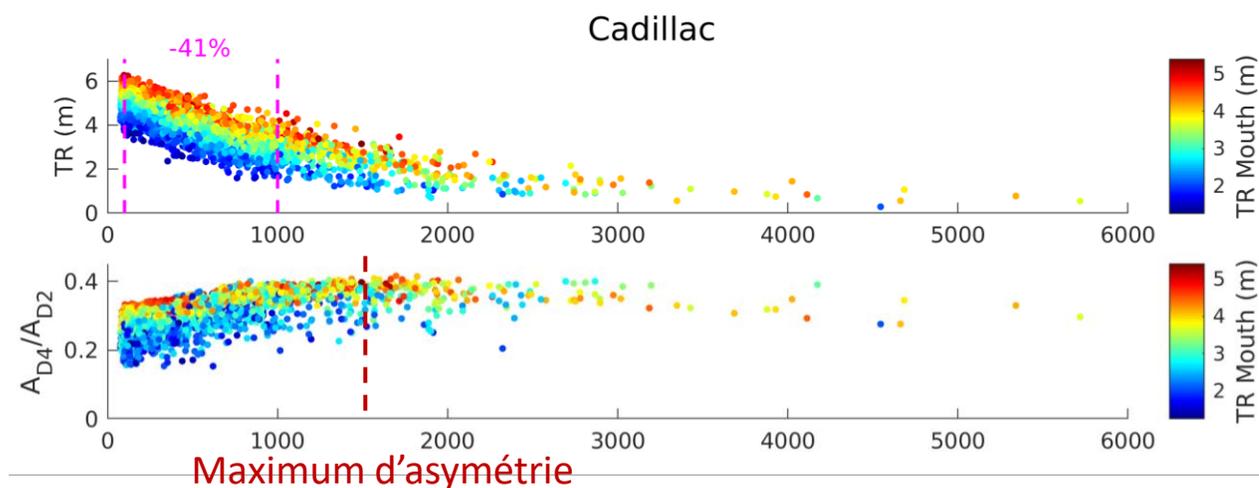
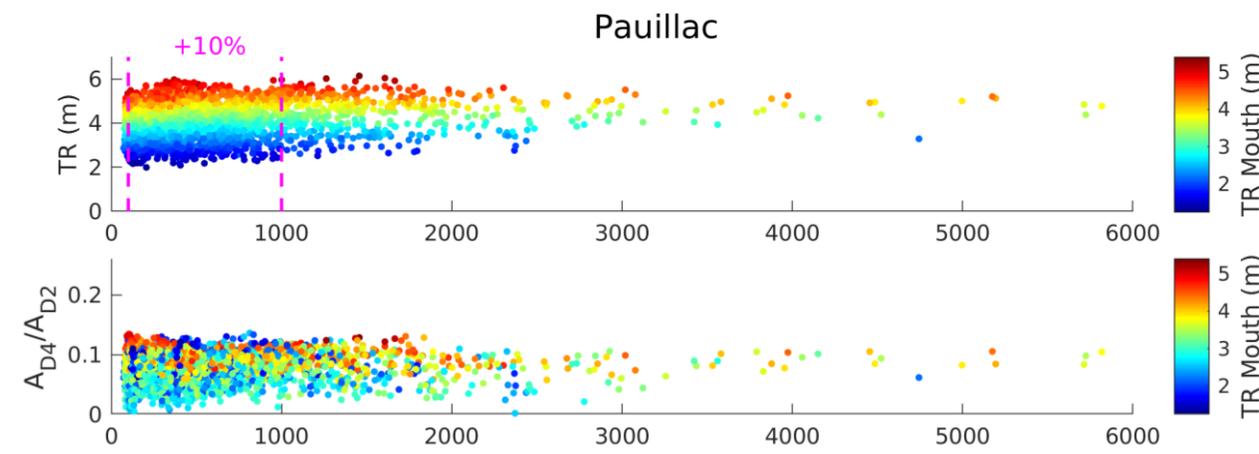
# Évolution spatiale de la marée et influence de l'hydrologie : Asymétrie verticale

### Amplitude Ratio



- Augmentation de l'asymétrie d'aval en amont à partir de Lamena.
- Point de rupture au niveau de la dépendance des caractéristiques de la marée au débit fluvial : séparation estuaire/rivière tidale
- Le débit fluvial favorise la croissance de l'asymétrie dans la rivière tidale, jusqu'à une certaine distance

# Évolution spatiale de la marée et influence de l'hydrologie : Asymétrie



## Marnage

- aval (jusqu'à Le Marquis) : augmentation du marnage avec le débit, due à l'augmentation de la hauteur d'eau
- amont : diminution du marnage avec le débit, due à la friction interne liée au débit fluvial

## Asymétrie

- aval : asymétrie très peu dépendante du débit fluvial
- Le Marquis - Bassens : augmentation systématique de l'asymétrie avec le débit
- amont : présence d'un maximum d'asymétrie pour un certain débit

# Influence des changements à long terme sur la propagation de la marée : hydrologie



Variations interannuelles de l'hydrologie :

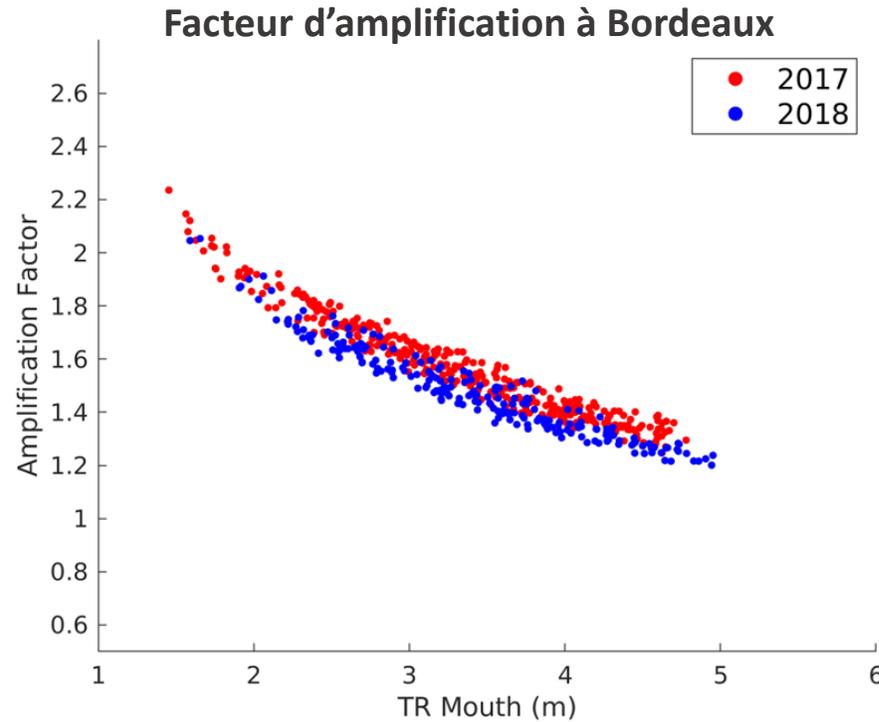
**2017 = année la plus sèche**  
(341 m<sup>3</sup>/s en moyenne)

**2018 = année la plus humide**  
(717 m<sup>3</sup>/s en moyenne)

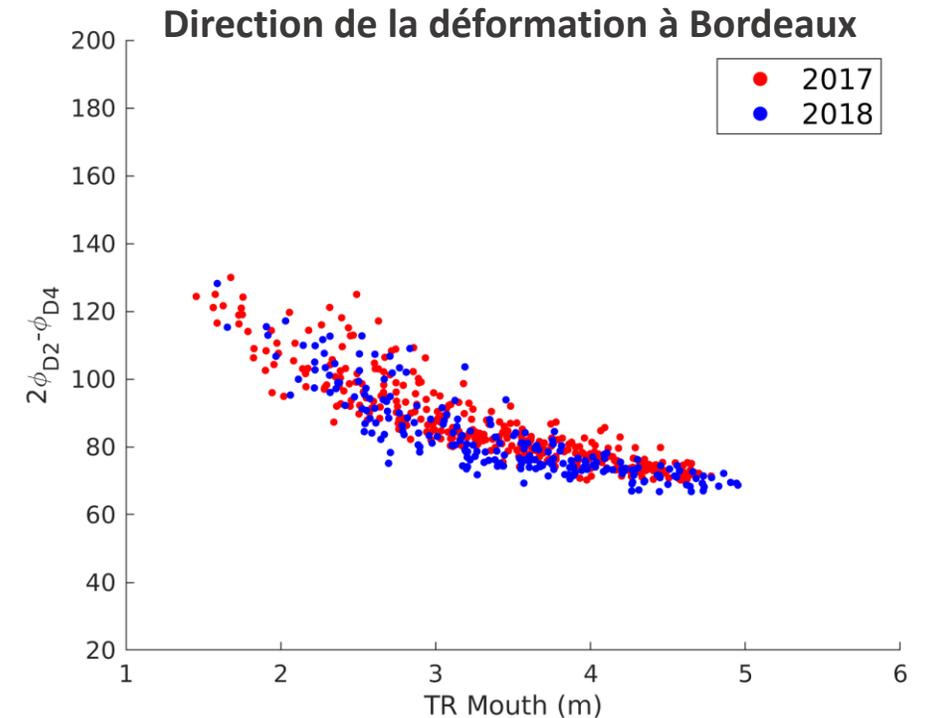
2019 = relativement sec

2020 = relativement humide

2021 = relativement sec



Hypothèse : amplification de la marée plus importante en année sèche qu'en année humide (vase présente sur le fond diminue la rugosité et donc la friction)

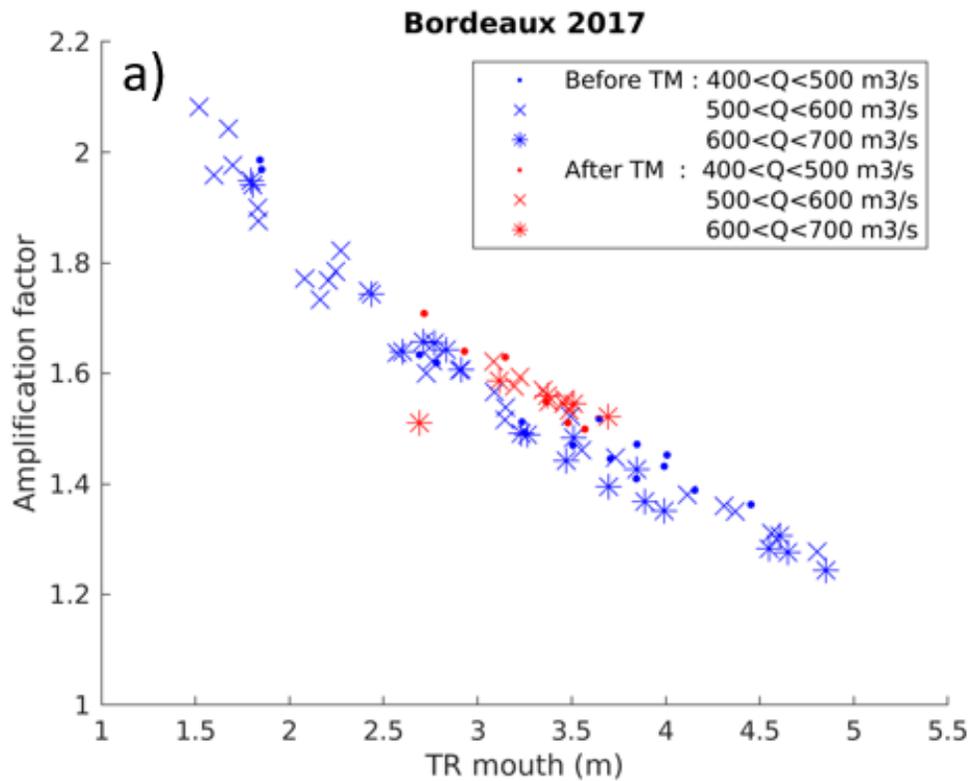


Hypothèse : asymétrie de marée peu influencée par les changements de rugosité à l'échelle inter-annuelle

# Influence des changements à long terme sur la propagation de la marée : hydrologie

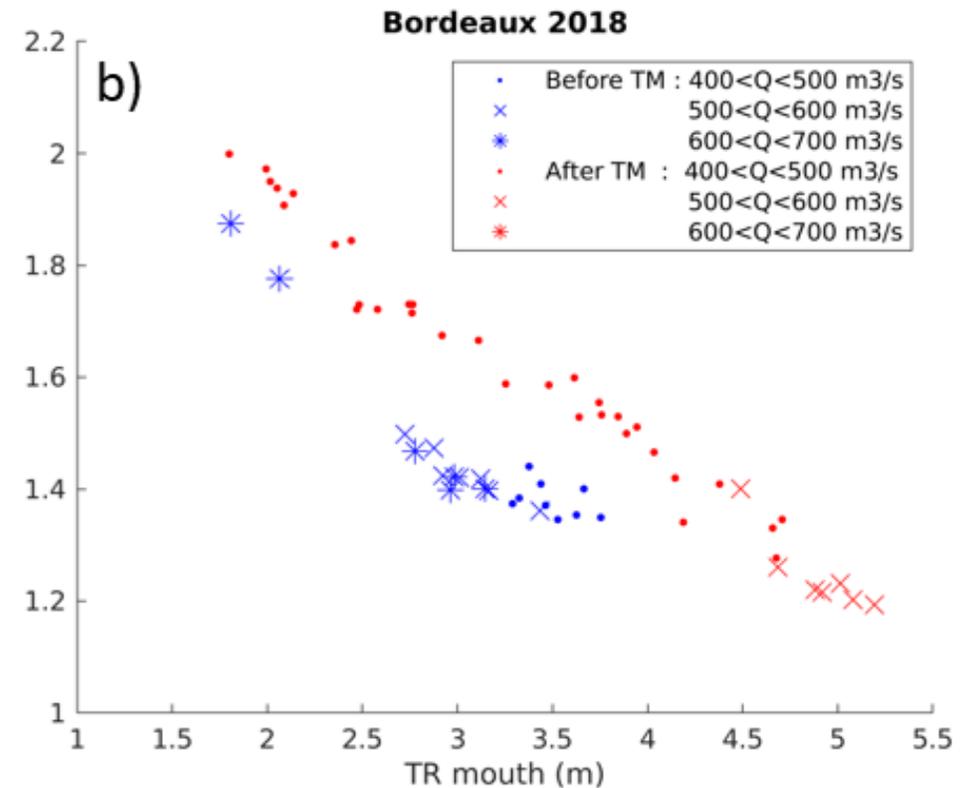


Variations saisonnières de rugosité du fond : bouchon vaseux (Concentration en mat. suspension > 1 g/L)



Peu de différence avant/après (+15 cm à Bordeaux)

Hypothèse : vase du bouchon vaseux précédent toujours présente, hiver trop sec



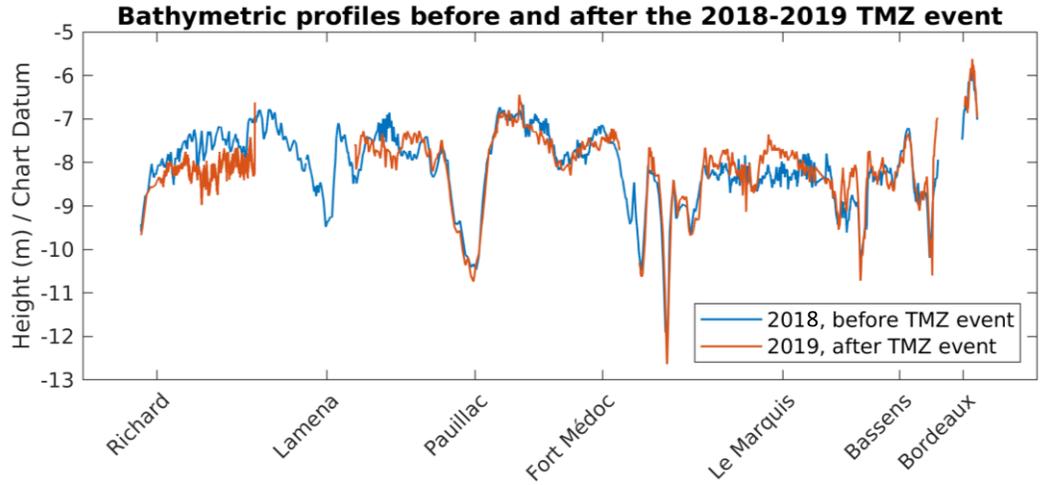
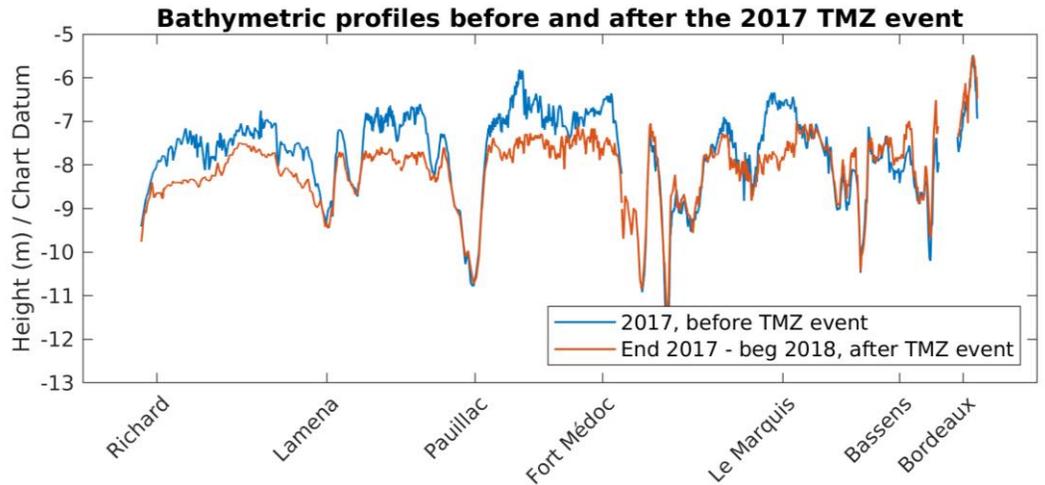
Forte différence (+70 cm à Bordeaux)

Hypothèse : vase du bouchon vaseux précédent expulsée par les fortes précipitations

# Influence des changements à long terme sur la propagation de la marée : bathymétrie



Profils bathymétriques du chenal / zéro hydrographique :



- En 2018, changements morphologiques très faibles : probablement pas responsables de la forte amplification du marnage
  - En 2017, érosion beaucoup plus importante, alors que très peu de changement au niveau de l'amplification du marnage
- L'influence de la rugosité sur l'amplification de la marée semble plus importante que celle des changements bathymétriques

## Conclusion

- S-TIDE : Gain de prédiction considérable par rapport à l'analyse harmonique conventionnelle
- Mise en évidence de phénomènes caractéristiques du marnage et de l'asymétrie dans la Gironde :
  - Amplification maximale de la marée entre Bordeaux et Cadillac (selon débit fluvial)
  - Amortissement de la marée entre Langon et La Réole
  - Maximum d'asymétrie en fonction du débit dans les stations amont : 4800 m<sup>3</sup>/s à Bordeaux, 1500 à Cadillac et 1000 à Langon
- Impact des changements à long terme :
  - Marnage très sensible aux variations de rugosité dans la région du bouchon vaseux (jusqu'à 70 cm à Bordeaux)
  - Influence de la rugosité prédominante devant celle des changements bathymétriques

## Références :

Allen, G., Salomon, J., Bassoullet, P., Du Penhoat, Y. & de Grandpré, C. (1980). Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries. *Sedimentary Geology*, 26 (1), 69-90. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0037-0738\(80\)90006-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0037-0738(80)90006-8)

Friedrichs, C. T. & Aubrey, D. G. (1988). Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries : a synthesis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 27 (5), 521-545. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0272-7714\(88\)90082-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0272-7714(88)90082-0)

Guo, L., van der Wegen, M., Jay, D. A., Matte, P., Wang, Z. B., Roelvink, D. & He, Q. (2015). River-tide dynamics : Exploration of nonstationary and nonlinear tidal behavior in the Yangtze River estuary. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 120 (5), 3499-3521. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2014JC010491>

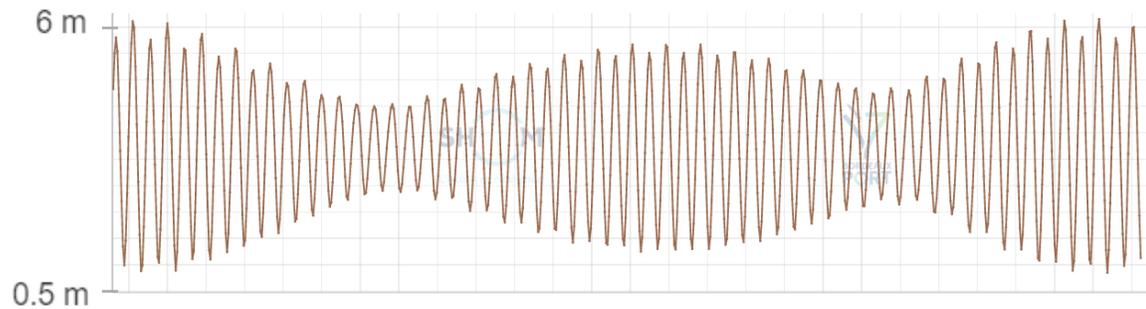
Jalón-Rojas, I., Sottolichio, A., Hanquiez, V., Fort, A. & Schmidt, S. (2018). To What Extent Multidecadal Changes in Morphology and Fluvial Discharge Impact Tide in a Convergent (Turbid) Tidal River. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 123 (5), 3241-3258. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2017JC013466>

MAGEST. (2022). Réseau MAGEST, surveillance de la qualité de l'eau de l'estuaire de la Gironde, <https://magest.oasu.u-bordeaux.fr/>

Matte, P., Secretan, Y. & Morin, J. (2014). Temporal and spatial variability of tidalfluvial dynamics in the St. Lawrence fluvial estuary : An application of nonstationary tidal harmonic analysis. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 119 (9), 5724-5744. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2014JC009791>

## Déformation de la marée en estuaire

Hauteur d'eau près des côtes :



$$h(t) = h_0 + \sum_i f_i(t) h_i \cos(q_i t + \varphi_i + u_i(t)) \quad \text{Darwin (1883)}$$

$h_0$  = niveau moyen

$t$  = temps civil du lieu

$h_i, q_i, \varphi_i$  = amplitude, vitesse angulaire et phase en

$t = 0$  de la composante  $i$

$f_i(t)$  et  $u_i(t)$  = facteurs nodaux

Phénomènes non linéaires en estuaire :

- Convergence
- Présence de zones intertidales
- Propagation en eaux peu profondes :  $c = \sqrt{gh}$
- Friction du fond :  $\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{KU|U|}{H+\eta}$  *Godin (1991)*
- Débit fluvial

friction

$U$  = moyenne verticale du courant  $u$

$t$  et  $x$  = temps et direction de propagation

$B$  et  $H$  = largeur et profondeur de l'estuaire

$\eta$  = surface libre

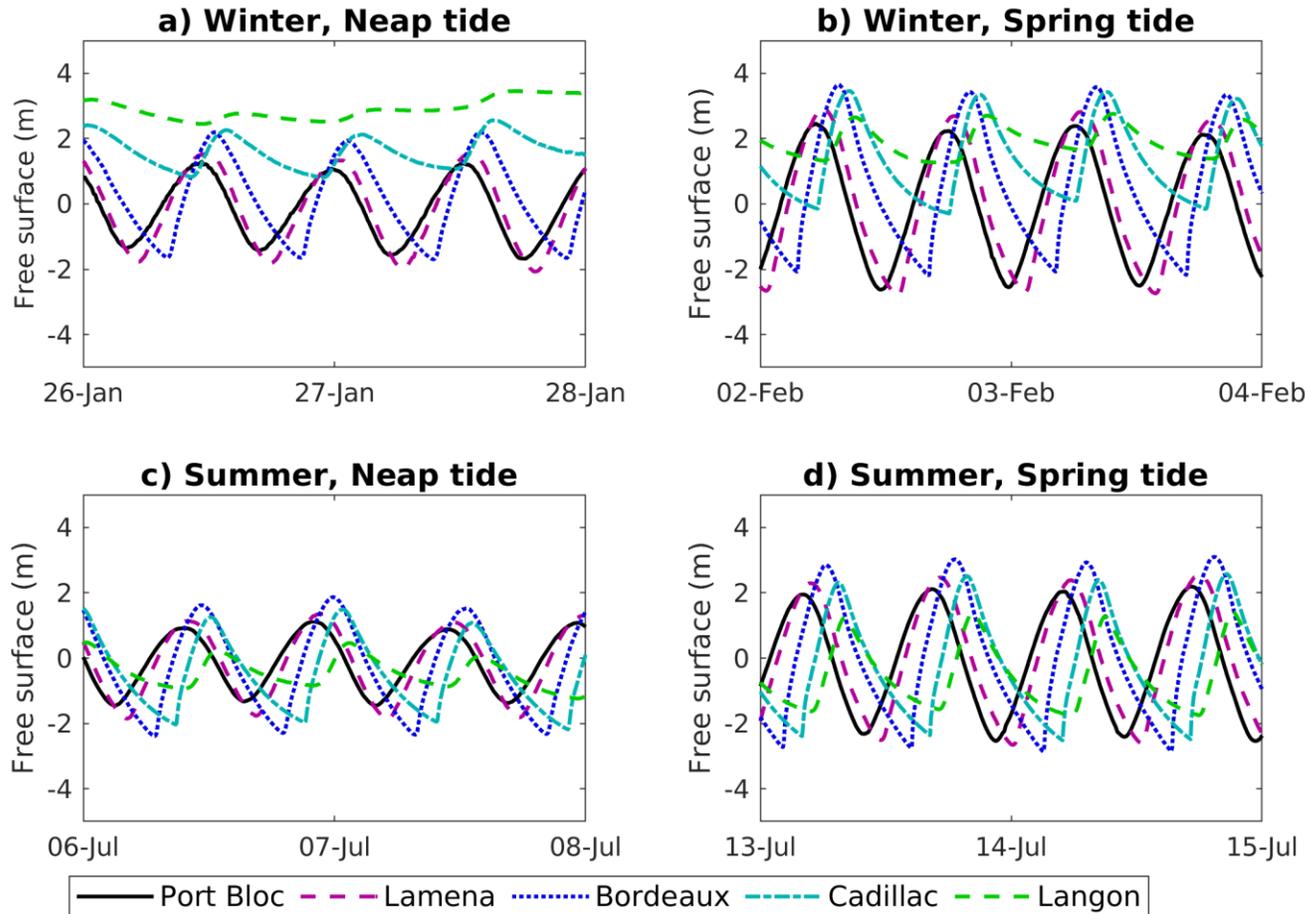
$K$  = coefficient de frottement

**Déformation de la marée :**

- Amplification ou atténuation
- Asymétrie, dominance du flot ou du jusant

➤ La déformation de la marée se traduit de façon harmonique

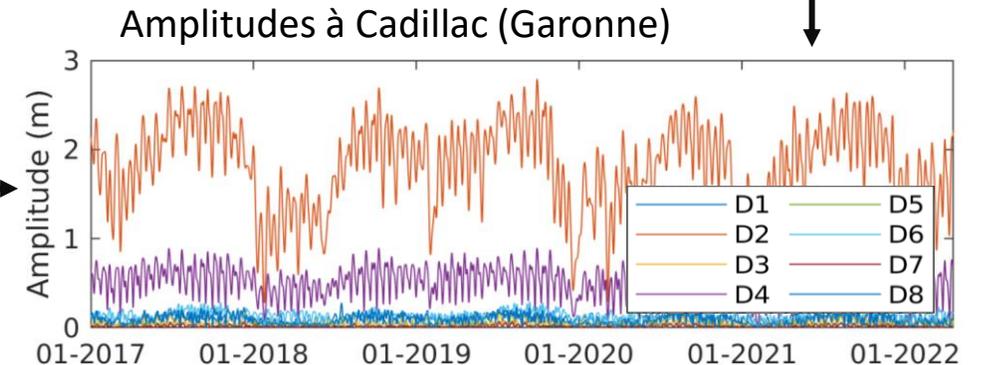
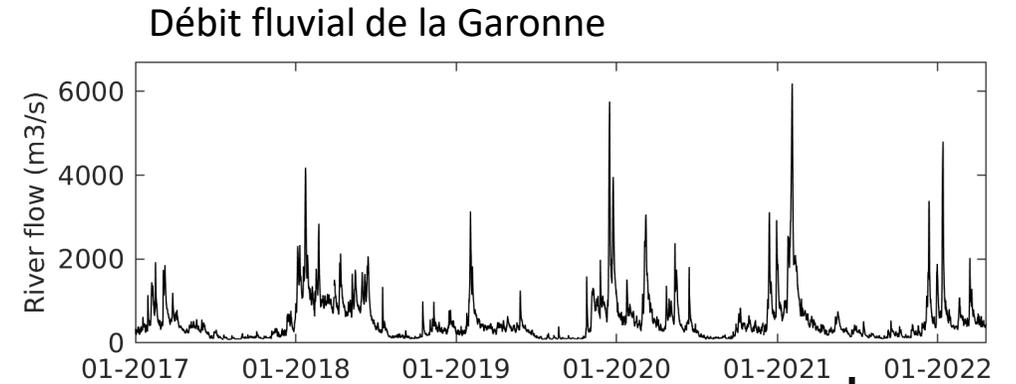
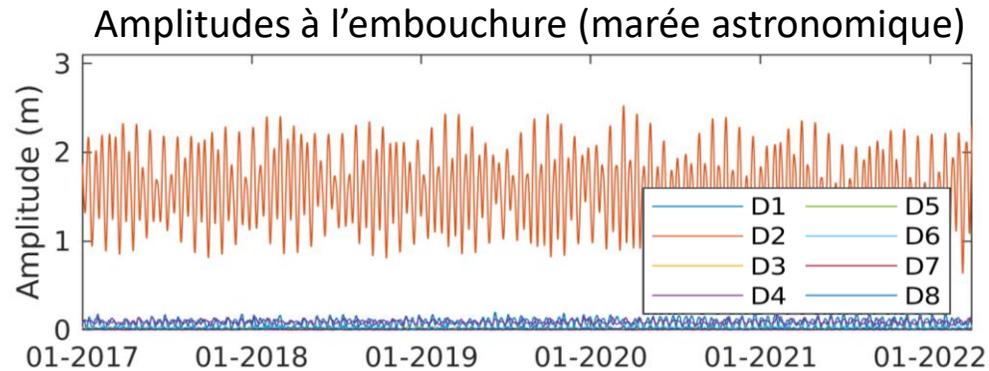
## Données brutes de hauteur d'eau



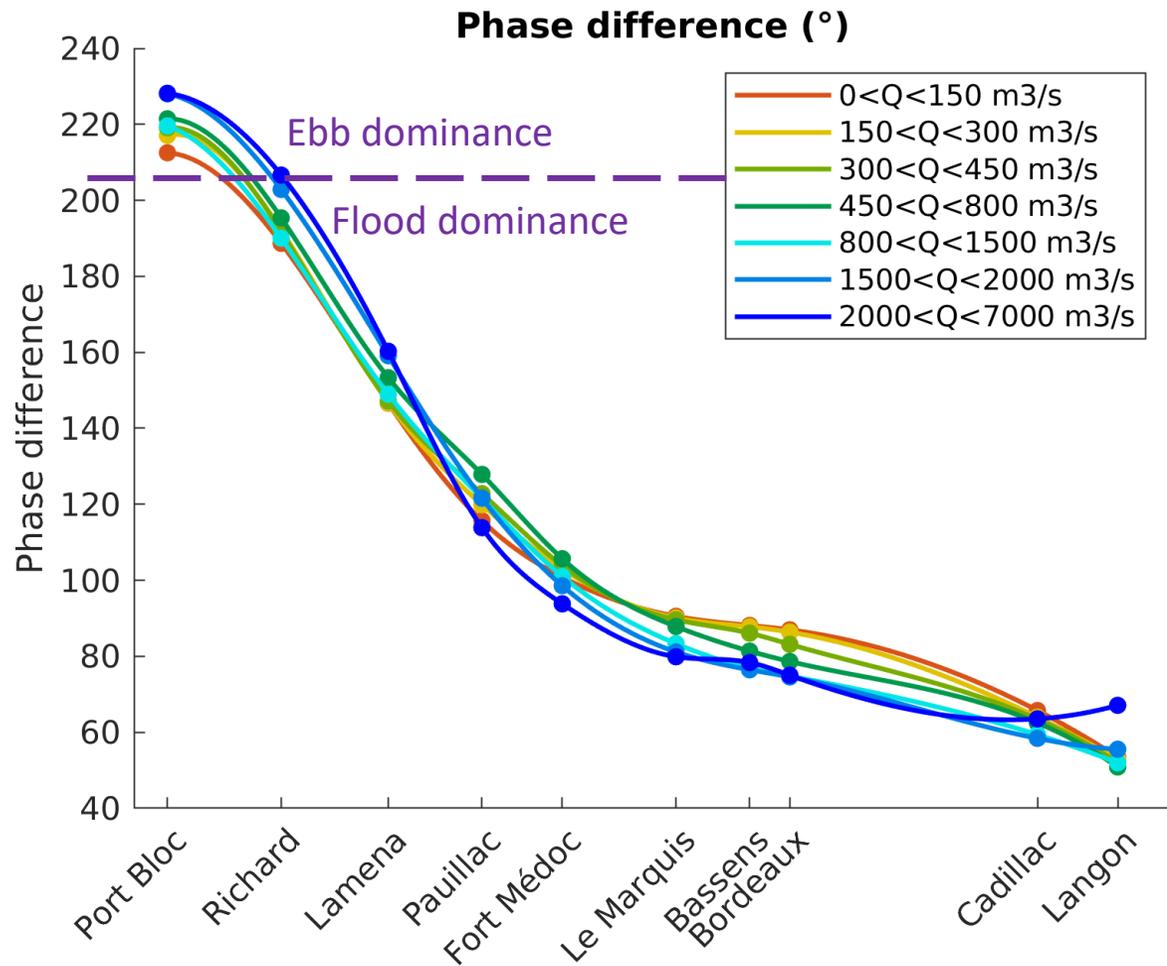
- Allongement du jusant et raccourcissement du flot lors de la progression vers l'amont
- Amplification puis amortissement de la marée dans l'estuaire
- En hiver en amont du fleuve : Amortissement de la marée par le débit fluvial et hausse de la hauteur d'eau moyenne

## Résultats de S-TIDE

- Transfert d'énergie de  $M_2$  vers  $M_4$  et les autres harmoniques des composantes astronomiques sous l'effet des phénomènes non linéaires (friction du fond, débit fluvial...)
- Forte atténuation de  $M_2$  avec le débit fluvial dans l'estuaire amont

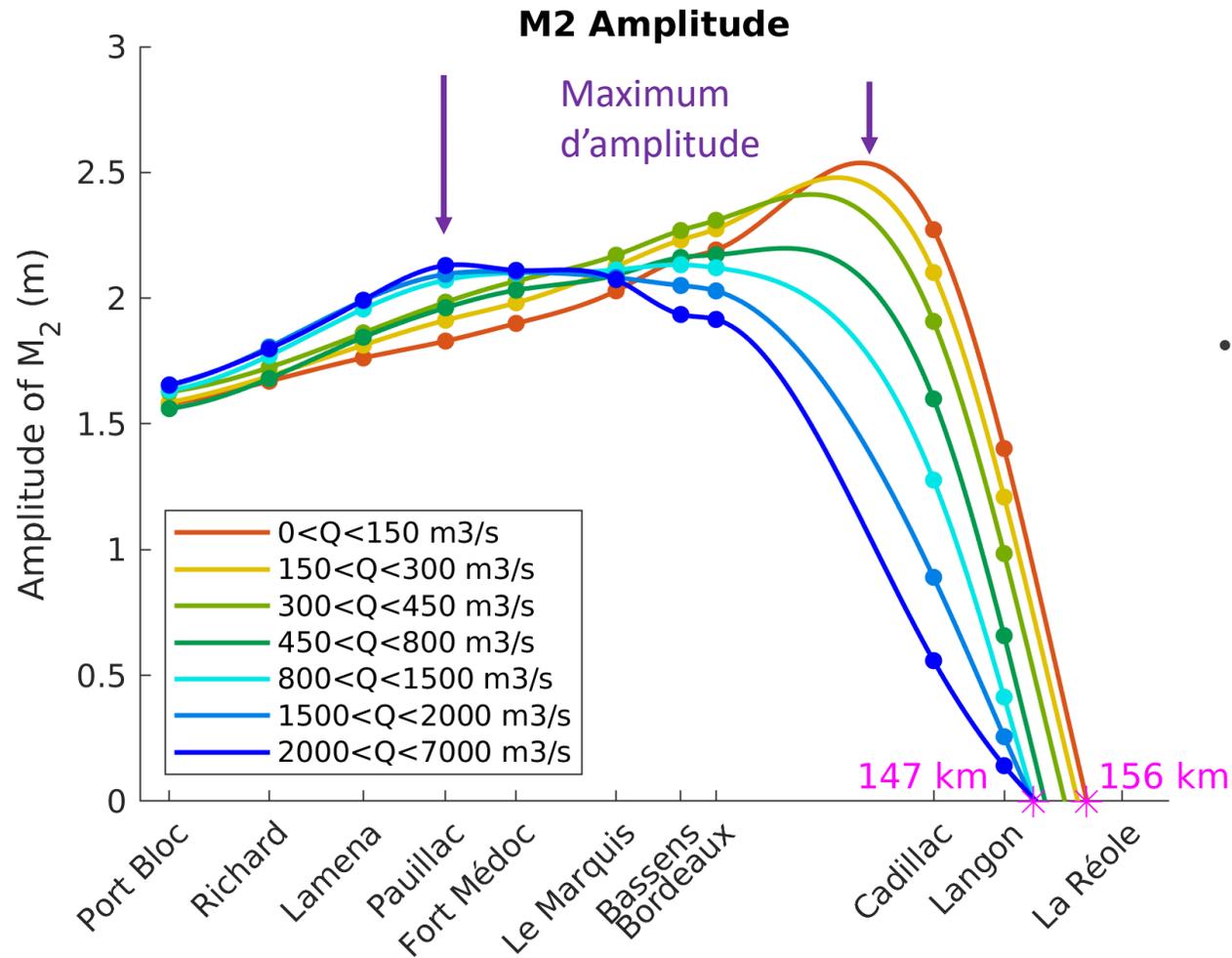


## Evolution spatiale de la marée et influence de l'hydrologie : Asymétrie verticale



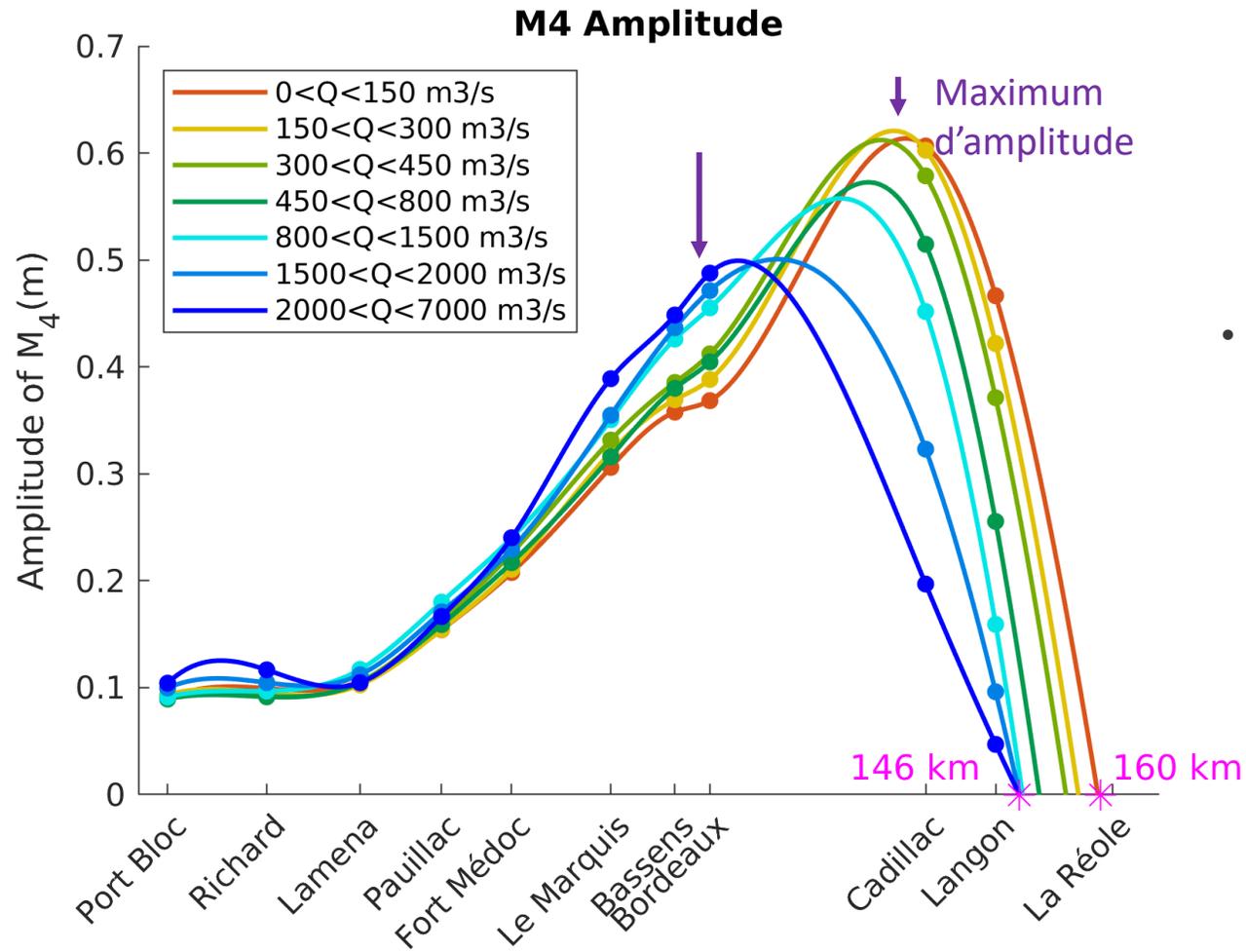
- Direction de l'asymétrie peu affectée par le débit fluvial
- Diminution de la phase relative d'aval en amont : passage dominance du jusant → dominance du flot

## Evolution spatiale de la marée et influence de l'hydrologie : Asymétrie verticale



- Croissance linéaire de  $M_2$  jusqu'à un maximum (compétition convergence/friction), puis décroissance linéaire très dépendante du débit fluvial

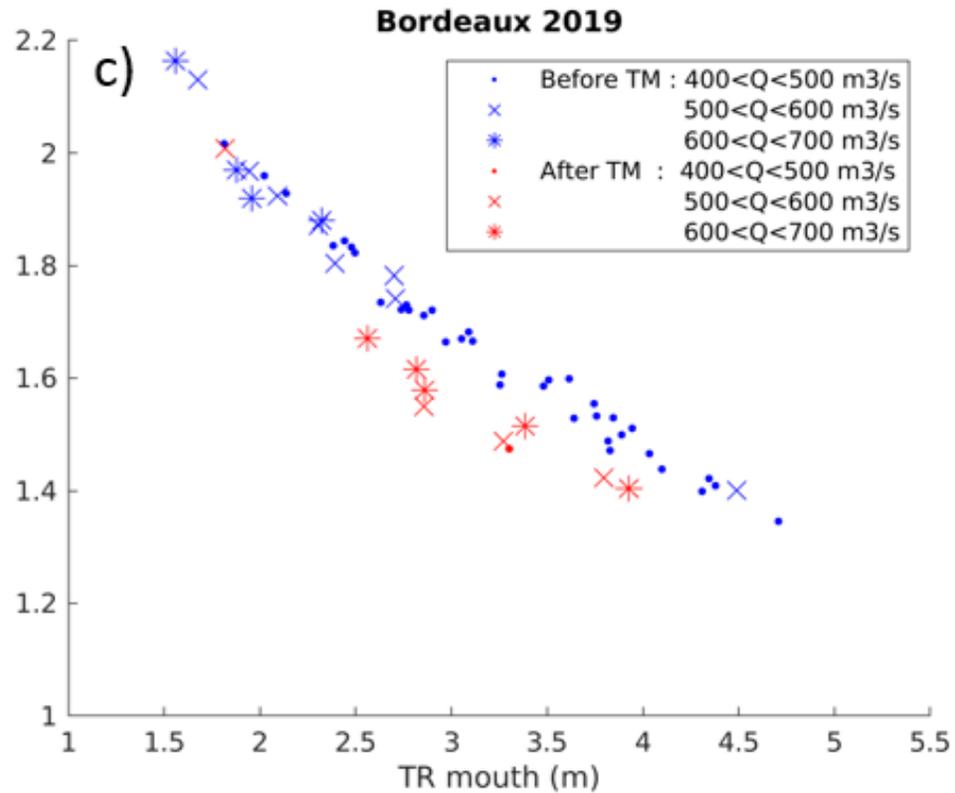
## Evolution spatiale de la marée et influence de l'hydrologie : Asymétrie verticale



- Croissance de  $M_4$  à partir de Lamena, jusqu' à un maximum (compétition génération/friction), puis décroissance linéaire très dépendante du débit fluvial

## Influence des changements à long terme sur la propagation de la marée : hydrologie

Variations saisonnières de rugosité du fond : bouchon vaseux (Concentration en mat. suspension &gt; 1 g/L)



Diminution de l'amplification après le bouchon vaseux de 2019

Hypothèse : conditions de débit fluvial particulières

