

Modélisation de l'impact de l'évolution morphologique de l'estuaire de la Seine sur l'aléa inondation dans un contexte de dérèglement climatique

V. Laborie⁽²⁾, M. G. Olivier⁽¹⁾, A. Parvin Ashtiani⁽²⁾,
E. L'Ebrelllec⁽¹⁾, P. Chassé⁽³⁾, N. Huybrechts⁽²⁾

(1) GIP Seine-Aval

(2) Cerema Risques Eaux et Mer / DREL - Équipe de recherche RHITME (CEREMA – laboratoire M2C (CNRS/UNICAEN/UCN)

(3) Cerema Risques, Eaux et Mer / DREL – Groupe Eau et Risques

Plan

Introduction

- Le projet ATLANTIS

CRONSTIBATH (*Construction de scénarios d'évolution théorique des bathymétries de l'estuaire de la Seine*)

- Définition de scénarios d'évolution bathymétriques 2100
- Méthodologie
- Critères de validation
- Scénarios bathymétriques 2100

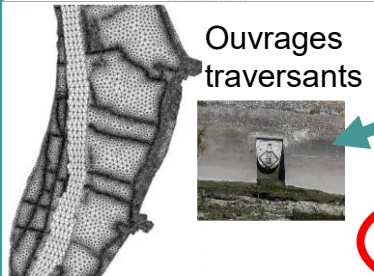
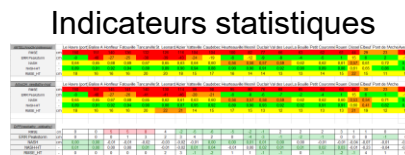
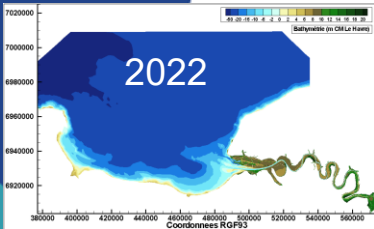
ATLANTIS : premiers résultats de l'impact de l'évolution bathymétrique de l'embouchure

- Présentation du modèle numérique ATLANTIS2025 / critères de performance / résultats du lot 1
- Impact sur les niveaux d'eau maxima en lit mineur le long de l'estuaire
- Impact sur les volumes débordants

Conclusion et perspectives



SA7-ATLANTIS

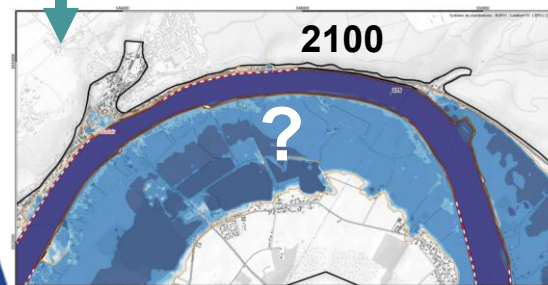
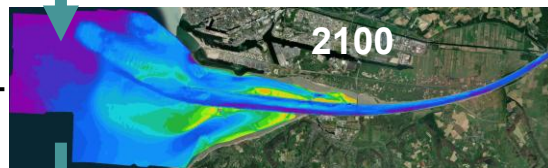
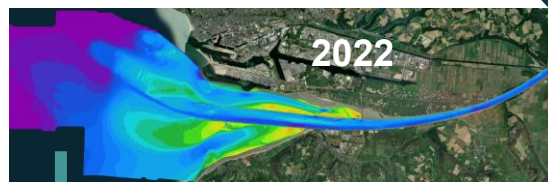


Mise à jour du modèle
TELEMAC 2D

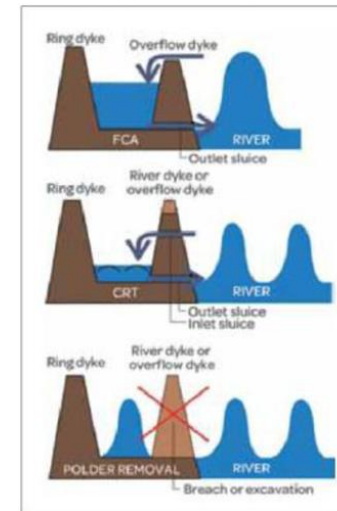
Scénarios d'évolution
bathymétriques futurs

Modélisation hydrodynamique de
l'aléa inondation :
1. actuel
2. futur
3. avec ZEEE

SA7-CRONSTIBATH



Impact de l'évolution
morphologique et du niveau
marin sur l'aléa inondation futur

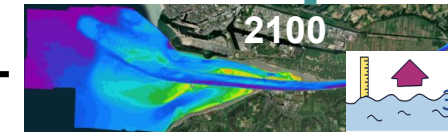
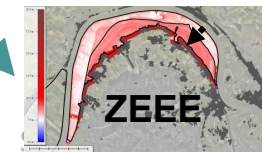
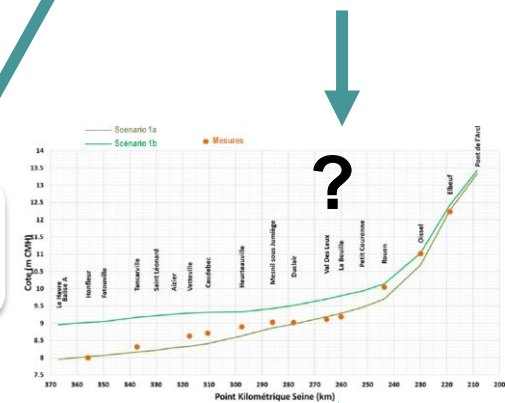
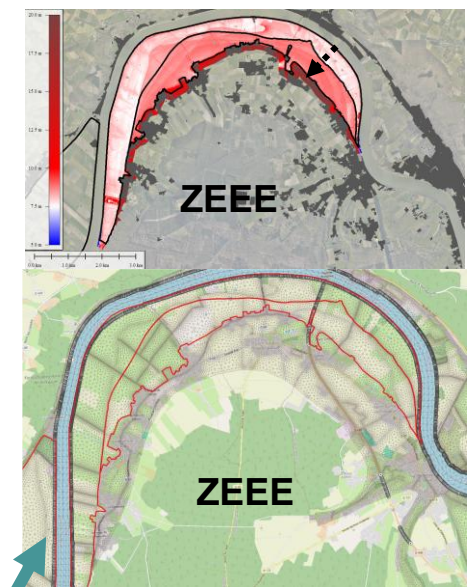


Différentes
méthodologies de
gestion des ZEEE

Sélection et tests de
différentes zones

Tests de différentes
ZEEE dans un contexte
futur

Compréhension des bénéfices de
la création de ZEEE sur l'aléa
inondation actuel et futur



Définition de scénarios d'évolution bathymétrique 2100

Questions pour ATLANTIS :

1. Quelles sont les **impacts de la morphologie du fond** et de la montée du **niveau marin** sur l'**aléa inondation** dans le **futur (2100)** ? *
2. Et quelle **efficacité** des **ZEEE** de nos jours et dans le **futur (2100)** ?

* = étude de sensibilité de l'aléa inondations à l'évolution bathymétrique future.

Questions pour CRONSTIBATH :

1. Quelle(s) **trajectoire(s) d'évolution** choisir d'ici **2100** ?
2. Comment **construire des cartes bathymétriques** en **2100** ?
3. Comment **valider les évolutions** qui seront mises en place ?



Définition de scénarios d'évolution bathymétrique 2100

Quels sont les principaux paramètres influençant l'évolution bathymétrique ?

Evolutions futures potentielles avec CC connues ?

1. Les conditions hydrodynamiques

vagues



marées

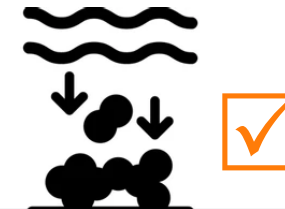


débits

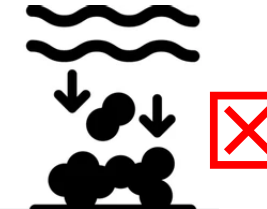


2. Les apports sédimentaires

continentaux



marins



Les trajectoires d'évolutions incertaines de plusieurs paramètres peuvent aboutir à un approfondissement de l'embouchure ou l'inverse !

3. Le niveau marin



4. Les actions anthropiques

dragages

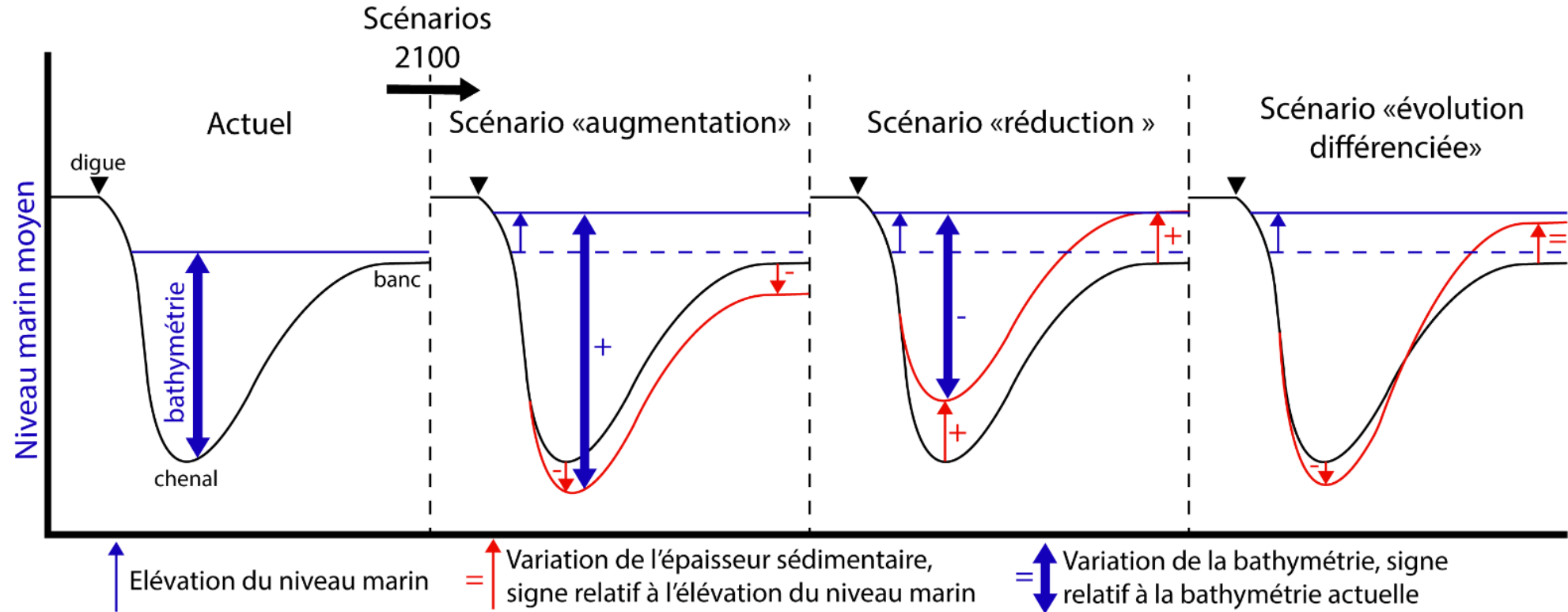


digues



Définition de scénarios d'évolution bathymétrique 2100

En l'absence de tendances claires → mise en place de **scénarios d'évolution** topo-bathymétrique **contrastés**

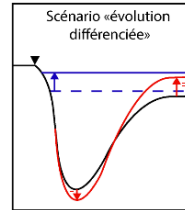


Evolution différenciée :

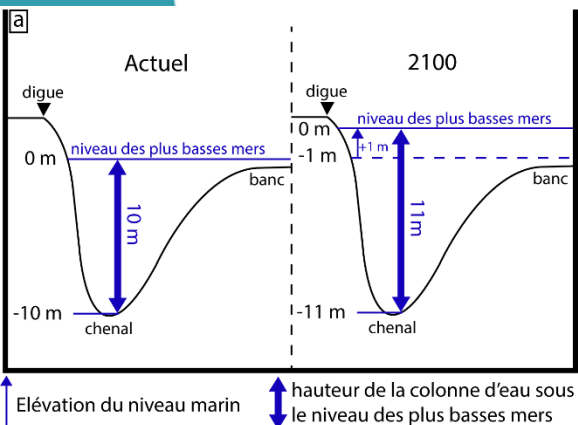
- régime hydrodynamique **similaire à l'actuel**
- apports sédimentaires **importants**

Méthodologie de modification

Étape 1 : évolution morphologique ciblée
à l'horizon 2100

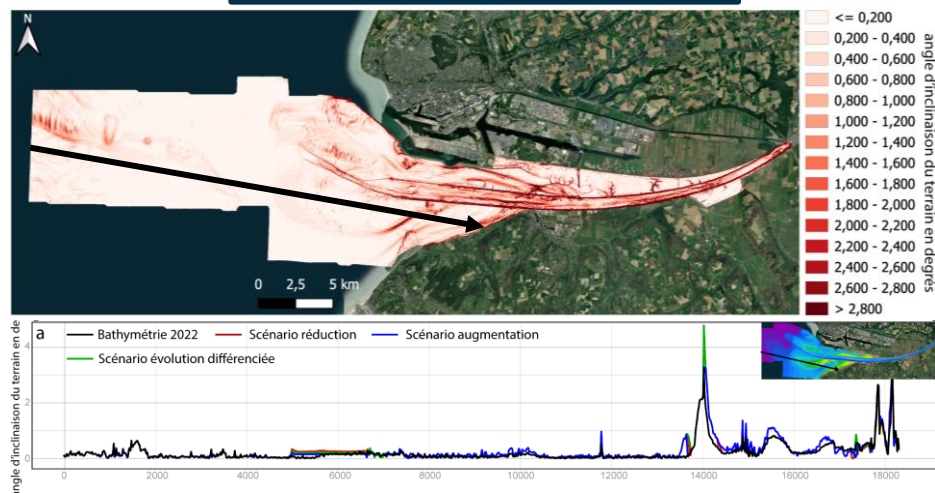


Étape 5 → Comment juger de la vraisemblance des évolutions mises en place ?



Critères de validation

1. Inclinaison du terrain



2. Profondeurs moyennes

Profondeur moyenne (m cmh)	2022	2100 Évolution différenciée (élévation niveau marin + 1 m)
Polygone chenal	-5.2	-6.67
Polygone fosses	-0.5	-0.90
Polygone large	-3.41	-3.46
Polygone ouest	-15.47	-16.47

3. Bilan sédimentaire

2100 Evolution différenciée	Volume (m ³)	Taux de sédimentation (m/an)
Ensemble du domaine modifié	9.86.10 ⁷	8.29.10 ⁻³

Objectifs

S'assurer de **ne pas générer de pentes** artificielles qui pourrait **influencer l'hydrodynamique**

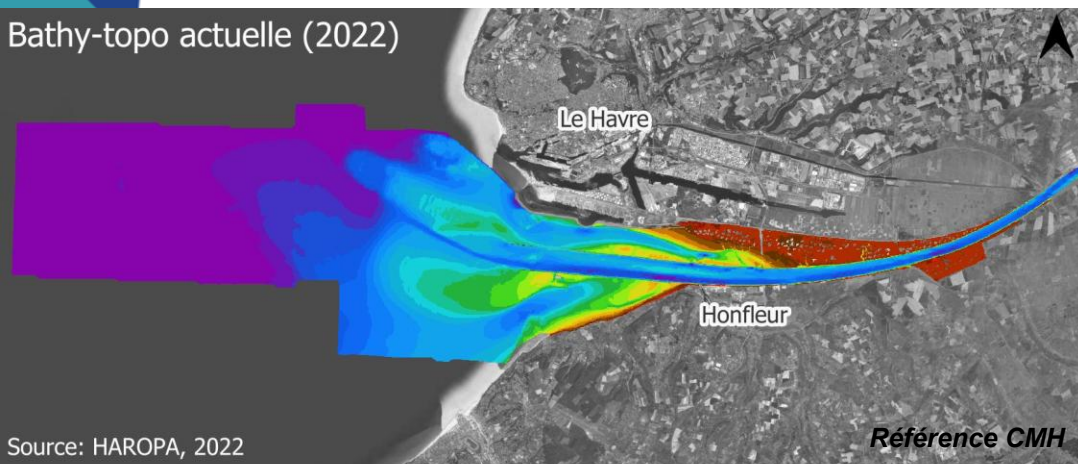
Vérifier que la **profondeur** atteinte en **2100** correspond à la **cible du scénario**

Comparer les **bilans sédimentaires** et **taux de sédimentation** aux **données historiques** du remplissage de l'embouchure

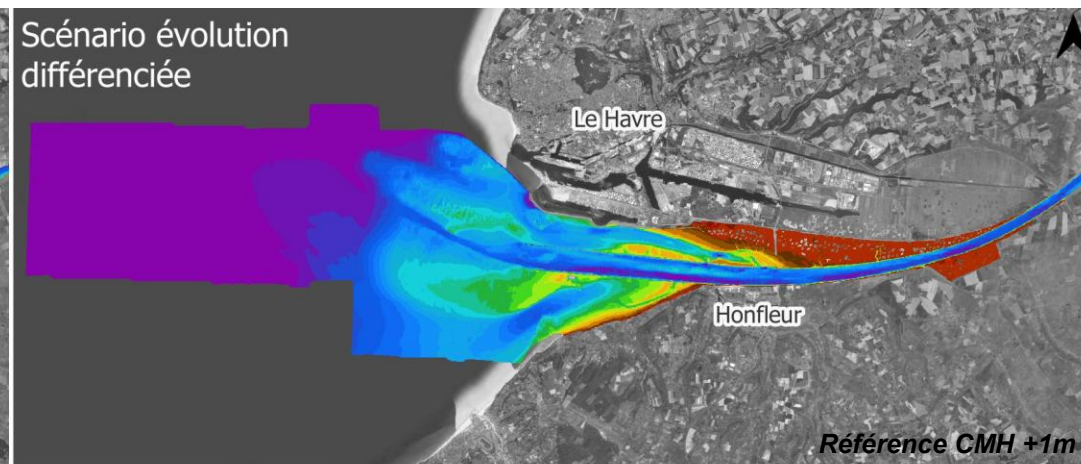


Scénarios bathymétriques 2100

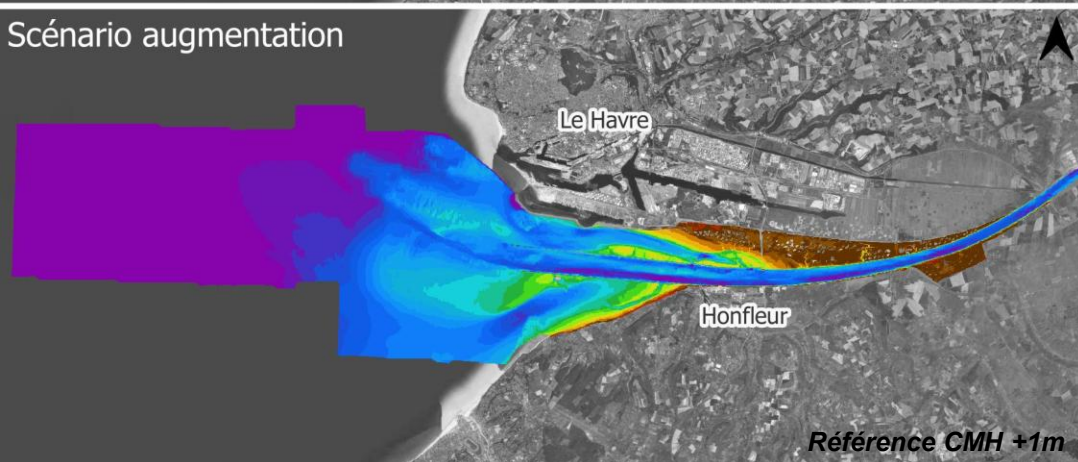
Bathy-topo actuelle (2022)



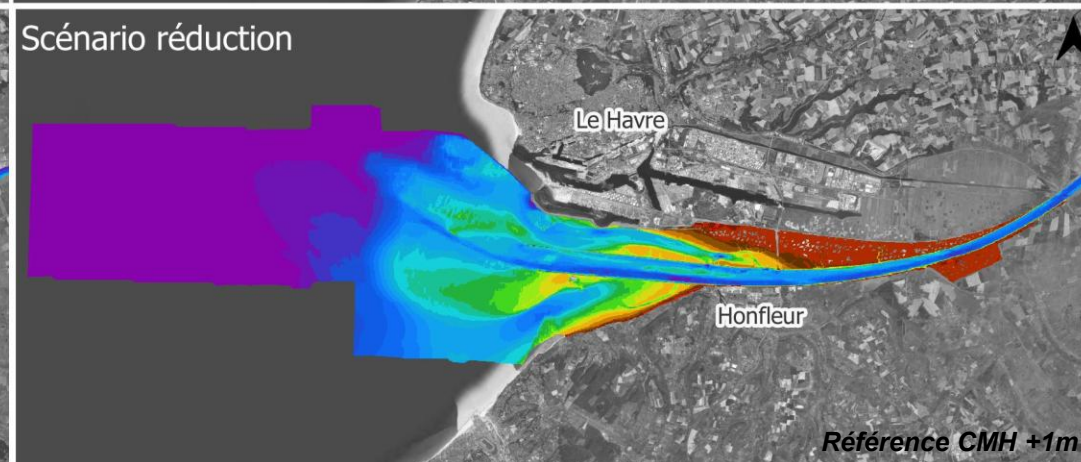
Scénario évolution différenciée



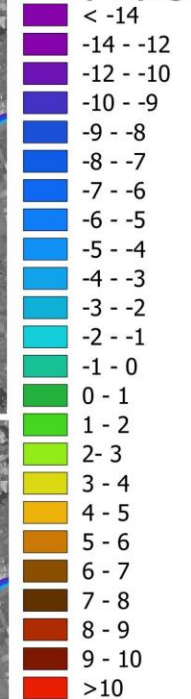
Scénario augmentation



Scénario réduction



Bathy-topographie (m cmh)



0 5 10 km



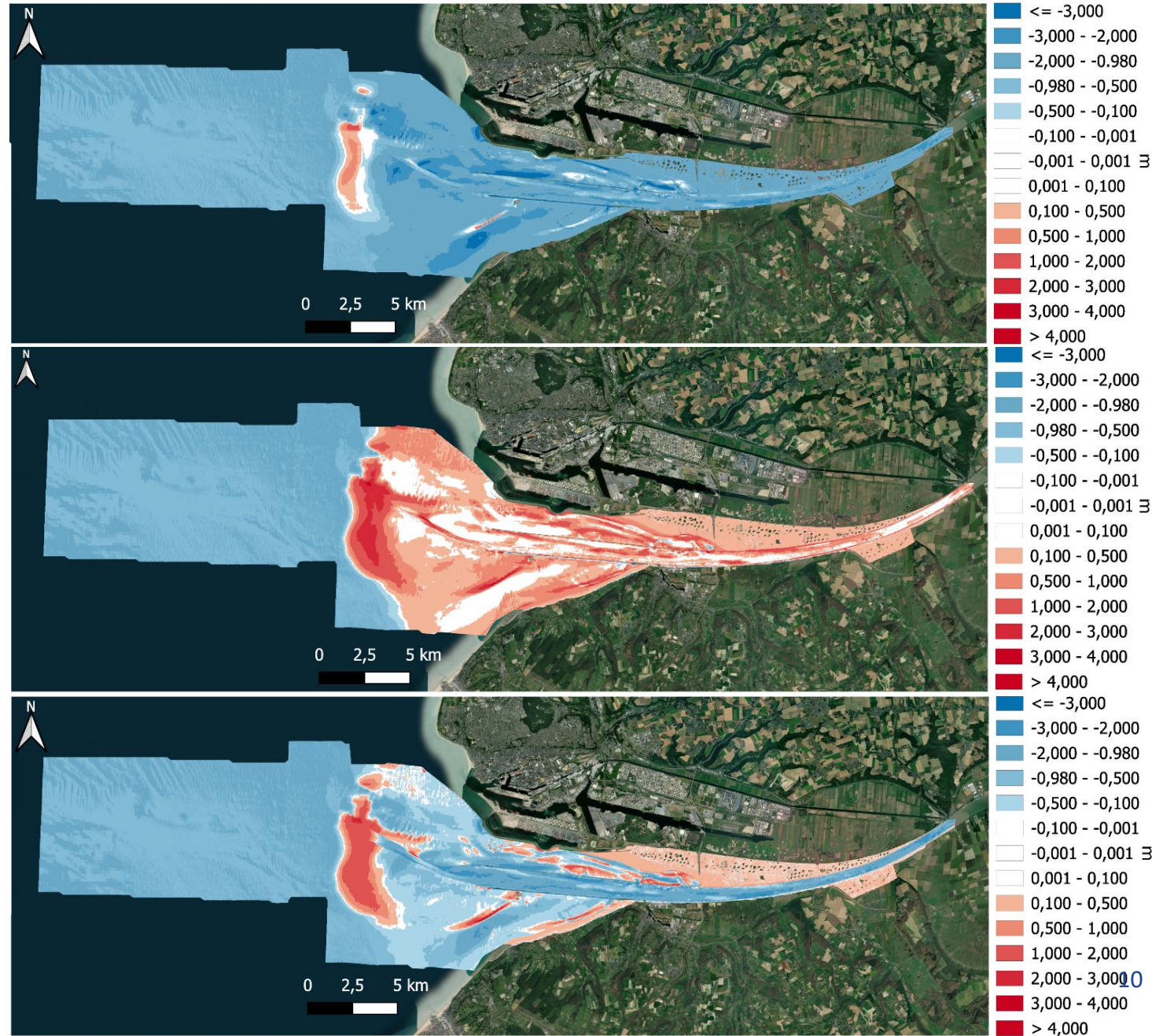
GIP Seine-Aval, 2025

Différences bathymétriques entre 2022 et les scénarios 2100

Différences de profondeur entre 2022 et les scénarios 2100 :

Conclusion :

- **3 scénarios bathymétriques contrastés**, correspondant aux trajectoires ciblées
- **Cohérents** avec l'**histoire géologique** du remplissage sédimentaire de l'embouchure et la **bibliographie**



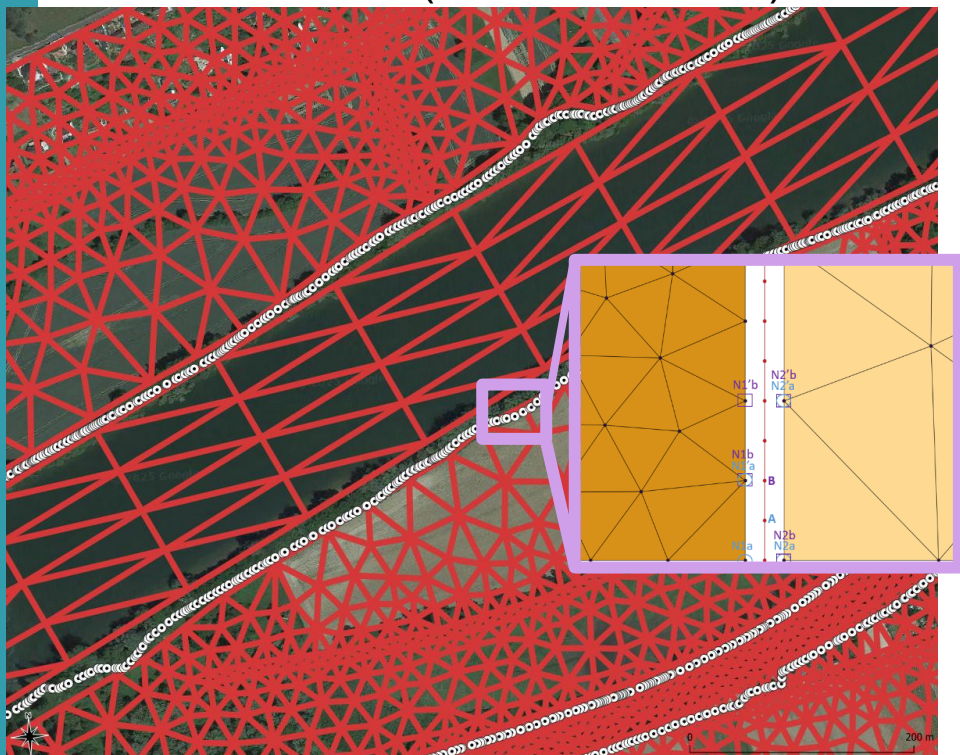
PROBLEMATIQUE : explorer l'influence des évolutions de l'estuaire, en termes d'évolutions bathymétriques et de schémas d'aménagements, sur la propagation des aléas fluvio-maritimes en exploitant le modèle hydrodynamique 2D du GIP SA.

Lot 1 : Actualisation du modèle hydrodynamique 2D

- **Actualiser** le modèle hydrodynamique en tenant compte de l'ensemble des **données nouvellement disponibles** et des développements réalisés depuis l'étude de 2022 (**OH**, nouveau **référentiel bathy/topo 2022**);
- Tester des **simplifications** du modèle pour **diminuer les temps de calcul** et la manière d'intégrer les ouvrages

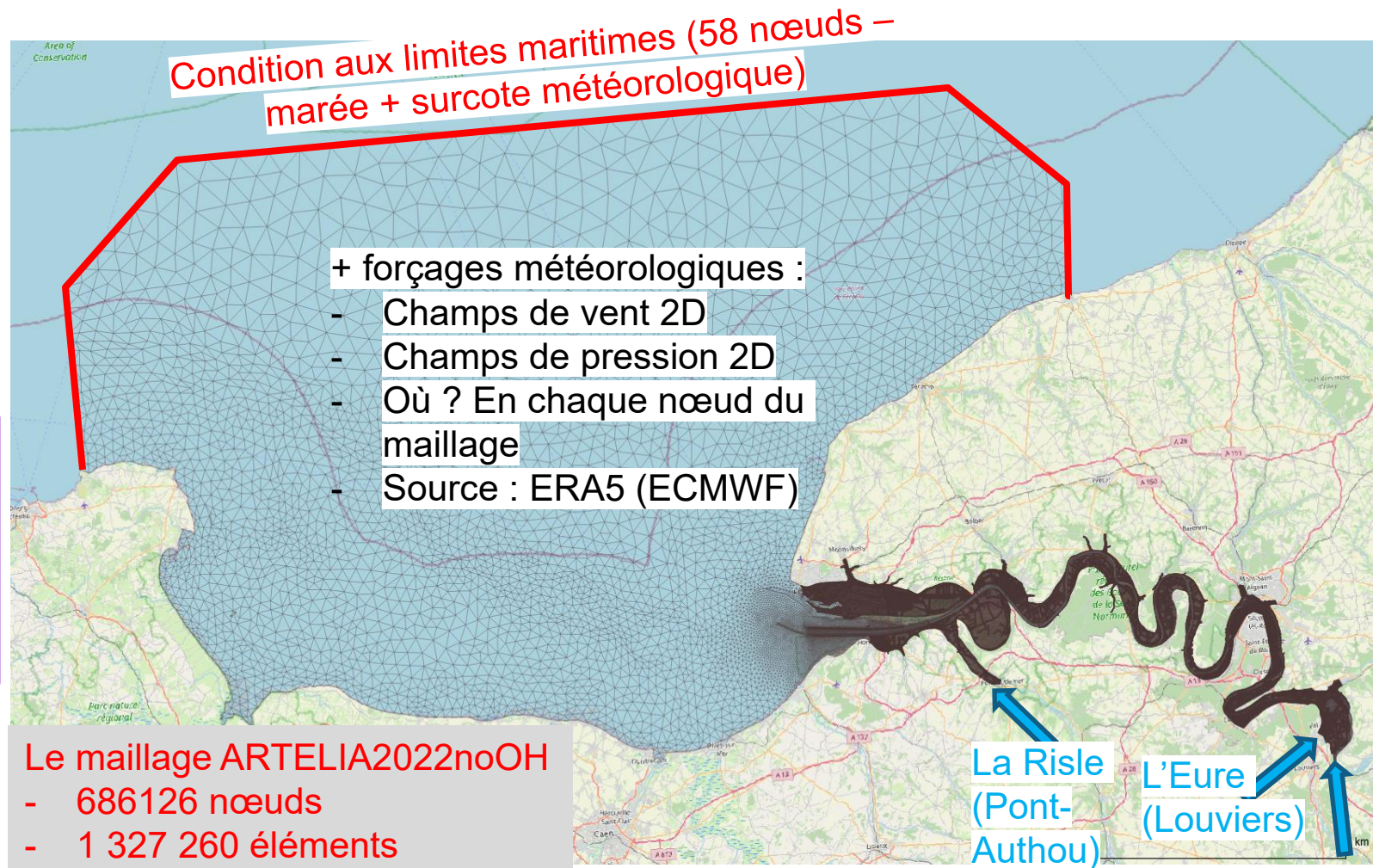
Le modèle ATLANTIS2025

- Adaptation du modèle **avec débordement** fondé sur **TELEMAC2D** (ARTELIA, 2022) :



La méthode RIG

- 98 digues
- Composées de segments [AB] reliés au maillage par les plus proches nœuds



- ⇒ (H,U,V) sur chaque nœud du modèle numérique
- ⇒ Comparé aux mesures marégraphiques et aux champs d'expansion de submersions marines si disponibles

La Seine
(Vernon)

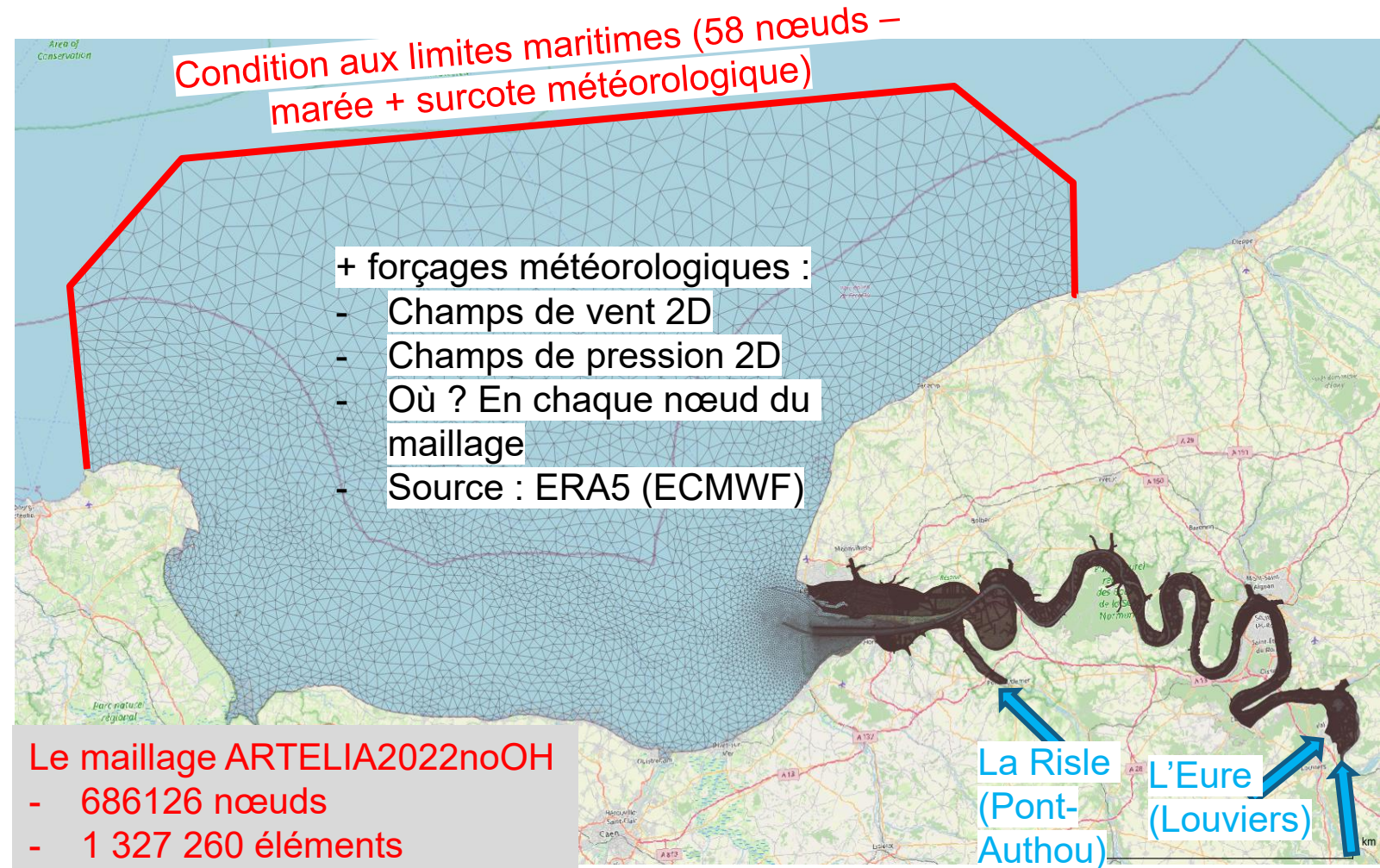
Le modèle ATLANTIS2025

- Adaptation du modèle **avec débordement** fondé sur **TELEMAC2D** (ARTELIA, 2022) :

✓ ouvrages traversants (*)



(*) source : GIPSA (2024b). Ouvrages traversants en vallée de seine – projet atlantis – v23/07/2024

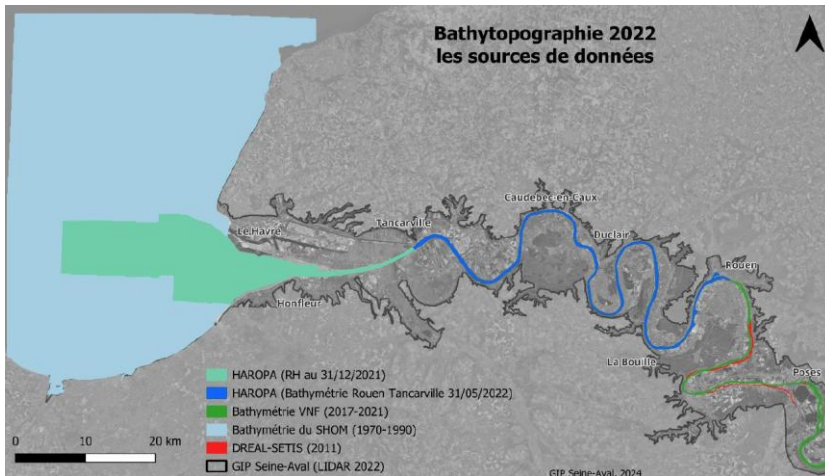


- ⇒ (H,U,V) sur chaque nœud du modèle numérique
- ⇒ Comparé aux mesures marégraphiques et aux champs d'expansion de submersions marines si disponibles

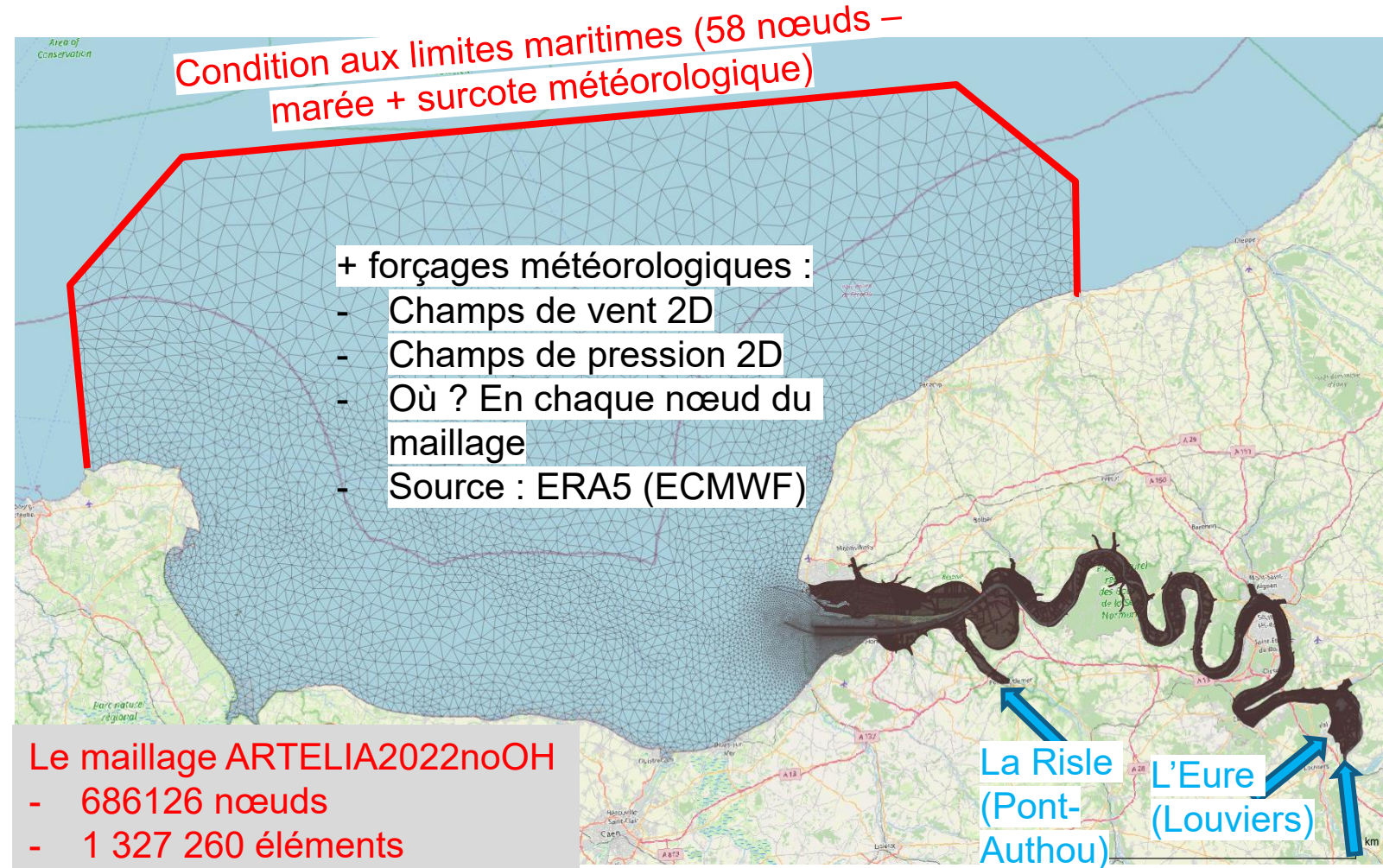
Le modèle ATLANTIS2025

- Adaptation du modèle **avec débordement** fondé sur **TELEMAC2D** (ARTELIA, 2022) :

- ✓ ouvrages traversants,
- ✓ référentiel bathy/topo 2022,



source : GIPSA (L'Ebrelec, 2024)



- ⇒ (H,U,V) sur chaque nœud du modèle numérique
- ⇒ Comparé aux mesures marégraphiques et aux champs d'expansion de submersions marines si disponibles

La Seine
(Vernon)

- Adaptation du modèle **avec débordement** fondé sur **TELEMAC2D** (ARTELIA, 2022) :
- ✓ ouvrages traversants,
- ✓ référentiel bathy/topo 2022,
- ✓ nouvelles conditions aux limites maritimes (marée) : MANGA700 (ifremer), **MSFA (Cerema)**

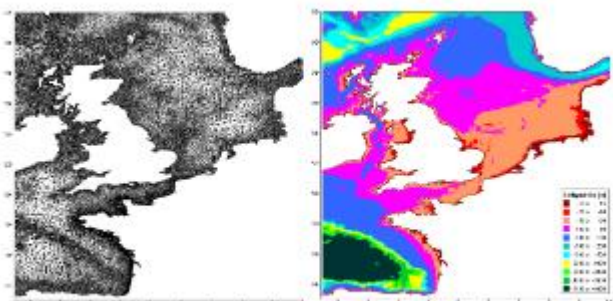
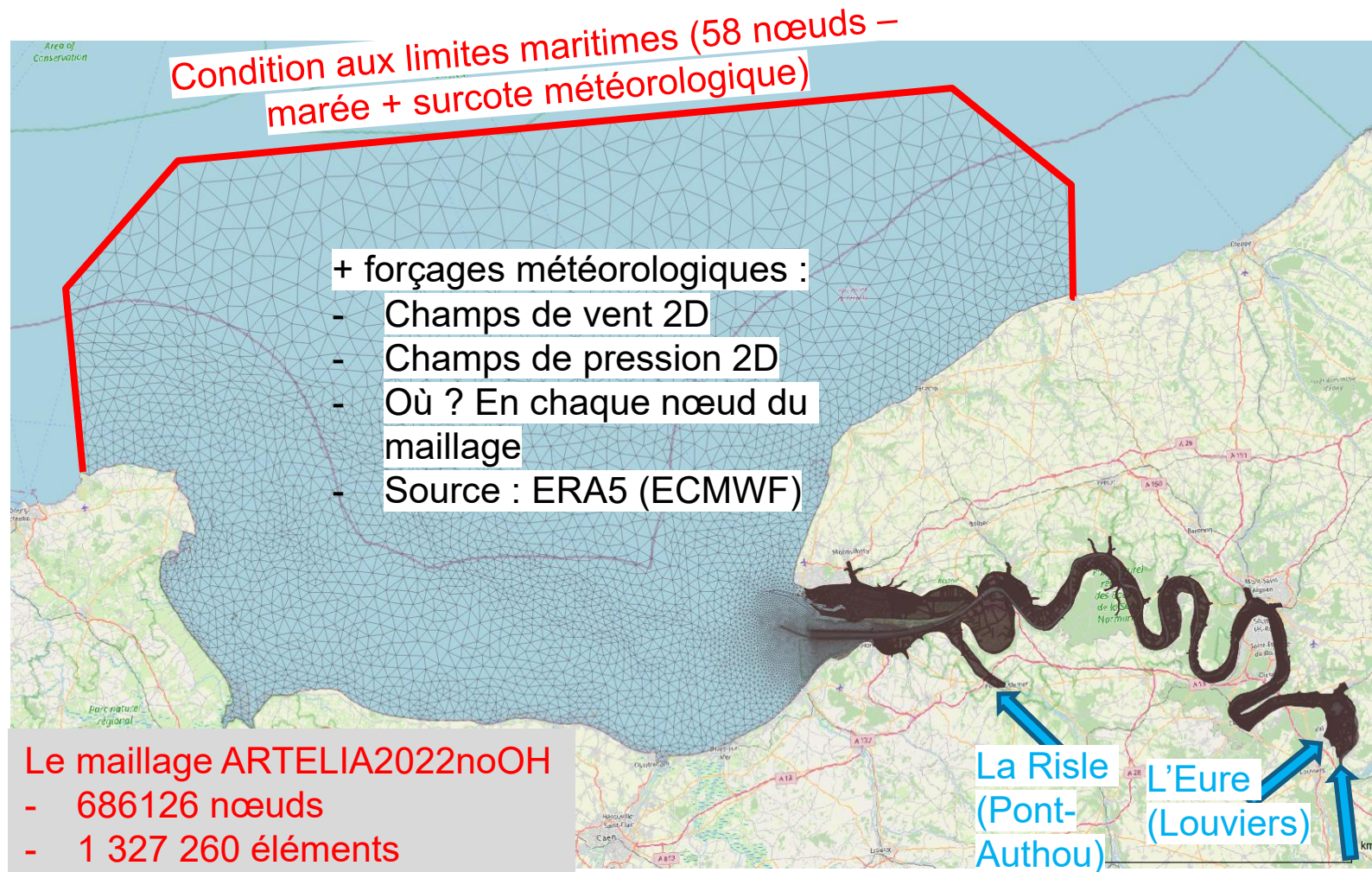


Fig. 1: Mesh and bathymetry of the numerical model

source : (Laborie & al, 2015)

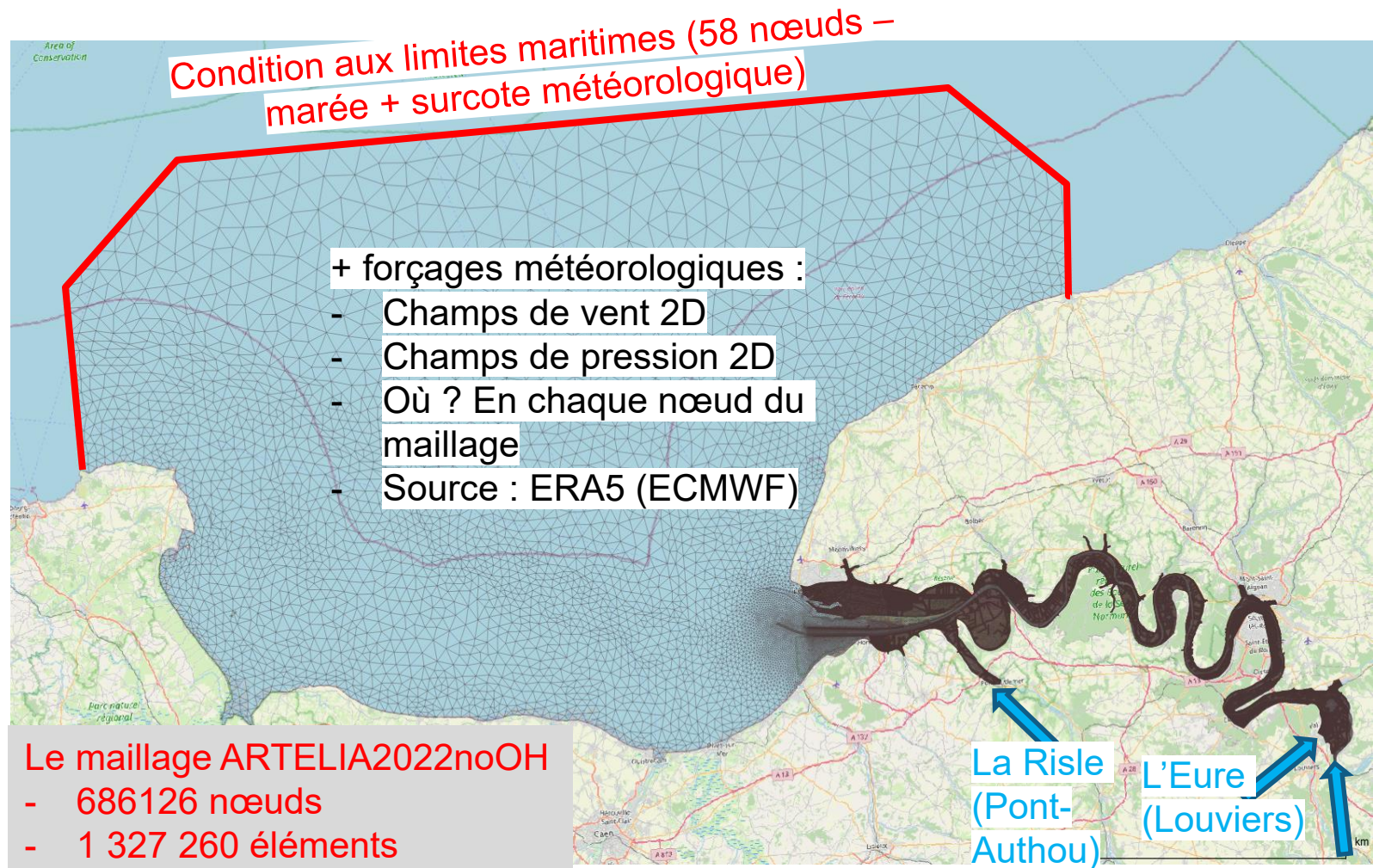


- ⇒ (H,U,V) sur chaque nœud du modèle numérique
- ⇒ Comparé aux mesures marégraphiques et aux champs d'expansion de submersions marines si disponibles

Le modèle ATLANTIS2025

- Adaptation du modèle **avec débordement** fondé sur **TELEMAC2D** (Cerema, 2025).
- Calé sur **6 événements de tempêtes**

Event	Type
March 2001	fluvial
March 2008	maritime
January 2018 (Eleanor storm)	maritime
February 2018	fluvial-maritime
February 2020 (Ines storm)	fluvial-maritime
March 2020	fluvial-maritime
April 2024 (ATLANTIS project)	fluvial-maritime

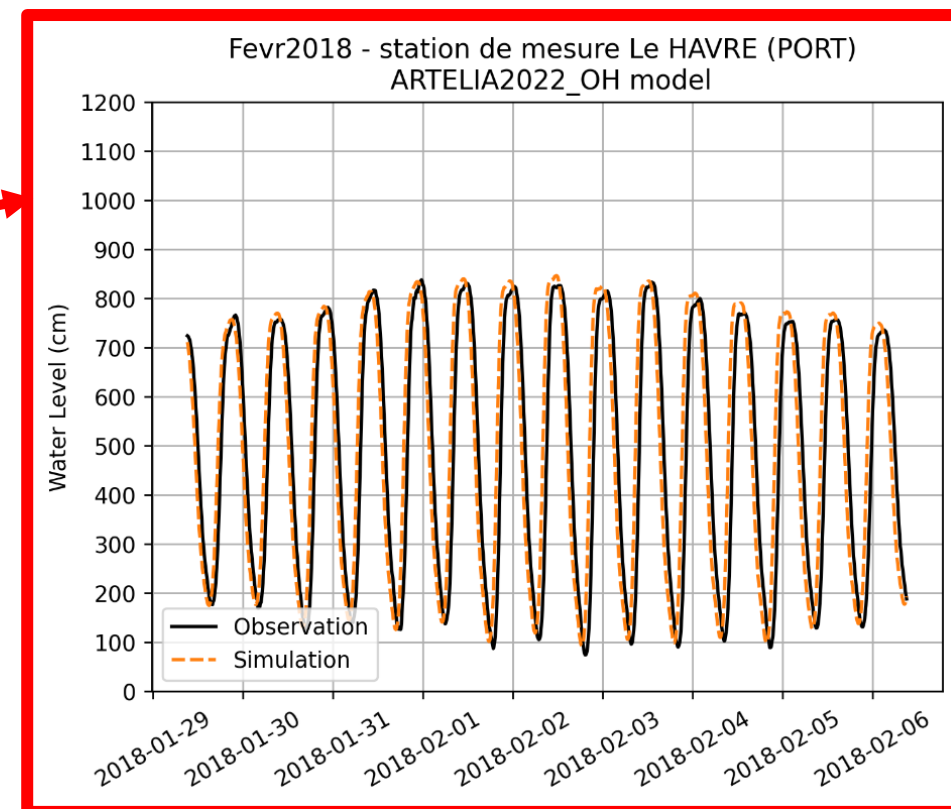
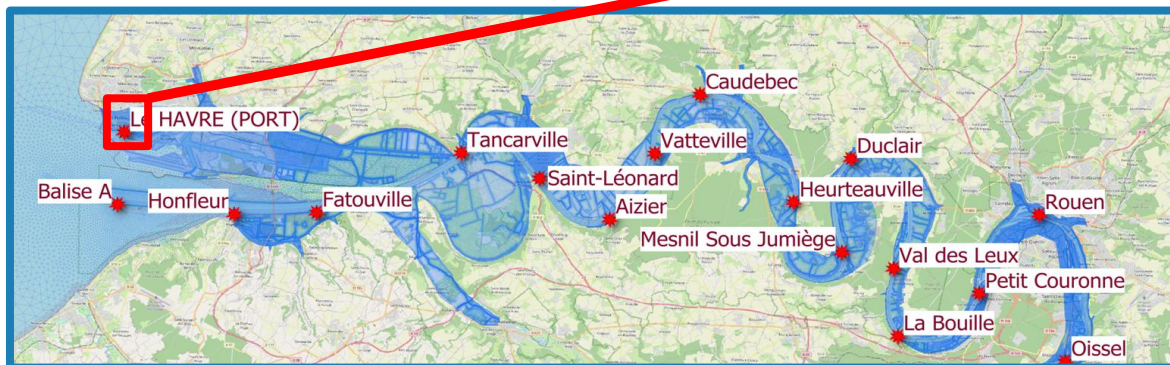


- ⇒ (H,U,V) sur chaque nœud du modèle numérique
- ⇒ Comparé aux mesures marégraphiques et aux champs d'expansion de submersions marines si disponibles

ATLANTIS : indicateurs de performance / impact (1/3)

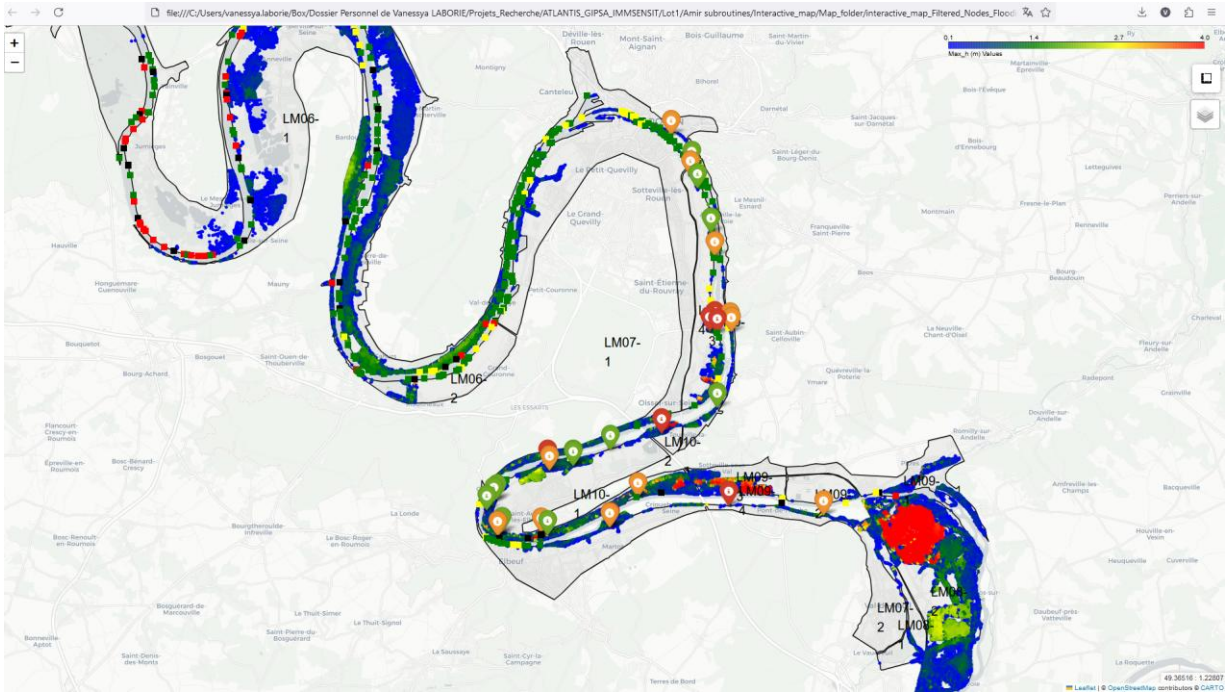
ArnoOH newBathy-mod		Le Havre (port)	Balise A	Honfleur	Tancarville	Caudebec	Duclair	La Bouille	Petit Couronne	Rouen	Elbeuf	Average
ERR Peakstorm	cm	-4	-10	5	1	-24	2	-7	-8	-6	10	-5
NASH-HT	-	0,83	0,85	0,71	0,84	0,73	0,94	0,93	0,91	0,92	-0,30	0,71
RMSE HT	cm	13	13	19	19	24	8	9	10	10	15	14

- Calé sur 6 événements de tempêtes
- Indicateurs statistiques en lit mineur :
 - ✓ RMSE et Nash des signaux (sans rephasage du signal)
 - ✓ RMSE et Nash de Pleine Mer (avec rephasage du signal)
 - ✓ l'erreur sur niveaux d'eau atteints au moment des pics de tempête



ATLANTIS : indicateurs de performance / impact (2/3)

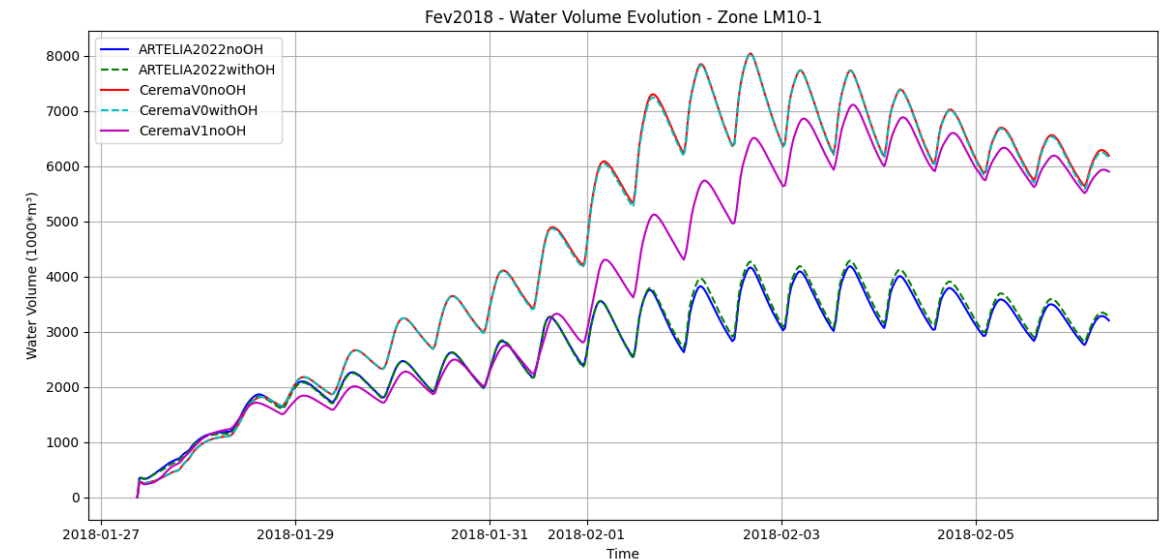
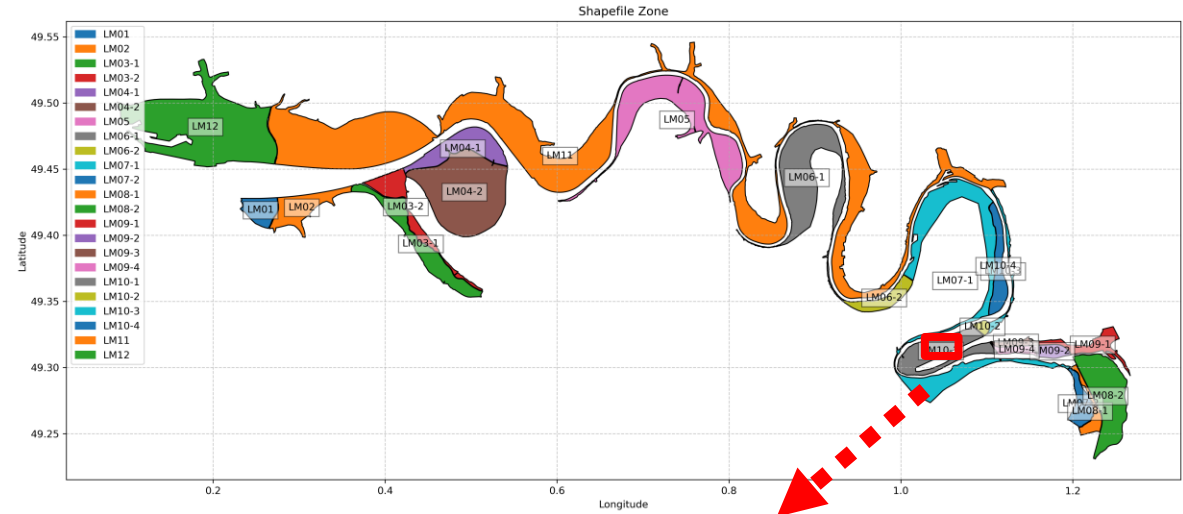
- Adaptation du modèle avec débordement fondé sur **TELEMAC2D** (Cerema, 2025).
- Calé sur 6 événements de tempêtes
- Indicateurs statistiques en lit mineur
- Indicateurs statistiques en lit majeur :
 - ✓ selon les **laisses de crues** ou « **images** » disponibles de l'extension des débordements (interface terre/mer) (satellites, levés photogrammétriques), **la surface et la localisation des zones inondées**



reperes de crues/ Model		Elv.	Artelia	Artelia	Cerema	Cerema	Cerema
	version		2022	2022	V0	V0	V1
	Ouvrage Hydraulique		Non	Oui	Non	Oui	Non
No.	Commune	(CMH m)	Diff (m)	Diff (m)	Diff (m)	Diff (m)	Diff (m)
	RMSE (m)	-	0,6988	0,719	0,5287	0,5373	0,8942

ATLANTIS : indicateurs de performance / impact (3/3)

- Adaptation du modèle **avec débordement** fondé sur **TELEMAC2D** (Cerema, 2025).
- Calé sur **6 événements de tempêtes**
- Indicateurs statistiques **en lit mineur**
- Indicateurs statistiques **en lit majeur** :
 - ✓ selon les **laisses de crues** ou « **images** » disponibles de l'extension des débordements (interface terre/mer) (satellites, levés photogrammétriques), **la surface et la localisation des zones inondées**
 - ✓ la **durée de submersion**
 - ✓ les **volumes de débordement**.



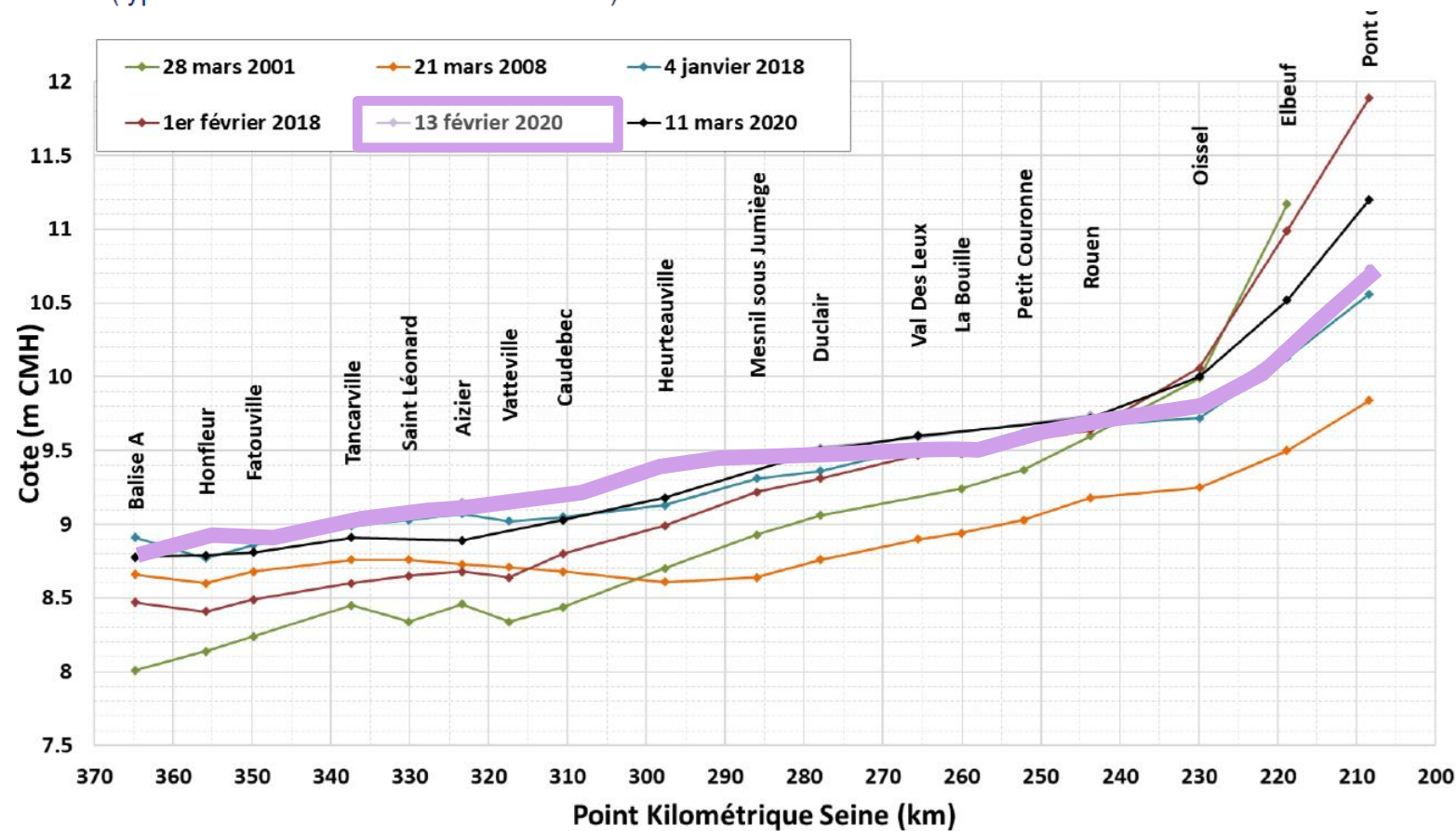
**PROBLEMATIQUE : explorer l'influence des évolutions de l'estuaire,
en termes de changements morphodynamiques et de schémas d'aménagements,
sur la propagation des aléas fluvio-maritimes
en exploitant le modèle hydrodynamique 2D du GIP SA.**

Lot 2 : Impact de la morphologie sur le risque de submersions fluvio-maritimes

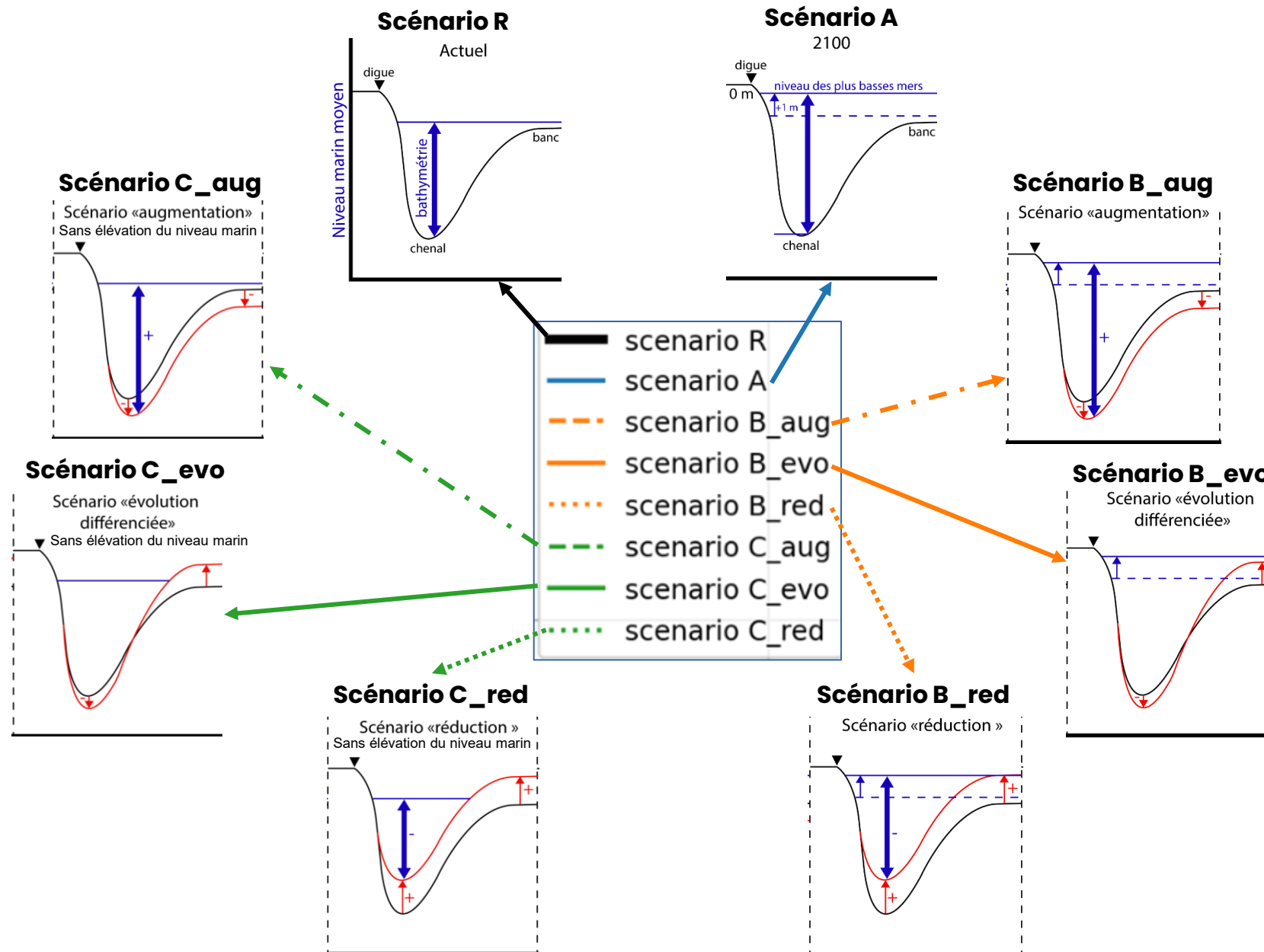
- analyser l'impact des évolutions morphologiques sur la caractérisation et l'occurrence des aléas
- en intégrant dans le modèle des bathymétries projetées sur base de scénarios d'évolutions (CRONSTIBATH)

Premiers résultats pour Inès (Février 2020)

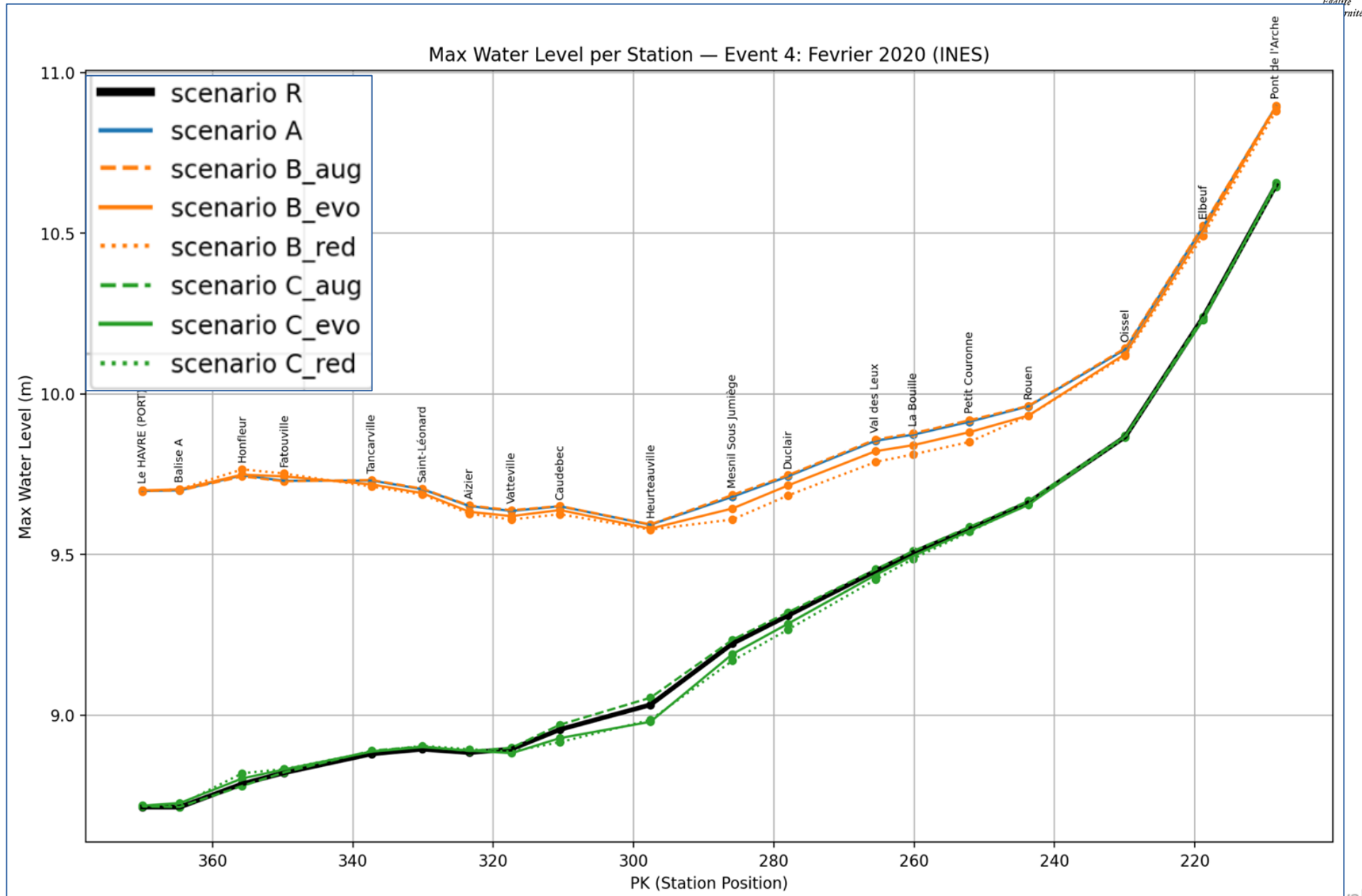
- ✓ Evènement de mars 2001 (type fluvial)
- ✓ Evènement de mars 2008 (type maritime)
- ✓ Evènement de janvier 2018 (type maritime – tempête Eleanor)
- ✓ Evènement de février 2018 (type fluvio-maritime à dominante fluviale)
- ✓ Evènement de février 2020 (type fluvio-maritime à dominante maritime)
- ✓ Evènement de mars 2020 (type fluvio-maritime)



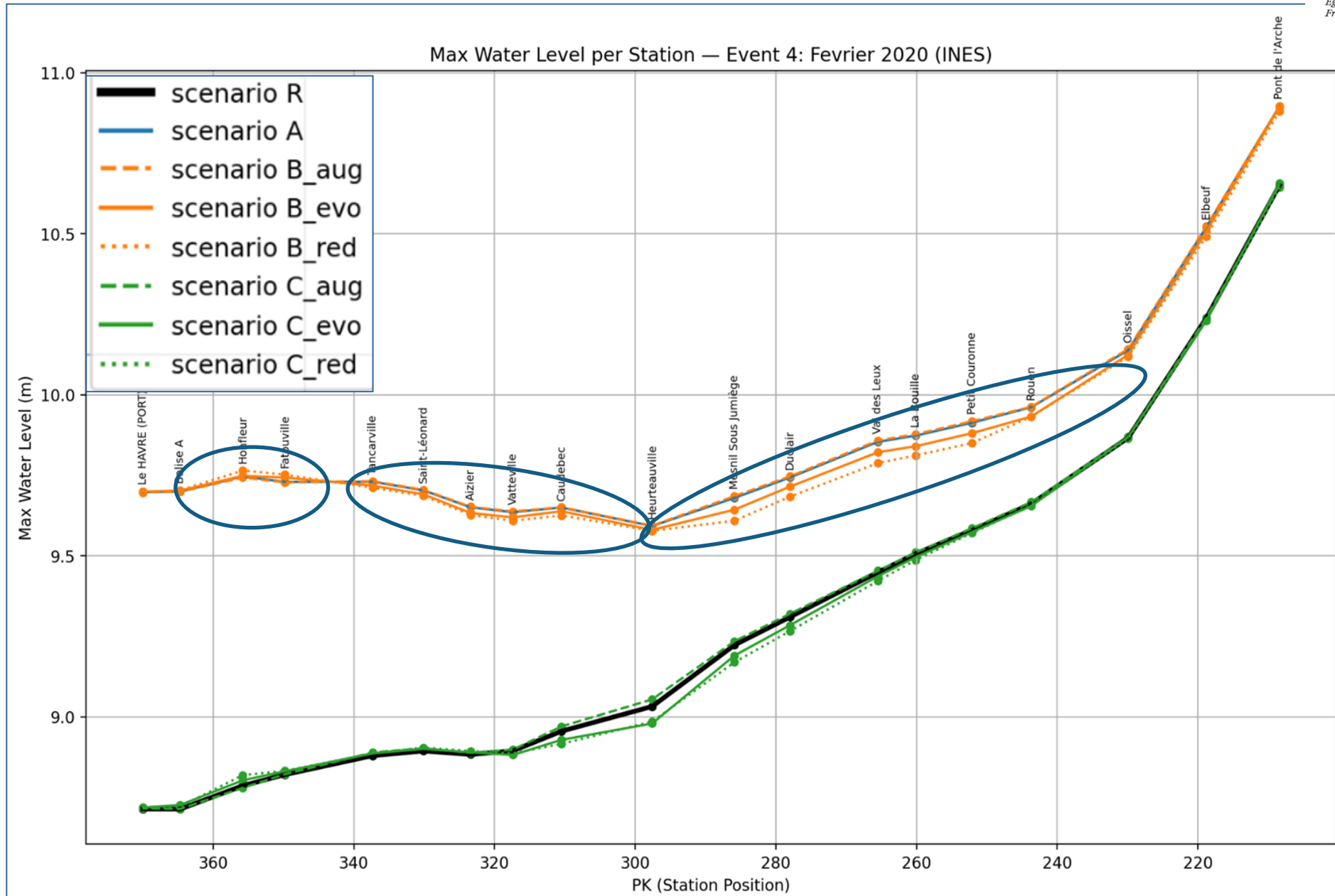
Impacts sur les pics de tempête (Février 2020)



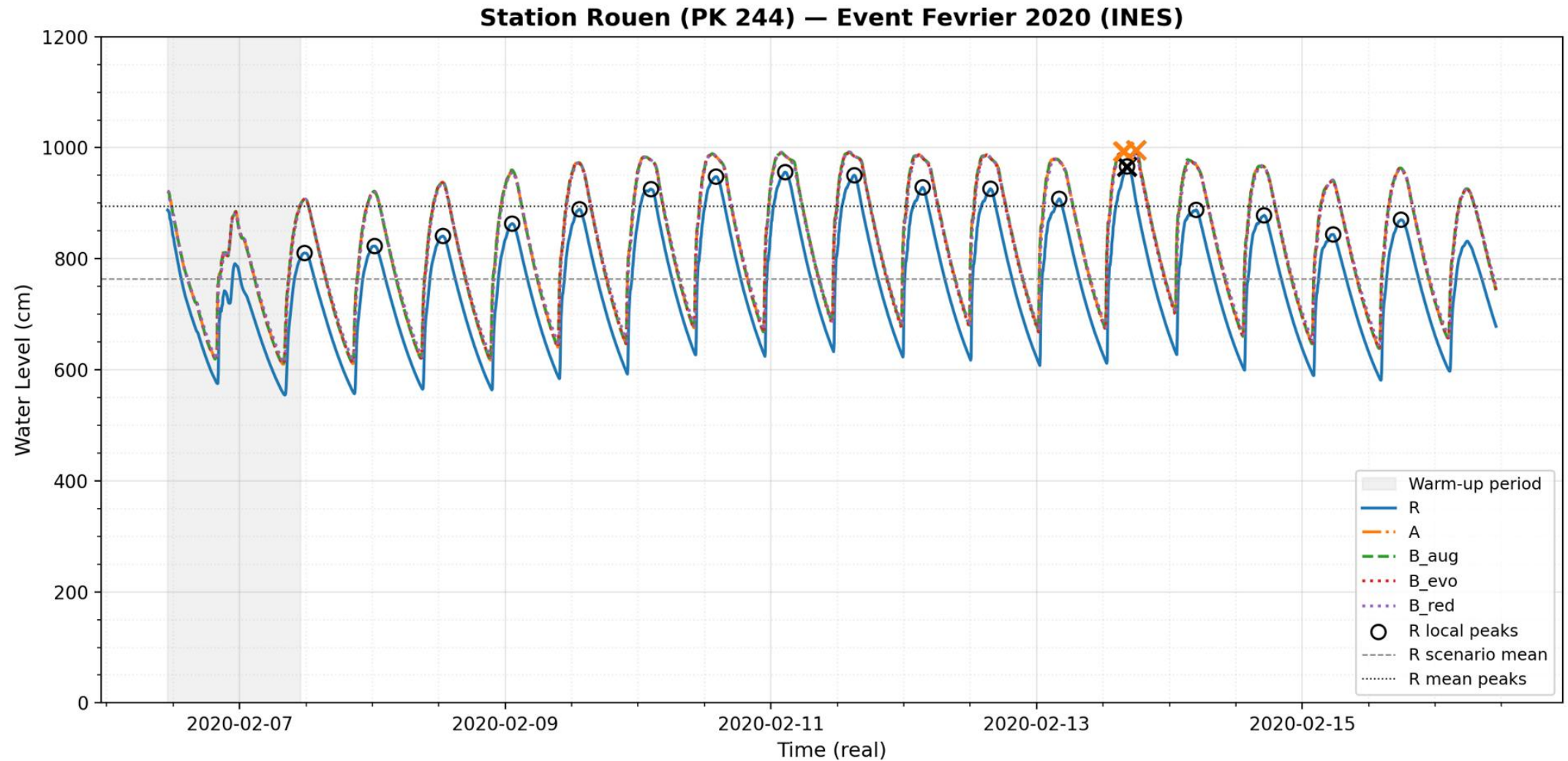
Impacts sur les pics de tempête (Février 2020)



Impacts sur l'évolution des niveaux d'eau à Aizier

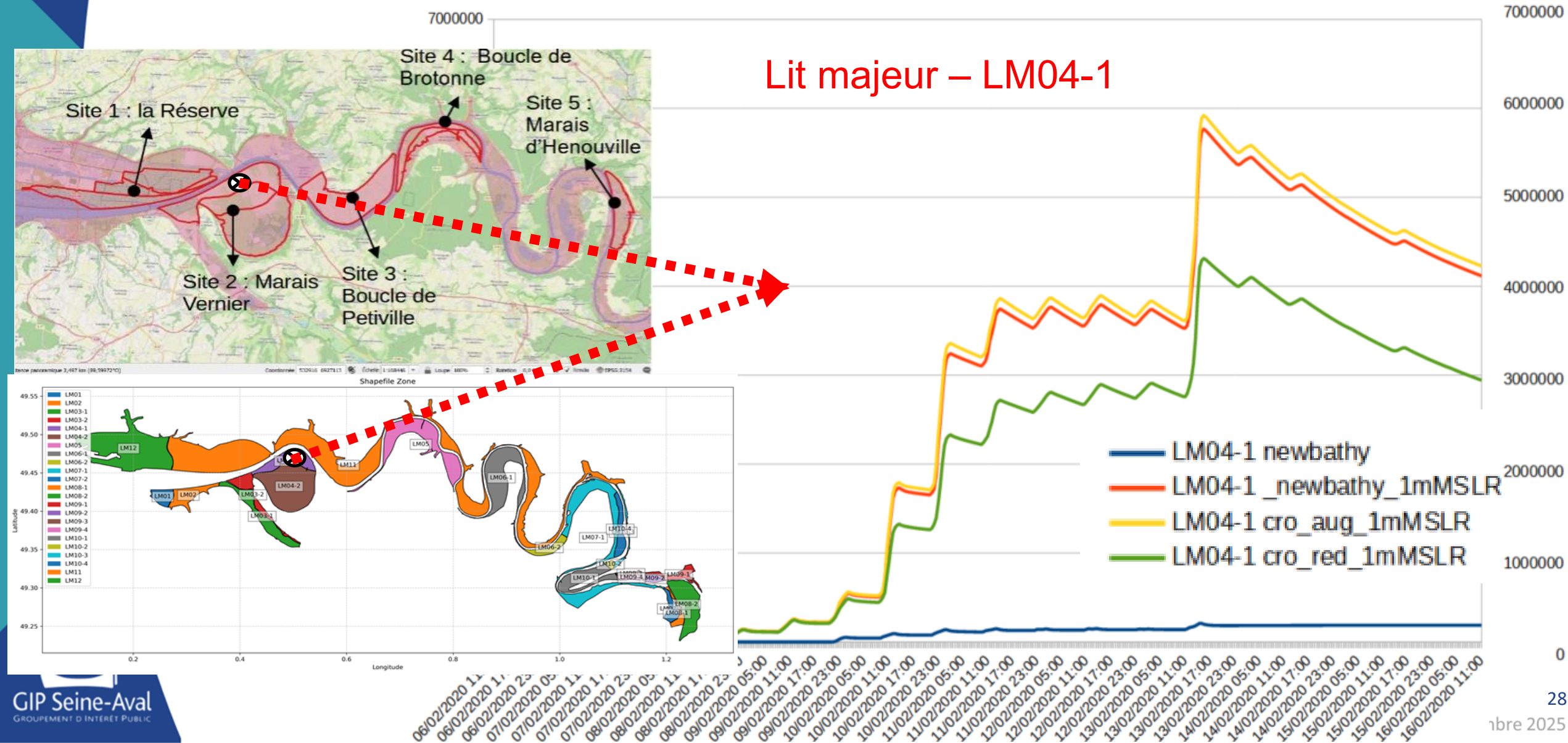


Impacts sur l'évolution temporelle des niveaux d'eau (Février 2020)



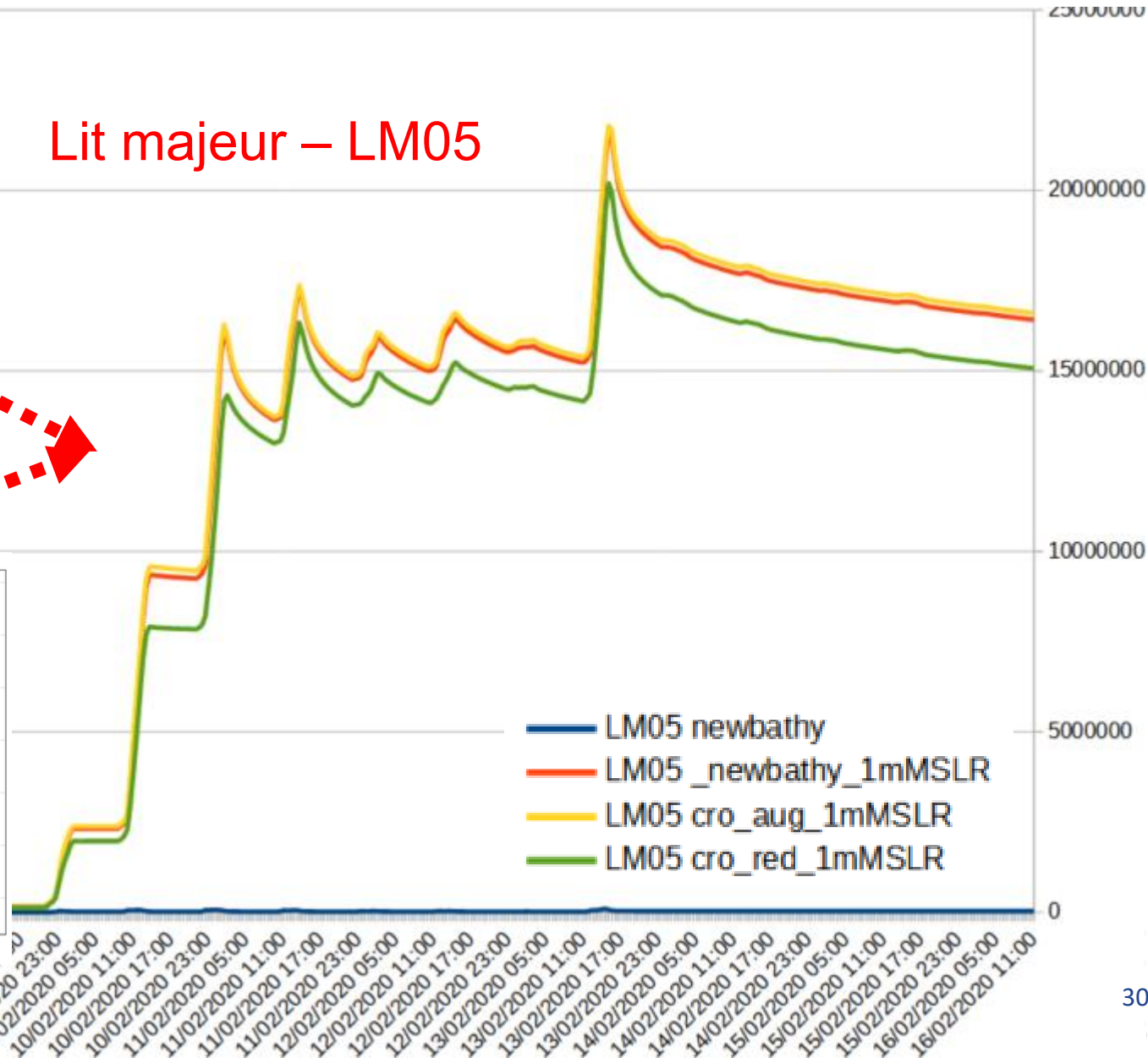
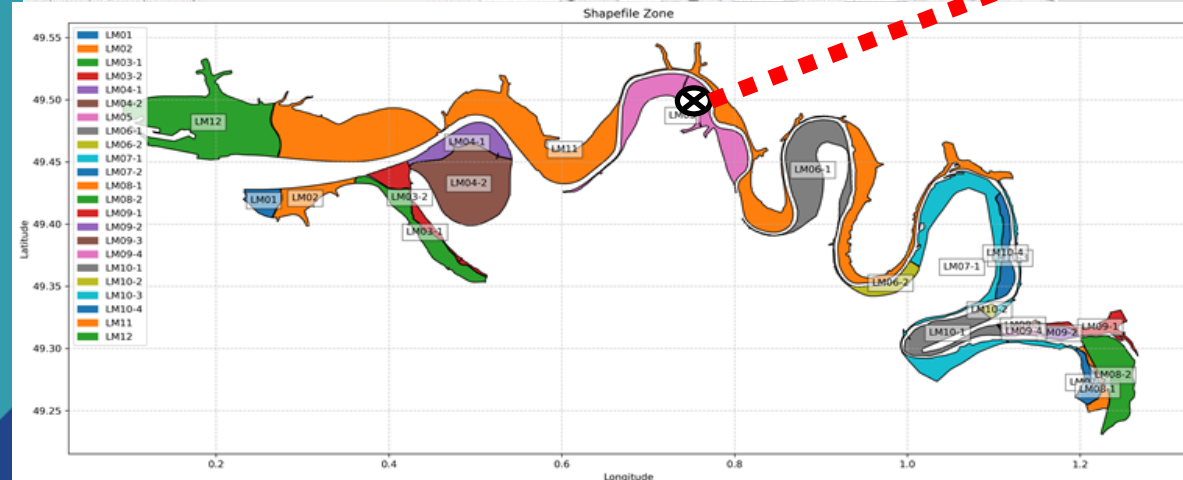
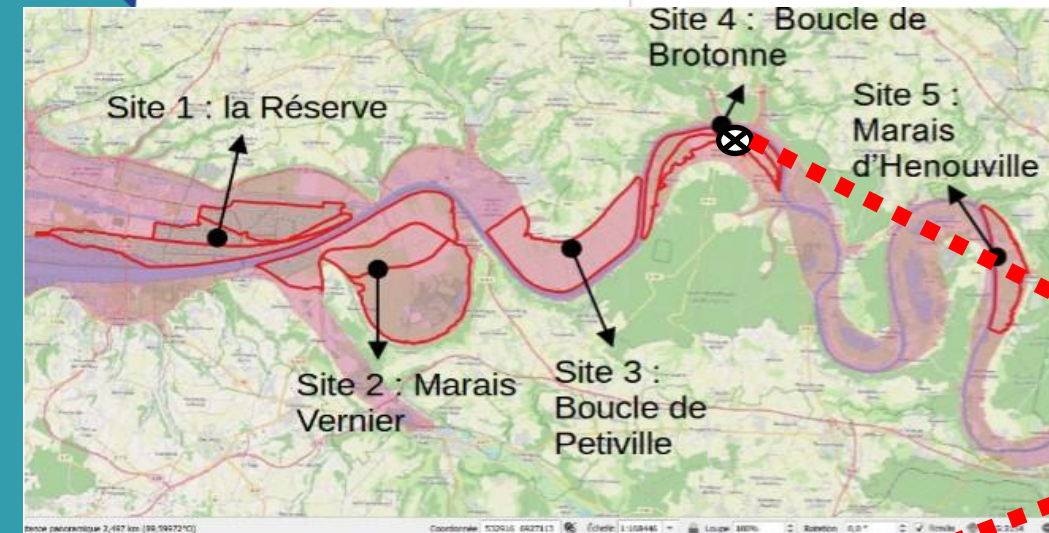
Impacts sur les volumes débordants (Février 2020)

Lit majeur – LM04-1



Impacts sur les volumes débordants (Février 2020)

Lit majeur – LM05



LM05 newbathy
LM05_newbathy_1mMSLR
LM05 cro_aug_1mMSLR
LM05 cro_red_1mMSLR

Conclusions...

- ATLANTIS LOT 1 : mise en place du modèle ATLANTIS2025
 - ouvrages traversants,
 - actualisation de la **bathymétrie**
 - **conditions aux limites maritimes** (CLMAR)
- Indicateurs de **performance** et *d'impact* définis et développés
- ATLANTIS LOT 2 : impact des scénarios CRONSTIBATH
 - intégration des **évolutions bathymétriques**
 - **premiers résultats** à analyser et consolider

- **Amélioration** des performances du modèle **ATLANTIS2025**

- sensibilité aux **forçages météorologiques** (AROME)
- **recalibration** avec les évolutions (OH, bathy, CLMAR)

- **Projet ANR-AAP2024 HYDROLINK – PhD Redouane BOUGLIA**

- coordination : M2C (A. JARDANI)
- partenaires : BRGM, CEREMA, EDF, GIPSA, Mines de Paris
- correction par méthodes de **deep-learning** des prévisions de niveaux d'eau par Telemac2D – couplage avec **nappe**

- **Suites du projet ATLANTIS**

- LOT 2 CRONSTIBATH : **consolidation** des analyses et 1ers résultats
- LOT 3 : impact des **ZEEE** sur l'aléa inondation en baie de Seine

Rapports techniques :

Cerema, 2024. Prise en compte de l'élévation du niveau moyen de la mer en baie de Seine – état de l'art et recommandations. Livrable Cerema pour le projet ATLANTIS, 28p.

Cerema, 2025 (mi-décembre). ATLANTIS – rapport intermédiaire : lot 1. Livrable Cerema pour le projet ATLANTIS, env. 135 pages

Conférences : poster ANRN (GIPSA & al, 2025)
TUC2025 (Parvin & al, 2025),
À venir : SIMHYDRO2026 (Parvin & al, 2026)

Merci pour votre attention !

Merci de votre attention. Des questions ?

Contact au GIP Seine-Aval :
molivier@seine-aval.fr

Contacts au Cerema :
vanessya.laborie@cerema.fr
amir-hossein.parvin-ashtiani@cerema.fr
Nicolas.huybrechts@cerema.fr
Patrick.chasse@cerema.fr