

*Les webinaires de l'estuaire #8
le 06 octobre 2025*

Evolution de l'aléa inondation par débordement en estuaire de Seine



Plan

Partie 1 : introduction

- L'aléa **inondation par débordement** en estuaire de Seine
- Principaux **outils de caractérisation** de l'aléa
- **Stratégie et état actuel de la protection** contre les inondations par débordement en estuaire de Seine

Partie 2 : **Evolution des facteurs influençant l'aléa inondation** par débordement

- Evolutions **passées** / Etat des connaissances des **évolutions futurs**

Partie 3 : Vers des **solutions d'adaptations**



Inondation par débordement en estuaire de Seine

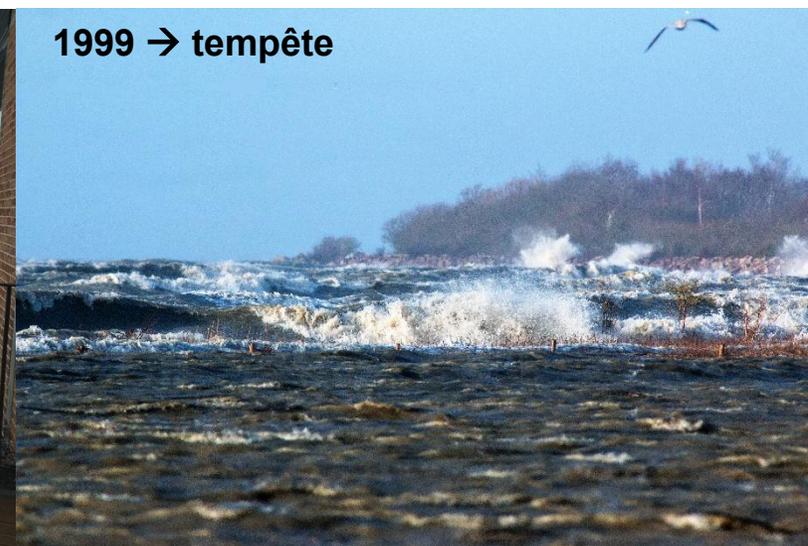
En estuaire, les **inondations** par débordement sont le résultat d'**interactions complexes** entre les **forçages amont et aval**



Aléa fluviale



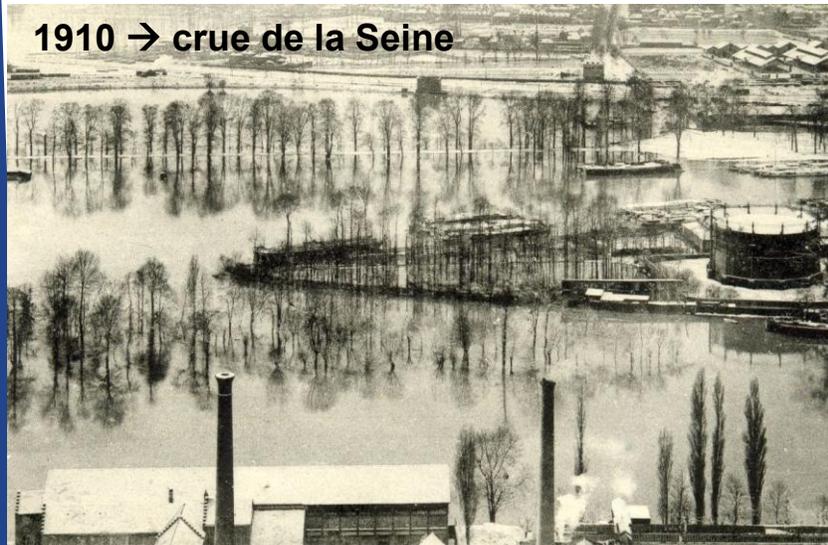
Aléa fluvio-maritime



Aléa maritime

Inondation par débordement en estuaire de Seine

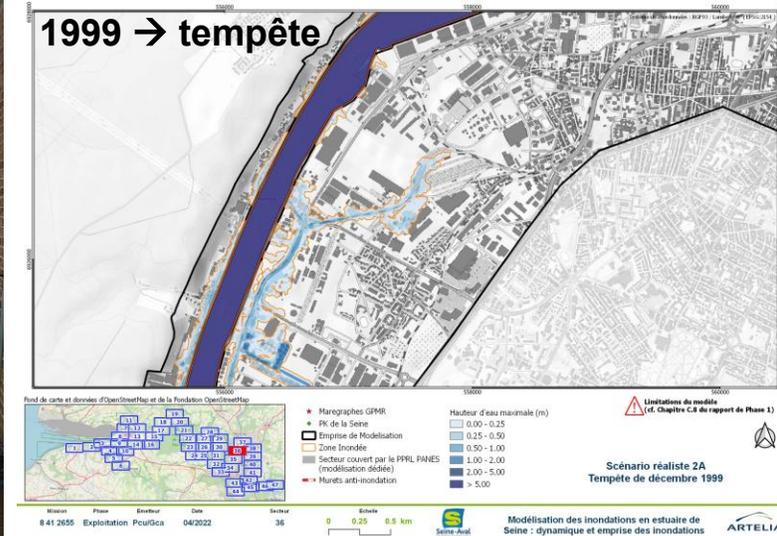
En estuaire, les **inondations** par débordement sont le résultat d'**interactions complexes** entre les **forçages amont et aval**



Aléa fluviale



Aléa fluvio-maritime



Aléa maritime



Historique des débordements

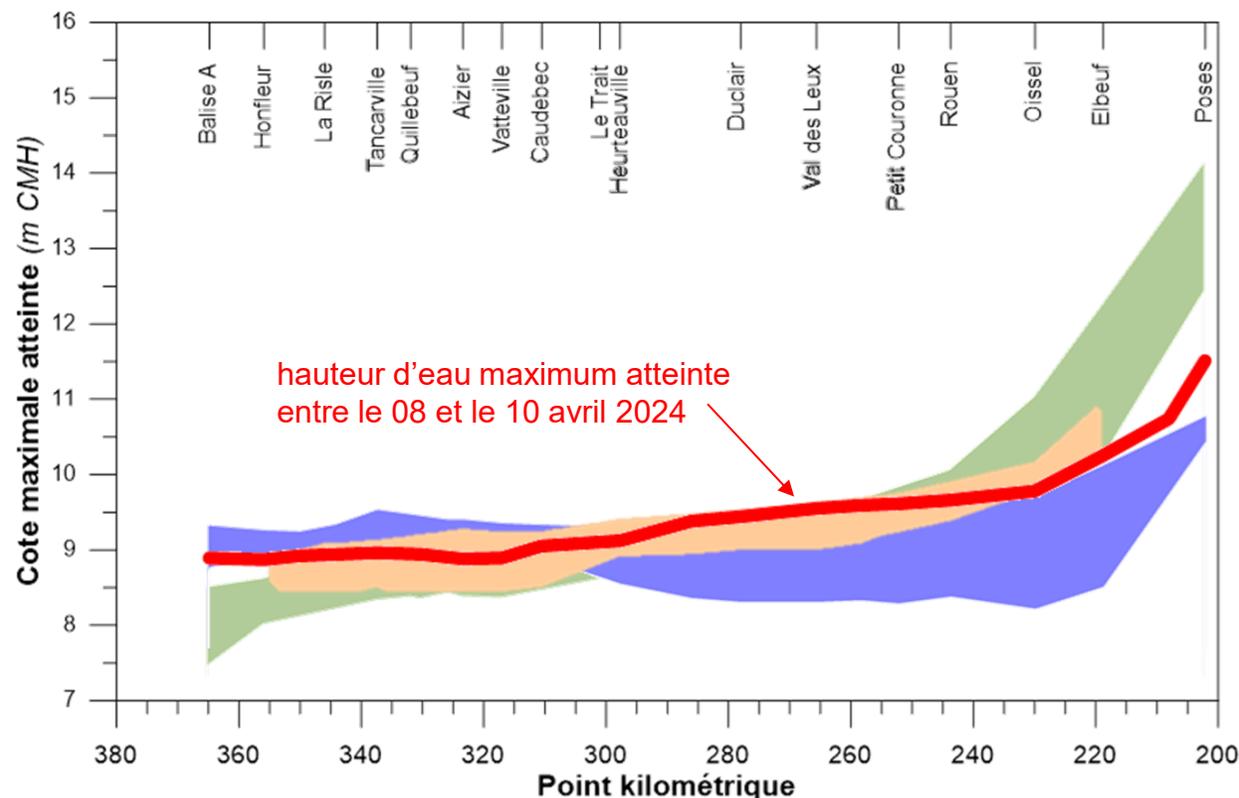
Description de l'évènement	Crue Février 1988	Tempête 1990	Crue Janvier 1994	Crue Février 1995	Tempête 1999	Crue Décembre 1999	Crue Mars 2001	Crue Fév/mars 2002	Tempête de 2004	Tempête de 2008	Tempête de 2010 « Xynthia »	Crue de février 2013	Crue de juin 2016	Tempête Eleanor de janvier 2018	Crue de janvier/février 2018	Tempête février 2020	crue mars 2020	Crue février 2021	Tempête avril 2024
Type évènement	fluvial	maritime	fluvio-maritime	fluvio-maritime	maritime	fluvio-maritime	fluvial	fluvio-maritime	maritime	maritime	maritime	fluvial	fluvial	maritime	fluvial	fluvio-maritime	fluvio-maritime	Fluvial	fluvio-maritime
Date du maximum de la crue à Rouen	19/02/1988	27/02/1990	27-28/01/1994	01-02/02/1995	03/01/1999	25/12/1999	28/03/2001	28/02/2002	17/12/2004	10-11/03/2008	28/02/2010	11/02/2013	05/06/2016	03-05/01/2018	02/02/2018	13/02/2020	12/03/2020	03-12/02/2021	08-10/04/2024
Coefficient de marée	112	106	99	104	100	104	89	111	71	106	102	106	>100	>100	>90	>100	116	50-91	>100
Débit en m3/s	1712	641	1372	2080	626	1379	2280	1563	300	579	800	1600	2010	1100 - 1300	2200	1360	1650	1950	1300 - 1500
Vent en km/h	NE - 25	SO - 79 (pointes>130)		SO - 47	108	SO - 79	S - 29	SO - 43	140		O - 100			O - 60 (rafale >100)		SO - 60/70 (rafale>110)	OSO - 30/40 (rafales>70)		O - 43 (rafales>90)
Pression atmosphérique en hPa	1028	1004		1015		993	996	1004	990	975		995	>1020	<1000	>1000	>1000	1015		1014
Surcote à l'embouchure en m									1.37		0.87					0.57	0.2-0.25		0.64-0.75

- Au moins **19 évènements débordants** significatifs en **36 ans** → 1 débordement tous les ~ **1,9 ans** !
 - 6 d'origine majoritairement **maritime**
 - 6 d'origine majoritairement **fluviale**
 - 7 d'origine **fluvio-maritime**
- Sans s'intéresser aux durées et hauteurs atteintes, **réurrence similaire entre les trois types d'évènements**

Emprise des évènements historiques*

- fluviaux
- fluvio-maritimes
- maritimes

* niveaux de pleine mer atteints lors des principales inondations recensées depuis le début du XXe siècle



GIP Seine-Aval, 2024 - Source des données : CODAH, DREAL, GIP SEINE-AVAL, HAROPA, ORMES, SHOM



Principaux outils de caractérisation de l'aléa

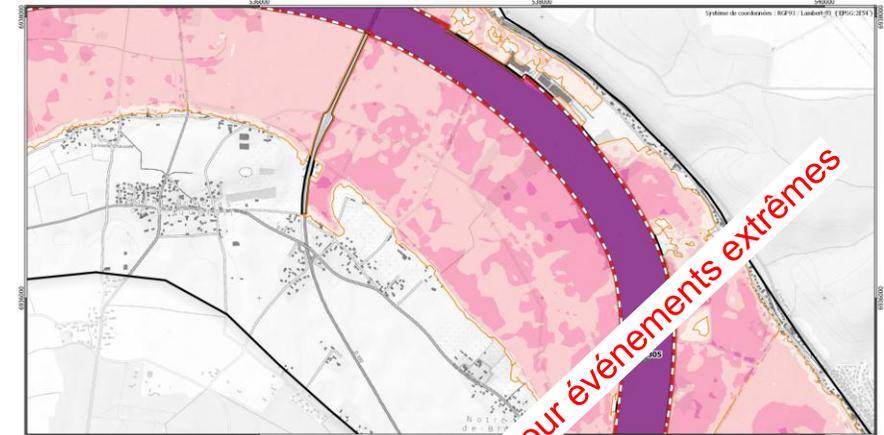
Etude statistique des chroniques temporelles

Hauteur d'eau

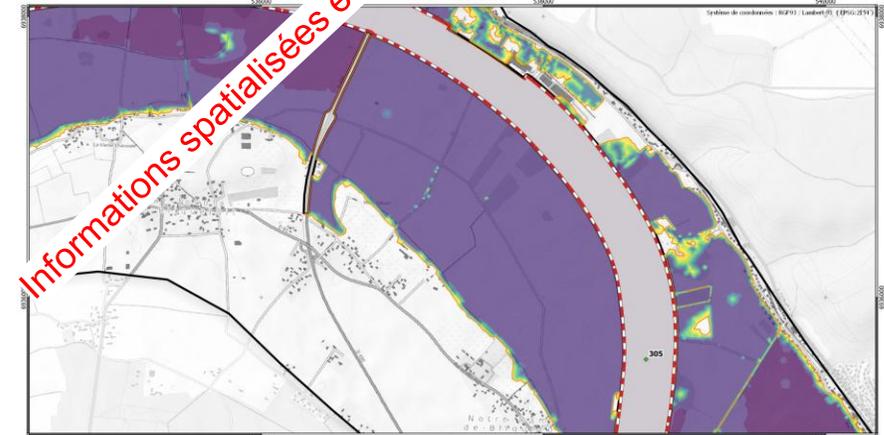
Période de retour	Balise A	Honfleur	Fatouville	Tancarville	Aizier	Caudebec	Heurteauville
T1	8,65	8,74	8,69	8,89	8,86	8,77	8,72
T2	8,76	8,85	8,79	9,03	9	8,89	8,85
T5	8,89	9,01	8,92	9,21	9,18	9,04	9,03
T10	8,99	9,12	9,02	9,35	9,32	9,16	9,16
T20	9,09	9,23	9,12	9,48	9,45	9,27	9,28
T50	9,22	9,38	9,24	9,66	9,63	9,42	9,45
T100	9,32	9,5	9,34	9,8	9,77	9,53	9,58
T200	9,42	9,61	9,43	9,93	9,93	9,64	9,71
T500	9,54	9,76	9,56	10,11	10,07	9,78	9,87
T1000	9,64	9,87	9,65	10,2	10,2	9,89	10
Période de retour	Duclair	Val des Leux	Rouen	Elbeuf	Pont de l'Arche	Poses	
T1	8,94	9,09	9,29	9,52	9,82	10,19	11,06
T2	9,08	9,22	9,7	9,67	10,11	10,59	11,52
T5	9,25	9,36	9,79	9,84	10,49	11,12	12,12
T10	9,37	9,46	9,95	9,95	10,76	11,52	12,56
T20	9,49	9,7	9,93	10,06	11,04	11,92	13,01
T50	9,65	9,9	10,12	10,2	11,4	12,45	13,59
T100	9,77	9,76	10,26	10,3	11,67	12,85	14,03
T200	9,88	9,85	10,39	10,41	11,93	13,25	14,47
T500	10,04	9,97	10,57	10,54	12,29	13,78	15,04
T1000	10,15	10,06	10,7	10,64	12,55	14,18	15,48

Inter-comparaison des événements extrêmes

Modélisation hydrodynamique



Scénario théorique 10A T100 sur le secteur maritime



Scénario théorique 10A T100 sur le secteur maritime

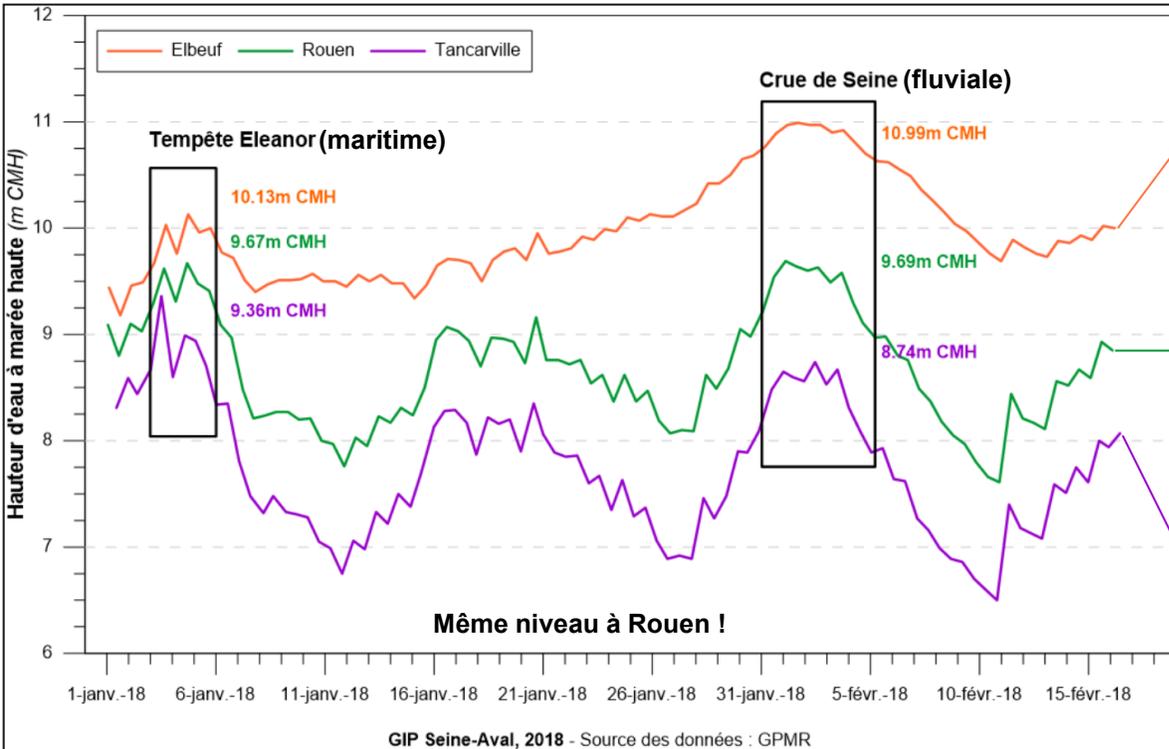
Forçages : exemple des débits

Période (ans)	Austerlitz (avant Lacs)	Austerlitz (après Lacs)	Poses (avant Lacs*)	Poses (après Lacs*)	Eure (Conf. Seine)	Risle (Conf. Seine)	Andelle (Conf. Seine**)	Cailly (Conf. Seine**)	Austreberthe (Conf. Seine**)
2	1098	1091	1650	1640	57	43	18	6.5	6
5	1538	1439	2200	2125	73	77	23	8.5	7.5
10	1768	1621	2376	2264	95	100	29	12	11
20	1988	1796	2544	2397	115	123	39	17	15
30	2115	1896	2640	2474	127	136	46	20	18
50	2273	2022	2760	2570	142	153	53	23	21
100	2487	2191	2924	2700	162	174	63	27	25
500	2981	2583	3300	3000	208	225	87	38	34

Analyses statistiques des chroniques de Hauteur d'eau

18 marégraphes en estuaire (HAROPA)

Analyse des chroniques de hauteur d'eau

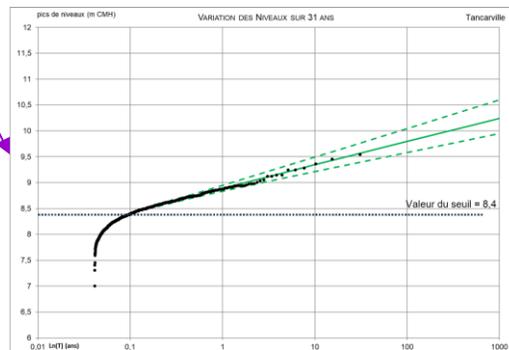
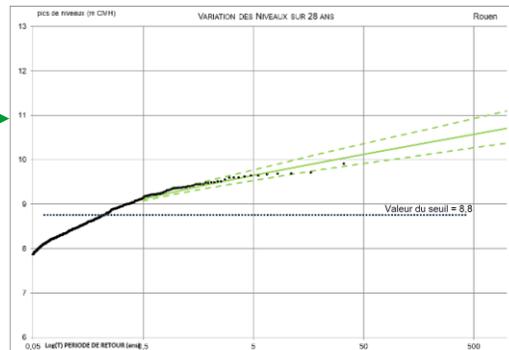
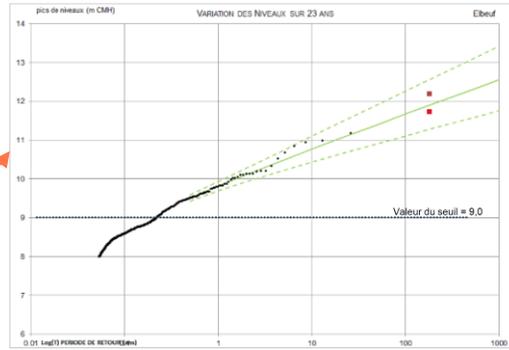


GIP Seine-Aval, 2018 - Source des données : GPMR

Principales **limites** de la démarche :

- **durée des chroniques** temporelles
- **évolution de l'aléa dans les chroniques** temporelles
- pas de prise en compte de la **durée des débordements** (pour le moment → SA7 CERES !)

Ajustement de loi statistique



Définitions de périodes de retour

T (ans)	Borne Inf.	Niveau	Borne sup.
1	9.70	9.82	9.93
2	9.93	10.11	10.28
5	10.22	10.49	10.74
10	10.43	10.76	11.10
20	10.63	11.04	11.44
50	10.90	11.40	11.91
100	11.10	11.67	12.25
200	11.30	11.93	12.60
500	11.56	12.29	13.06
1000	11.75	12.55	13.41

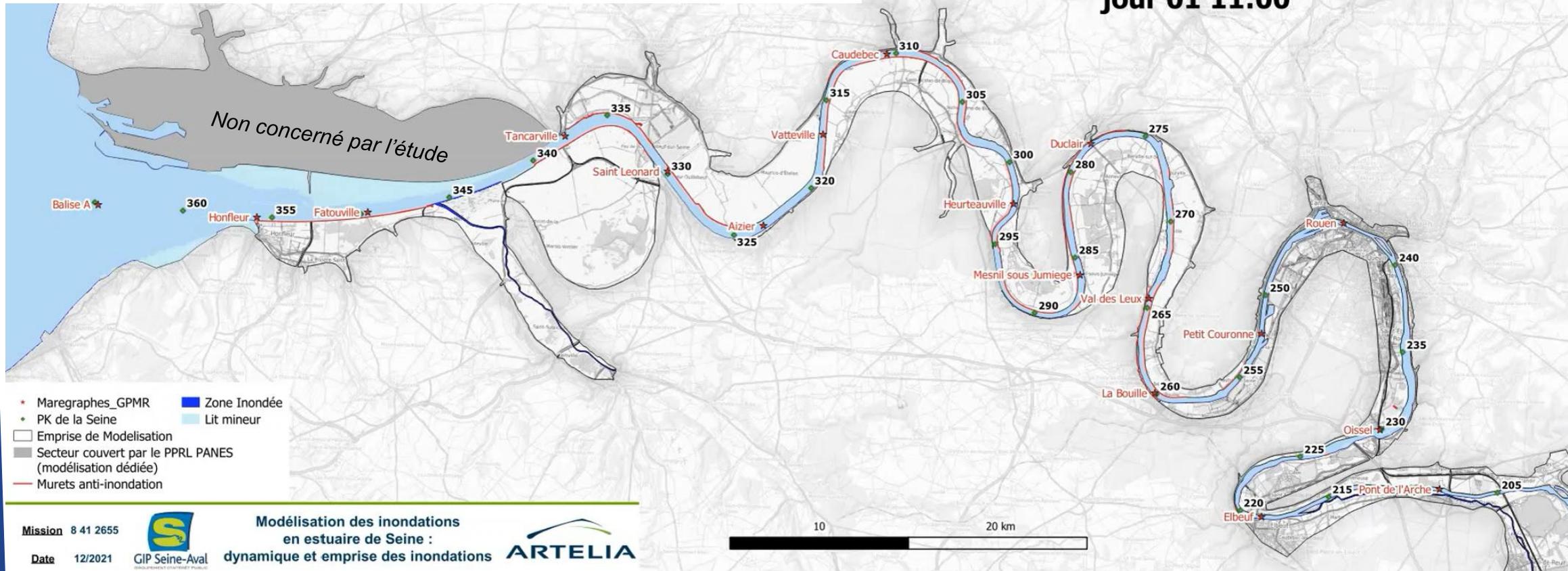
T (ans)	Borne Inf.	Niveau	Borne sup.
1	9.23	9.29	9.34
2	9.37	9.45	9.53
5	9.53	9.65	9.77
10	9.65	9.79	9.95
20	9.77	9.93	10.13
50	9.91	10.12	10.36
100	10.02	10.26	10.53
200	10.13	10.39	10.70
500	10.27	10.57	10.93
1000	10.37	10.70	11.10

T (ans)	Borne Inf.	Niveau	Borne sup.
1	8.83	8.89	8.95
2	8.95	9.03	9.11
5	9.10	9.21	9.33
10	9.21	9.35	9.49
20	9.33	9.48	9.66
50	9.47	9.66	9.88
100	9.58	9.80	10.04
200	9.69	9.93	10.21
500	9.84	10.11	10.43
1000	9.95	10.24	10.60

Modélisation hydrodynamique basée sur les processus

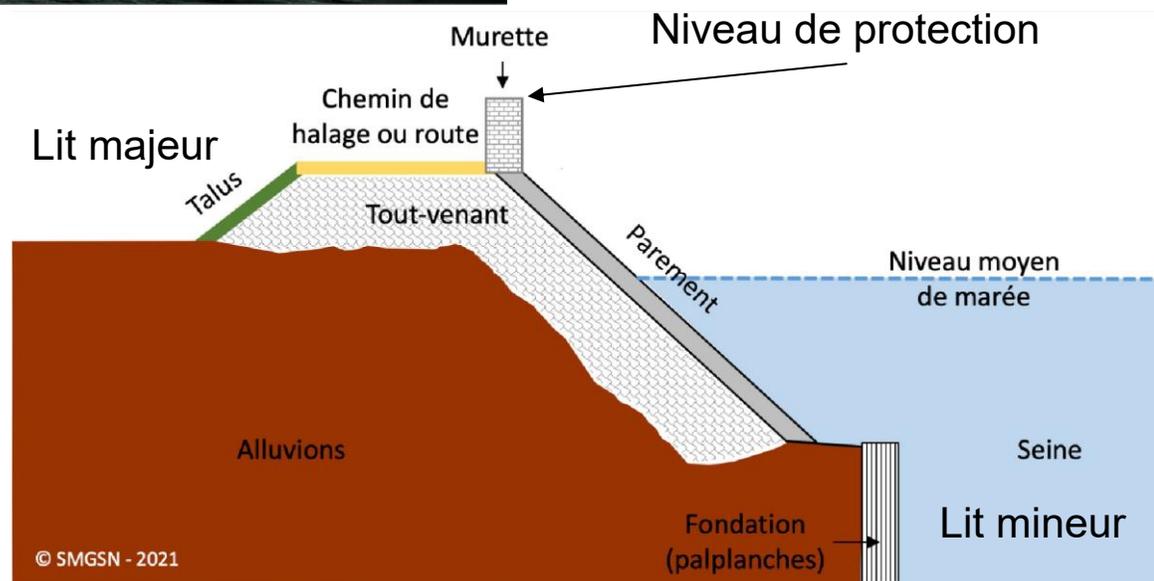
Une fois un **modèle** « process-based » **calé** et **validé**, il permet :

- de **spatialiser l'information** (e.g. hauteur d'eau, vitesse des courants et de remplissage...)
- de comprendre les **interactions** entre les **forçages** et leurs impacts sur l'**hydrodynamique** estuarienne
- d'effectuer de la **prévention**
- d'effectuer des **simulations théoriques** ou **prospectives**



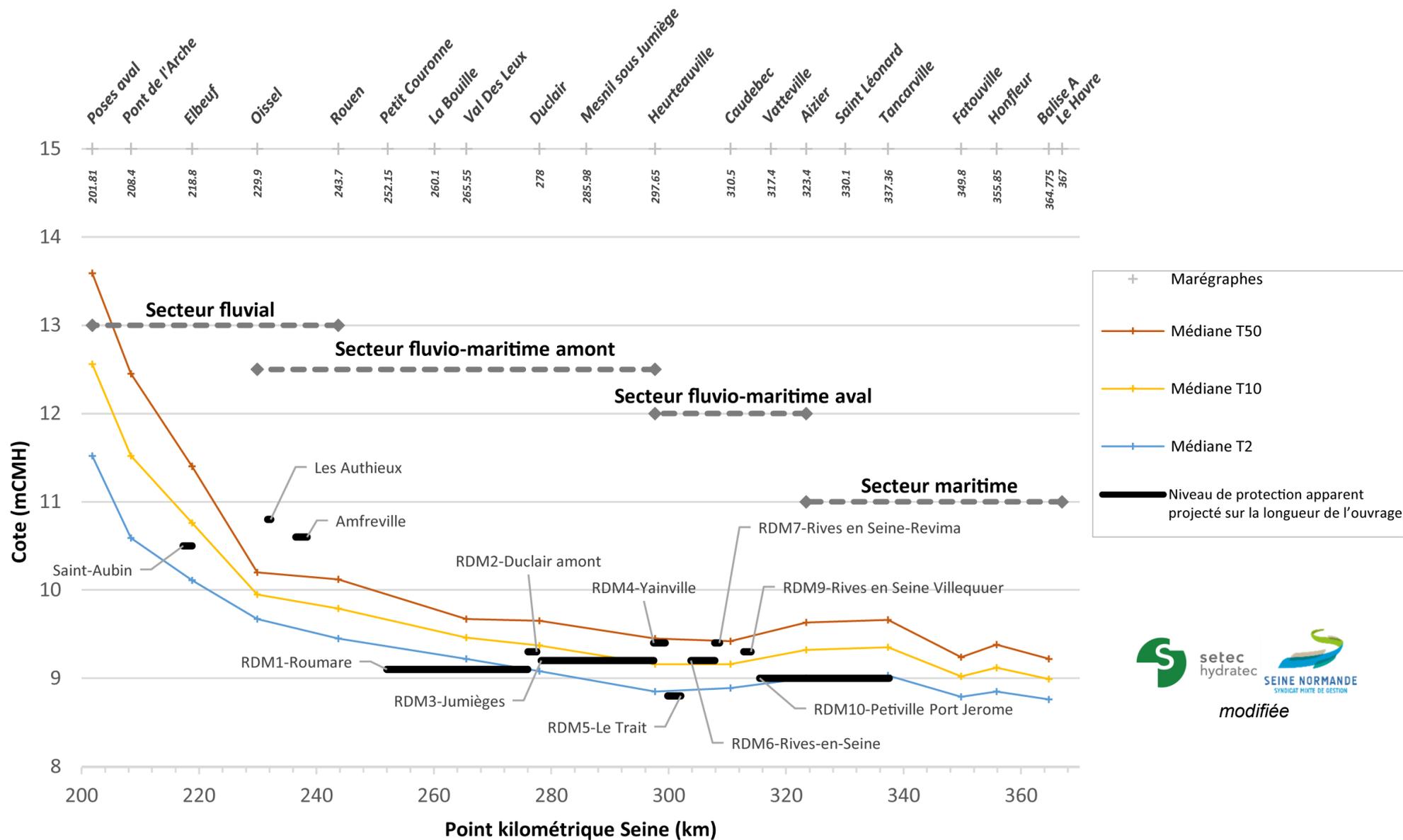
L'état actuel de la lutte contre les inondations

Principalement via des ouvrages de protection de type digue



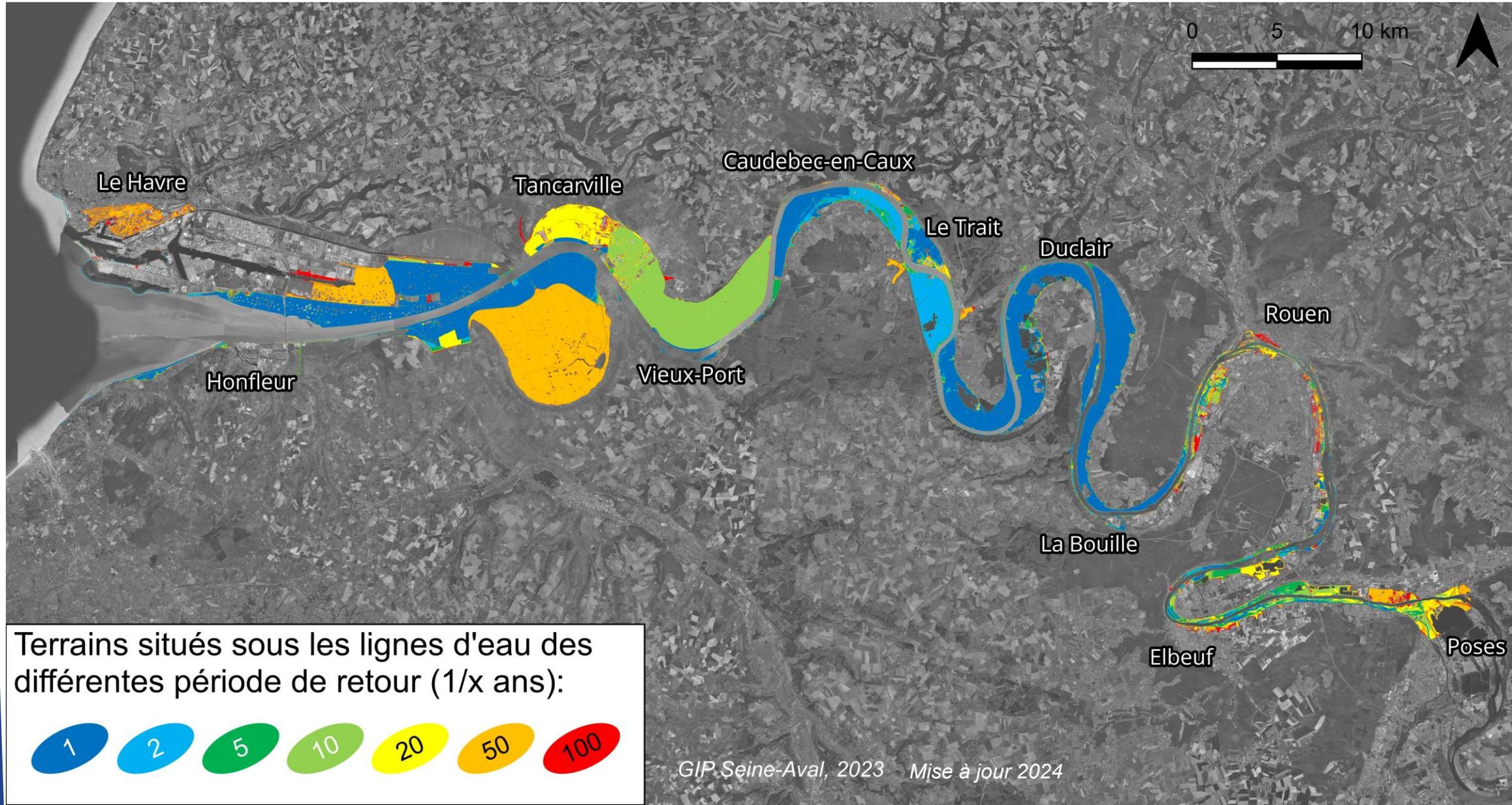
L'état actuel de la lutte contre les inondations

Principalement basée sur des **digues** anciennes avec des **niveaux de protection faibles** (SMGSN, 2024)



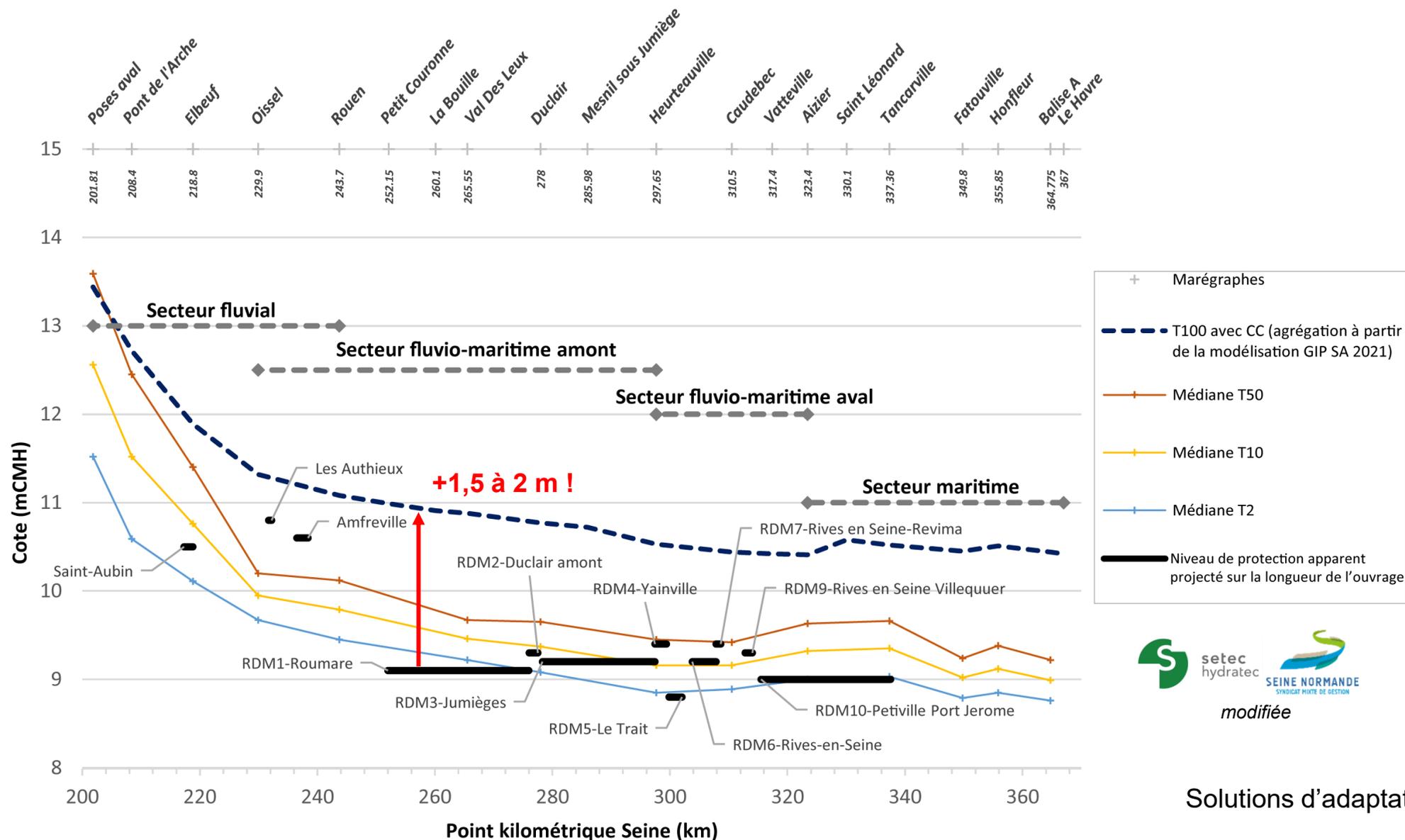
L'état actuel de la lutte contre les inondations

Presque la totalité de la vallée de Seine est sous le niveau T100



L'état actuel de la lutte contre les inondations

Un véritable défi de maintenir ce type de protection

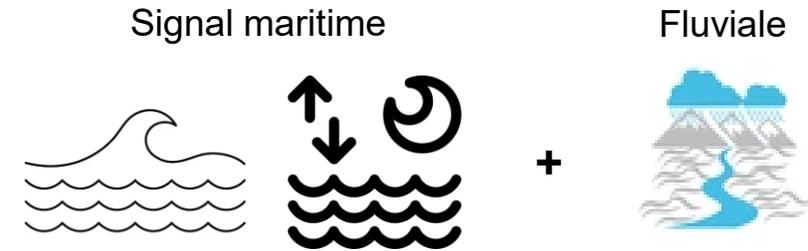


Evolution des facteurs influençant l'aléa inondation par débordement

Quels sont les paramètres influençant l'aléa inondation par débordement ?



1. Les forçages



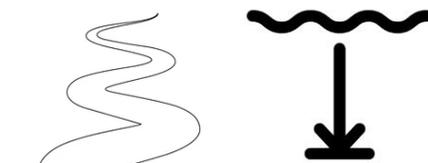
2. Le niveau marin

Niveau marin



3. La morphologie de l'estuaire

Morphologie générale et du fond

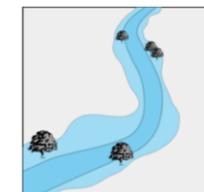


Dans le cas d'un estuaire
fortement anthropisé



Connectivité latérale

4. Les connexions entre lit mineur et majeur

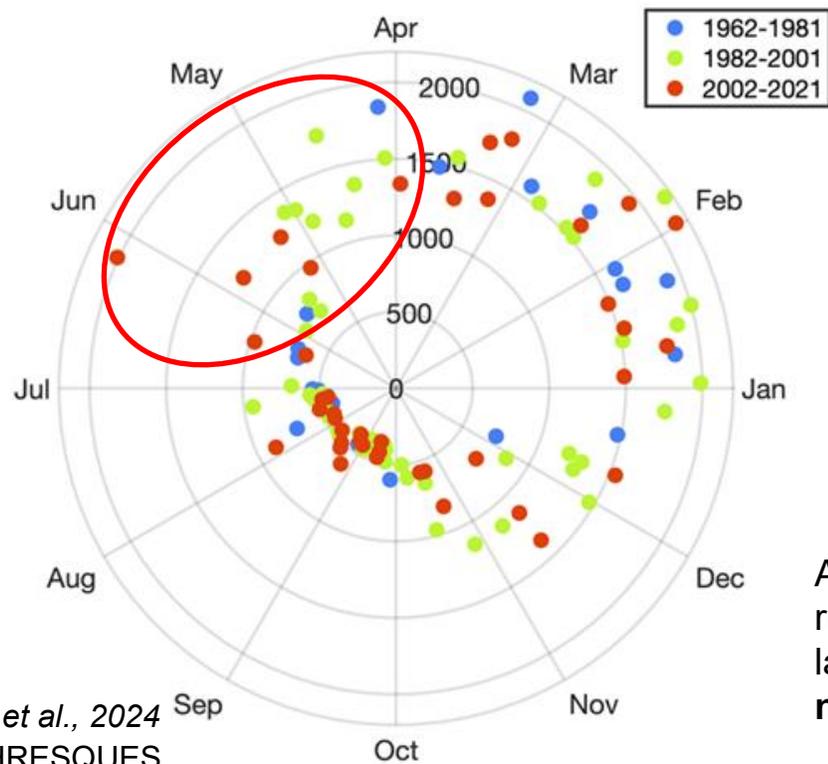


Evolution des facteurs influençant l'aléa inondation par débordement

1. Evolution des débits extrêmes à l'entrée de l'estuaire

- 1992-2022 : évolution du percentile 95 des débits journaliers = pas d'évolution (GIP Seine-Aval)
 - 1990-2023 : évolution de la fréquence du nombre de jour supérieur au percentile 95 = pas d'évolution (BRGM)
- **Pas d'évolution** nette des **débits extrêmes** à l'entrée de l'estuaire

Evolution des débits extrêmes saisonniers → Seuil évolutif fixé grâce au P90 calculé sur 30j autour de la mesure



Augmentation du nombre d'événements de débit extrême :

- 1962-1981 : 22
- 1982-2001 : 51
- 2002-2021 : 40

→ **Plus d'événements extrêmes fin printemps**

Attention, les **débits à l'entrée de l'estuaire** sont la résultante de la **pluviométrie**, la sécheresse des **sols**, la **réactivité** des **bassins** versants, du niveau des **nappes** mais également de la **gestion humaine** !

Période (ans)	Poses (avant Lacs*)	Poses (après Lacs*)
2	1650	1640
5	2200	2125
10	2376	2264
20	2544	2397
30	2640	2474
50	2760	2570
100	2924	2700
500	3300	3000

m³/s

Verney et al., 2024
SA7 PHRESQUES

Les webinaires de l'estuaire #8 – 06 octobre 2025

Artélia, 2019. SA7

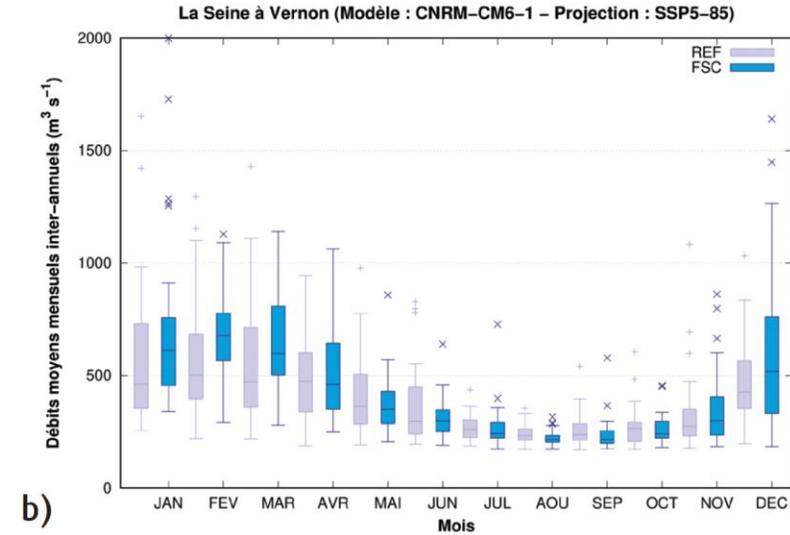
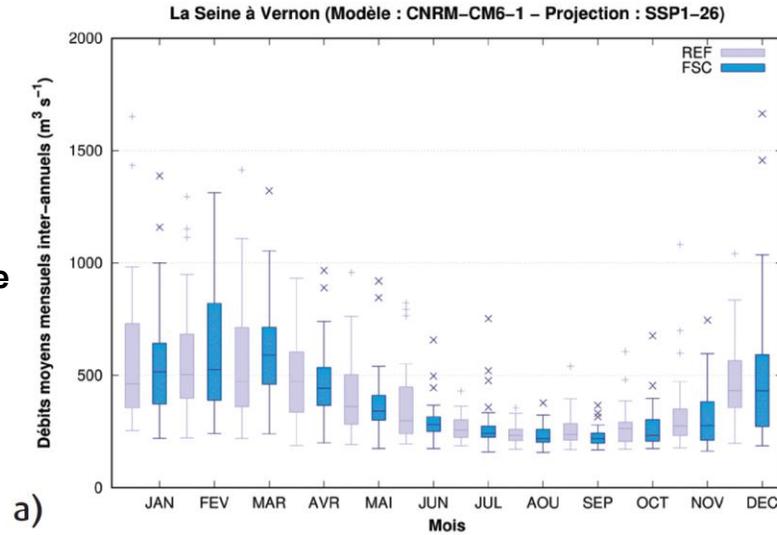


Evolution des facteurs influençant l'aléa inondation par débordement

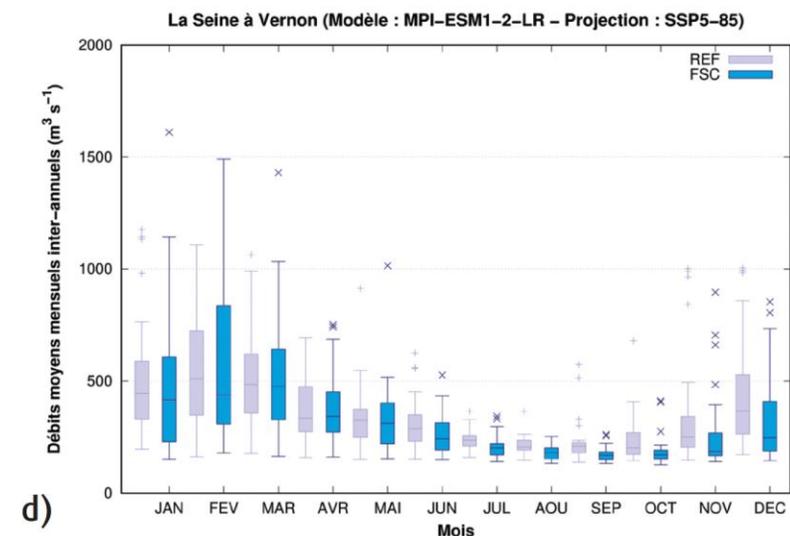
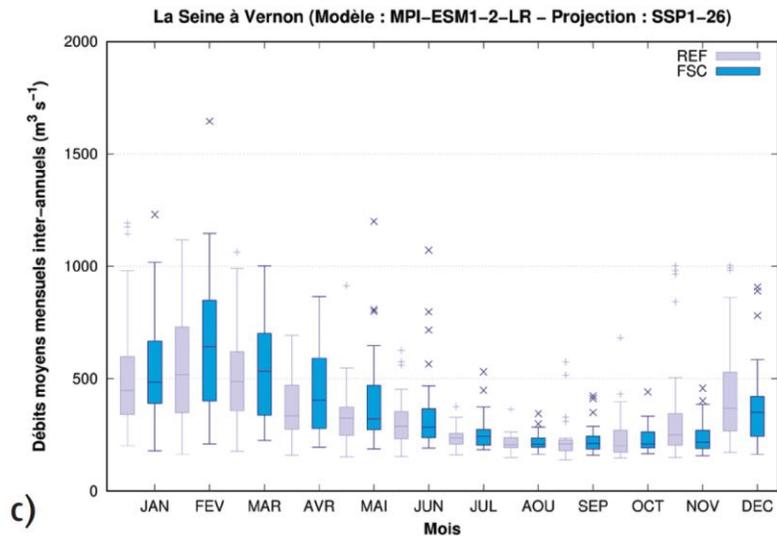
1. Débit de la Seine à Vernon

Régime hydrologique en fin de XXIe siècle (2066-2100)

trajectoire humide



trajectoire sèche



scénario socio-économique optimiste

scénario socio-économique pessimiste

Flipo et al., 2024

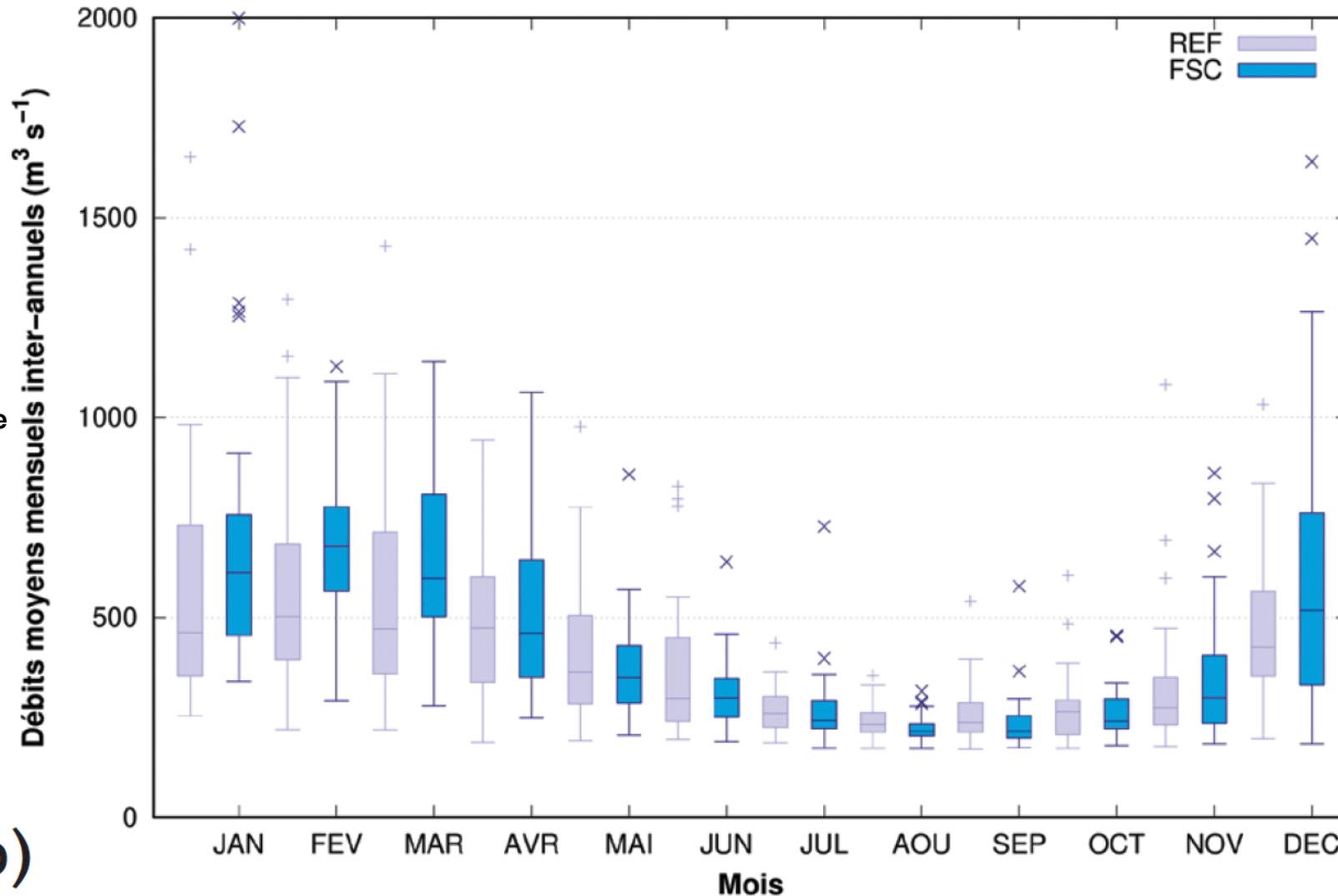


Evolution des facteurs influençant l'aléa inondation par débordement

1. Débit de la Seine à Vernon

Régime hydrologique en fin de XXI^e siècle (2066-2100)

La Seine à Vernon (Modèle : CNRM-CM6-1 – Projection : SSP5-85)



- Tendence d'évolution se sépare nettement du régime actuel à la fin du XXI^{ème} siècle
- **Renforcement de la variabilité saisonnière** (scénarios pessimistes particulièrement)
- Scénarios pessimistes aboutissent à de **fortes augmentations des débits hivernaux** qui renforcent le risque d'inondation, ainsi qu'à une « **saison des crues** » rallongée
- « Les scénarios pessimistes mènent en quelque sorte à une double peine », **étiages plus sévères** et plus long et **crues hivernales plus violentes** et régulières

Pour aller plus loin, voir travaux du PIREN Seine et Explore2

Flipo et al., 2024

trajectoire humide

b)

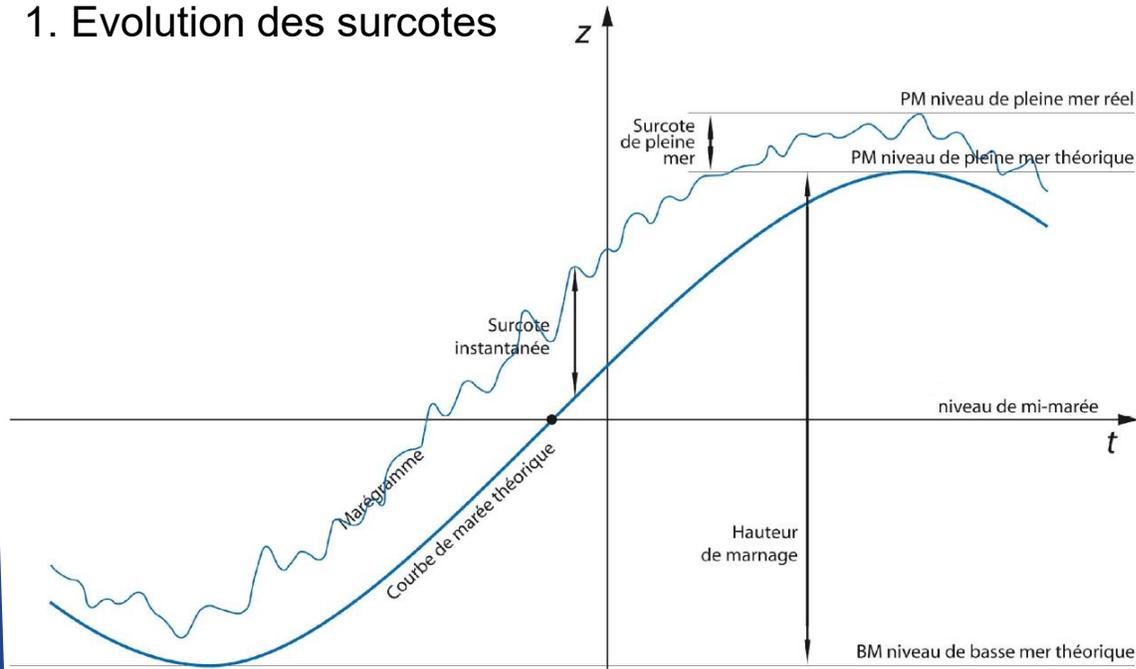
scénario socio-économique pessimiste



GIP Seine-Aval
GROUPEMENT D'INTERET PUBLIC

Evolution des facteurs influençant l'aléa inondation par débordement

1. Evolution des surcotes



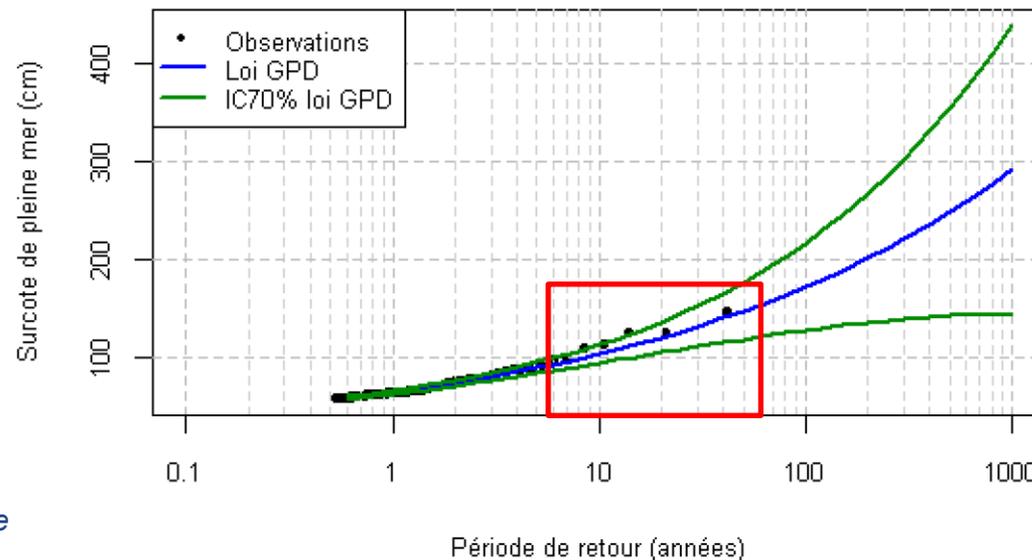
Longueur de l'échantillon de surcotes horaires de pleine mer : 41,4 années (1938 à 2012).

Loi GPD – Seuil : 57 cm

Période de retour (années)	5	10	20	50	100	1000
Surcote de Pleine mer (cm)	90	104	120	147	172	291
Intervalle de confiance à 70% (cm)	84 - 95	94 - 113	105 - 136	118 - 176	127 - 216	143 - 439

146 cm le 16/10/1987 = T50

(Source : CETMEF, 2013)



- 8 événements observés > T5 entre 1938 et 2012

Attention, chroniques incomplètes

- Evolution future des surcotes de pleine mer ?



Evolution des facteurs influençant l'aléa inondation par débordement

2. Le niveau marin

Niveau moyen au Havre (source SONEP):

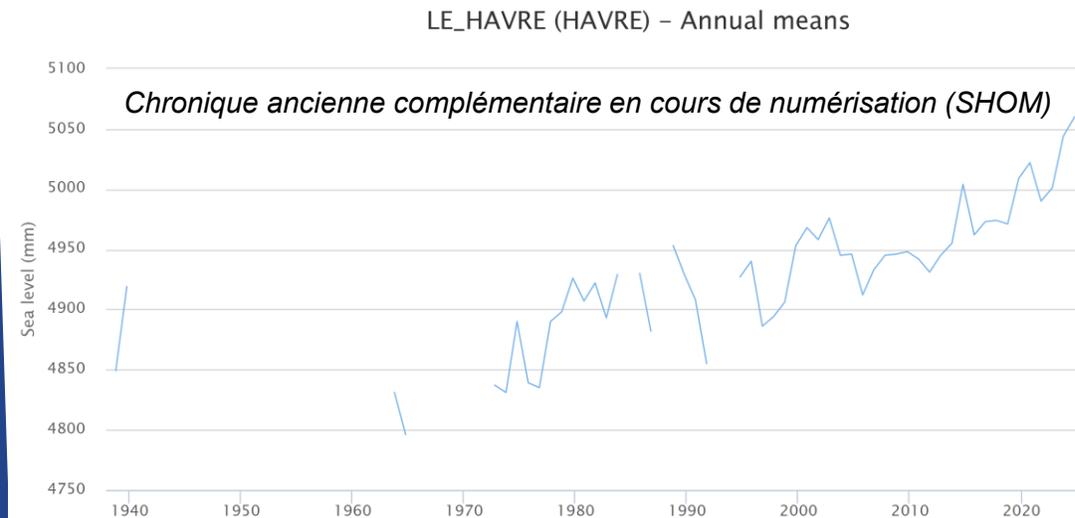
- 1972 : 4,837 m (CMH)
- 2024 : 5,060 m (CMH)

→ Soit + **22,3 cm** en **52 ans**

→ Soit + **~4,3 mm/an**

→ A ce rythme + **~32,7 cm** en 2100*

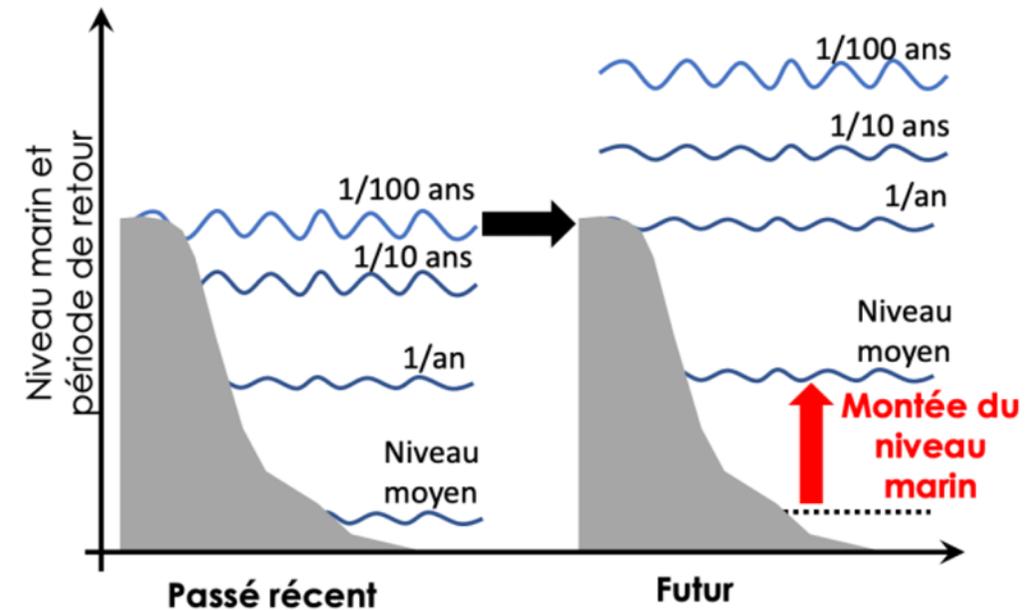
*sans accélération dû dérèglement climatique



Validated data



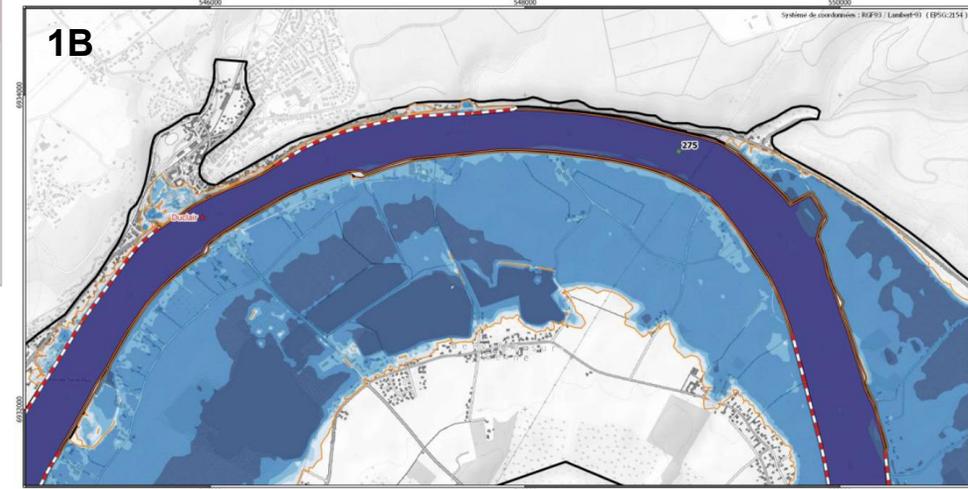
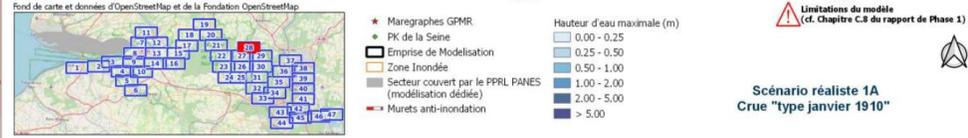
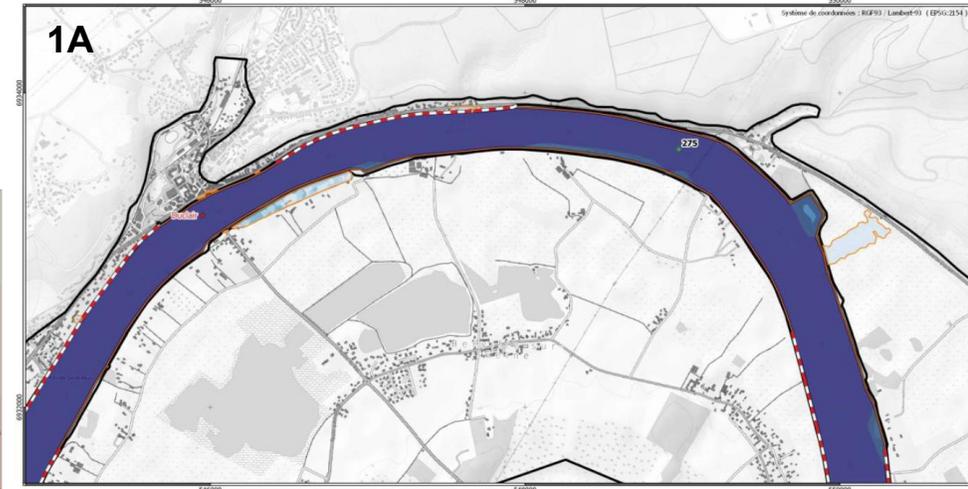
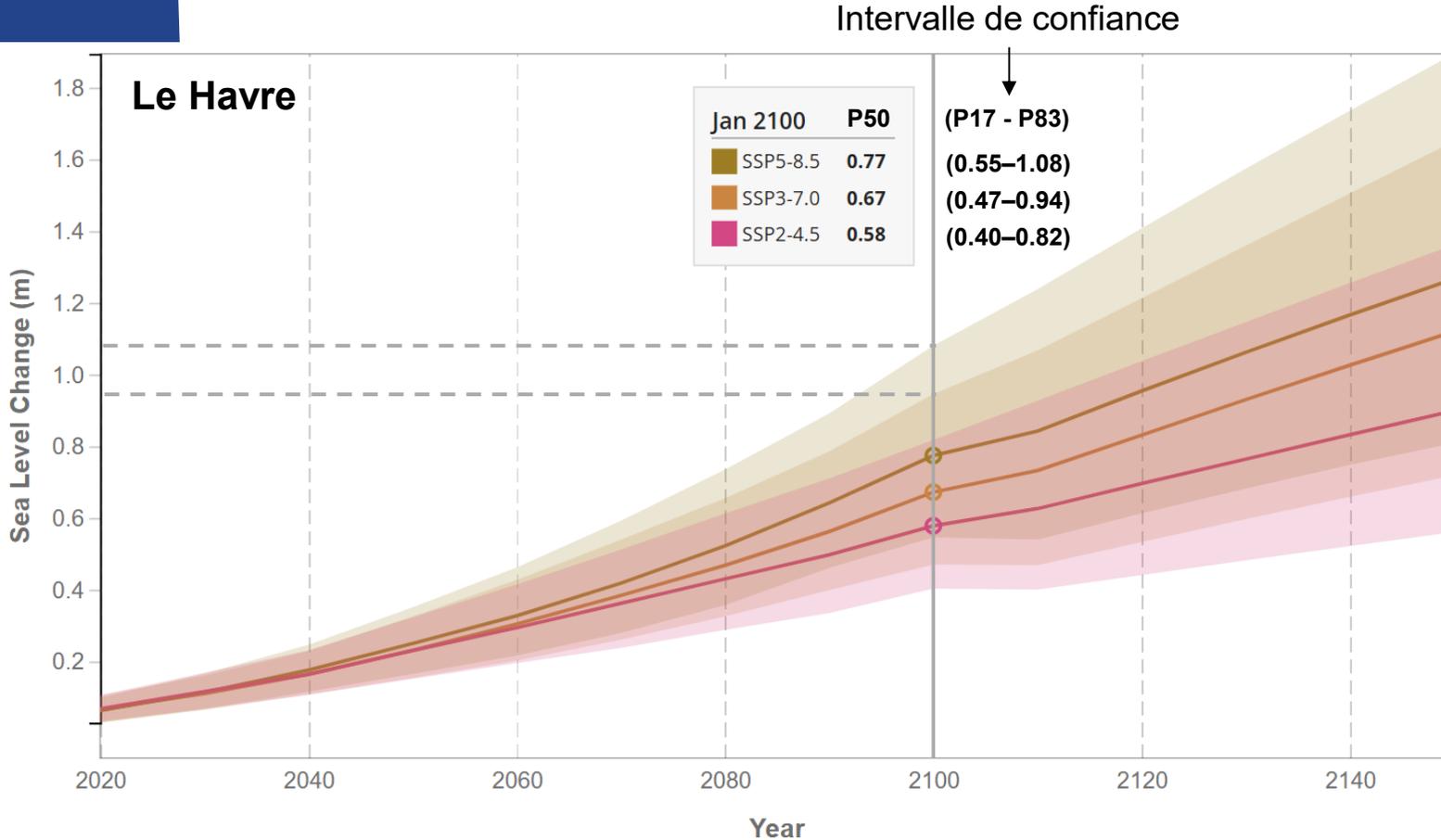
Data source: REFMAR



Evolution des facteurs influençant l'aléa inondation par débordement

Artélia, 2022. SA7

2. Le niveau marin



Pour aller plus loin : Laborie V., 2024. SA7 ATLANTIS

Les webinaires de l'estuaire #8 – 06 octobre 2025

Evolution des facteurs influençant l'aléa inondation par débordement

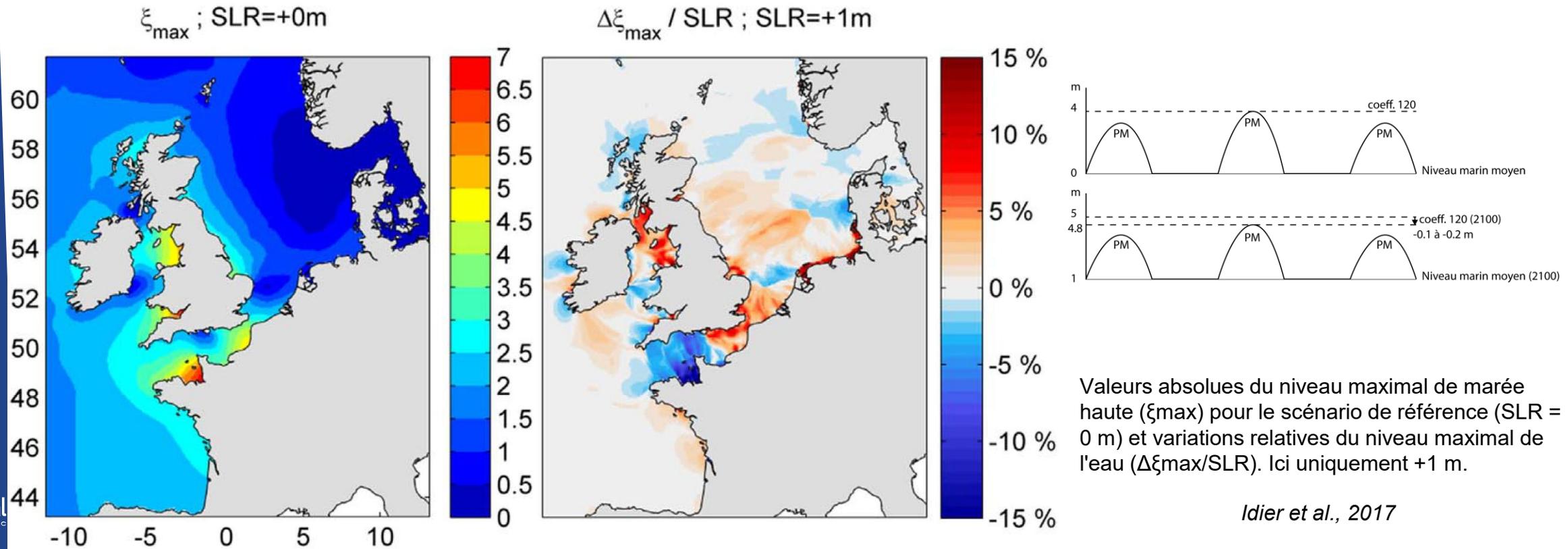
1. Evolution de la marée dans le passé

Très compliqué à analyser et les études à comparer entre elles (pour aller plus loin : Woodworth et al., 1991, **Haight et al., 2010**)

Résumé des conclusions de la bibliographie :

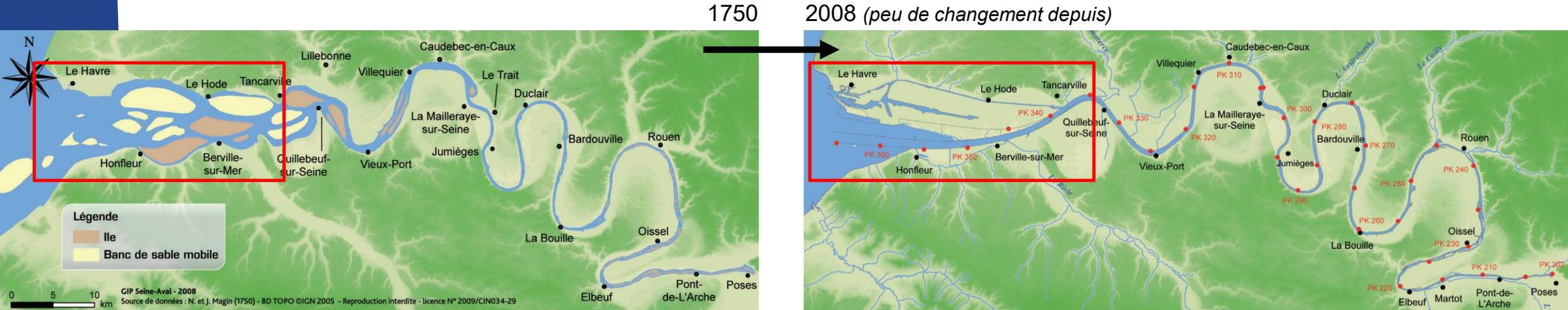
- une **légère augmentation** (0,1 à 0,3 mm/an) de la **moyenne annuelle des marées hautes d'origine astronomique** en manche (depuis 1900, la majorité des chroniques étudiées démarrent après 1950).
- les **tendances du niveau moyen annuel des marées hautes** sont **considérablement plus faibles** que celles du **niveau moyen de la mer**.

1. Evolution future potentielle de la marée

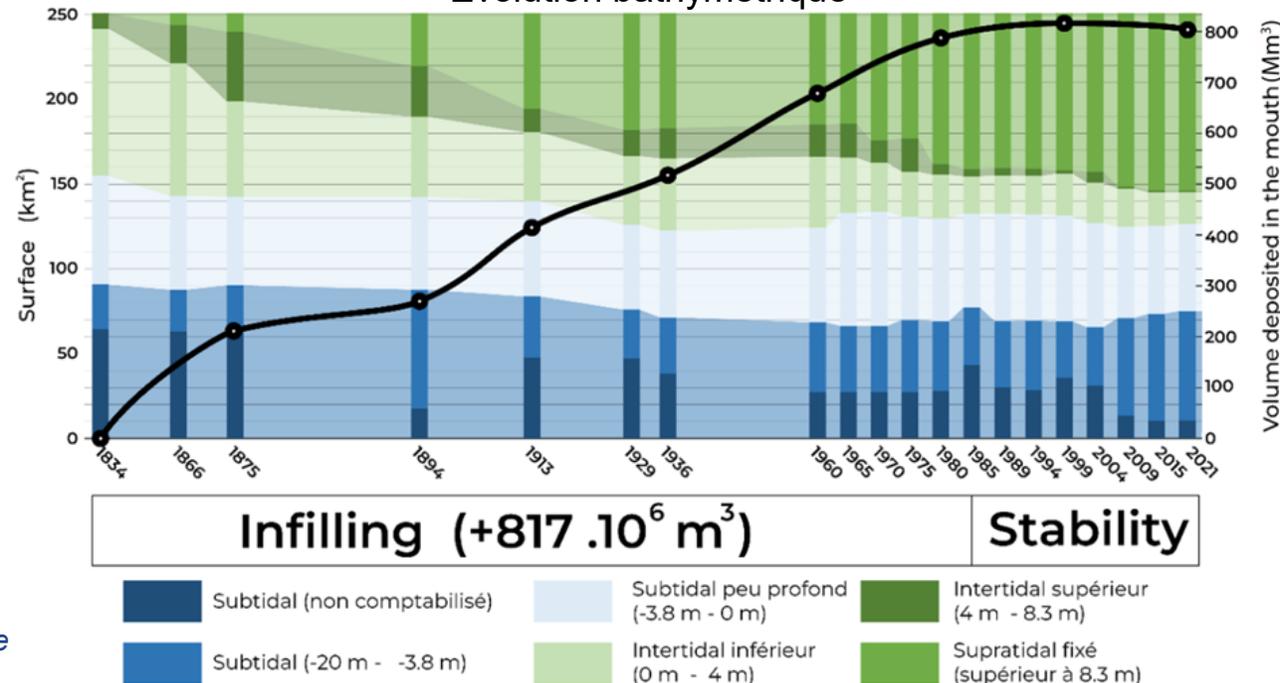


Evolution des facteurs influençant l'aléa inondation par débordement

3. La morphologie de l'estuaire



Évolution bathymétrique

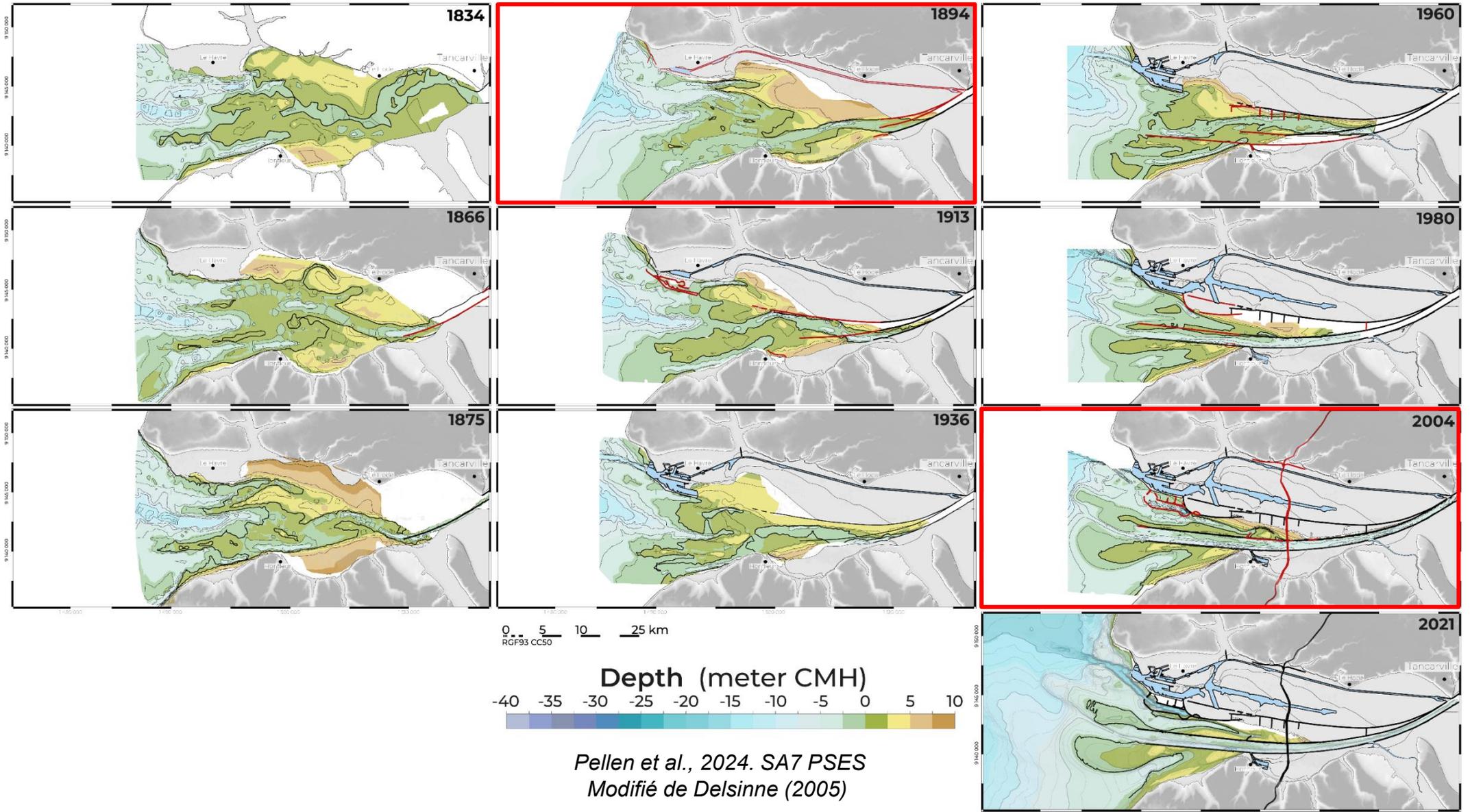


Secteur de l'embouchure
 intertidal inférieur (0-4m CMH) :
 22% → 8%
 intertidal supérieur (4-8.3m CMH) :
 16% → 1%

Pellen et al., 2024. SA7 PSES

Evolution des facteurs influençant l'aléa inondation par débordement

3. La morphologie de l'embouchure l'estuaire



Evolution des facteurs influençant l'aléa inondation par débordement

3. La morphologie de l'estuaire → conséquences sur les niveaux d'eau

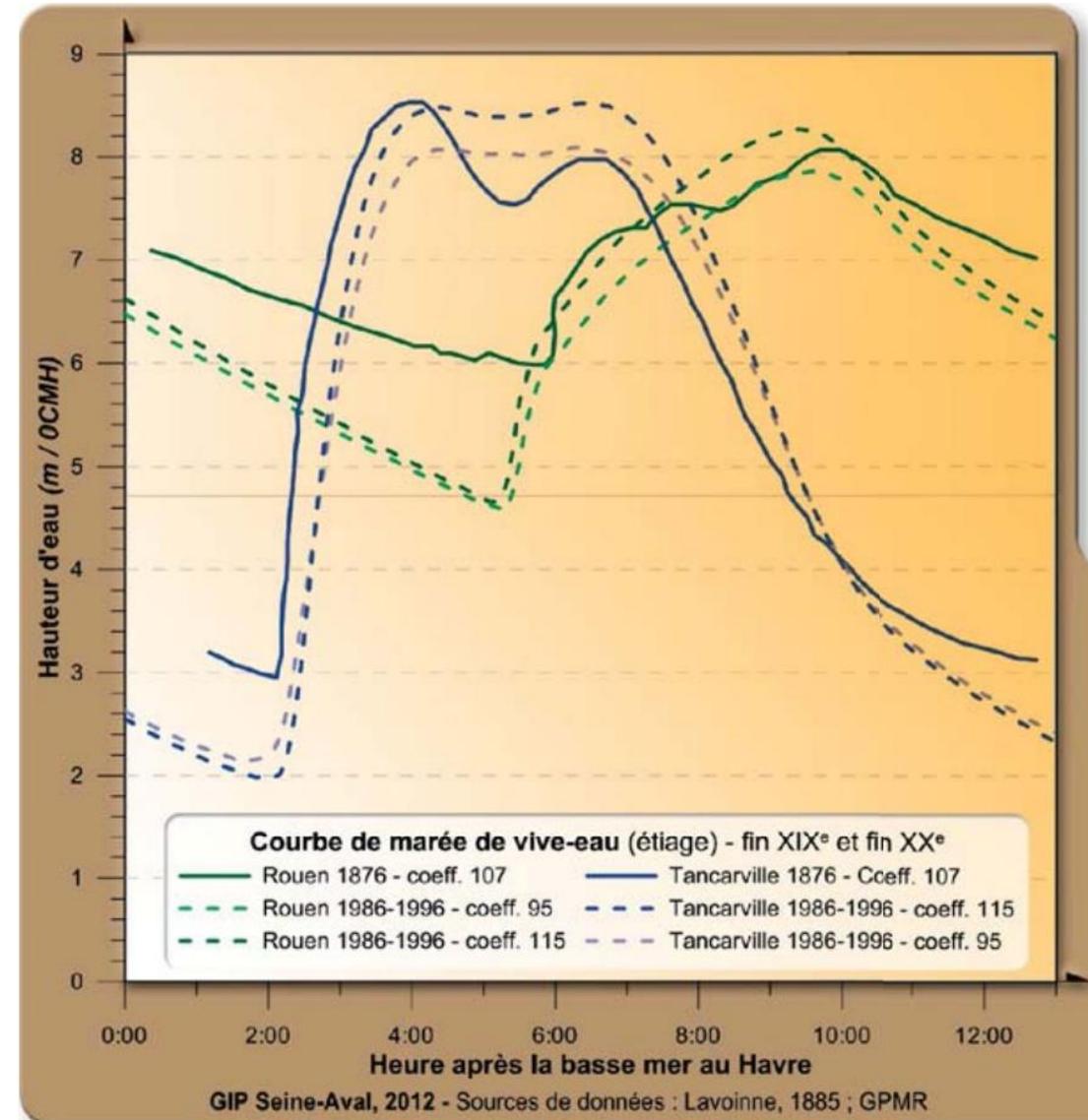
Date	Type de courbe	Conditions et coefficient de marée	Débit à Poses (m ³ .s ⁻¹)	Marnage à Rouen (m)
1856	Locale (18 août)	Vive-eau	-	1,2
1876	Locale (26 sept.)	Vive-eau	107	2,1
1970	Locale (17 oct.)	Vive-eau	95	2,7
1996	Statistique (1986-1996)	Vive-eau	101	3,3
2006	Statistique (1990-2006)	Vive-eau	95	3,3

Modification de la propagation de la marée (éventuelles surcotes également)

- **Marnage plus important**
- Principalement sur les **basses mers**
- **Tenue de plein plus importante à l'aval**

En termes d'inondation :

- événements **maritimes se propagent plus à l'amont** dans l'estuaire
- marées hautes plus importantes (hauteur et tenue de plein)
- **Évacuation des crues plus rapide** (e.g. forçages crue 1910, impact fortement diminué avec morphologie actuelle)



Evolution des facteurs influençant l'aléa inondation par débordement

3. La morphologie du fond de l'embouchure (*pas morphologie générale les frontières de l'estuaire étant fixées par l'Homme*)

1. **Tendance d'évolution** récente (10 à 20 ans) = **sédimentation sur les bancs de l'embouchure et érosion dans les chenaux**
2. **Simulations prospectives long-termes (50 ans)** réalisées sur la base des forçages de l'année hydrologique 2014-2015 : Grasso et al., 2021. SA7 MORPHOSEINE

La **même tendance d'évolution** est simulée et observée

En présence d'apport sédimentaire suffisant → la **bathymétrie évolue de la même manière peu importe la hausse du niveau marin**

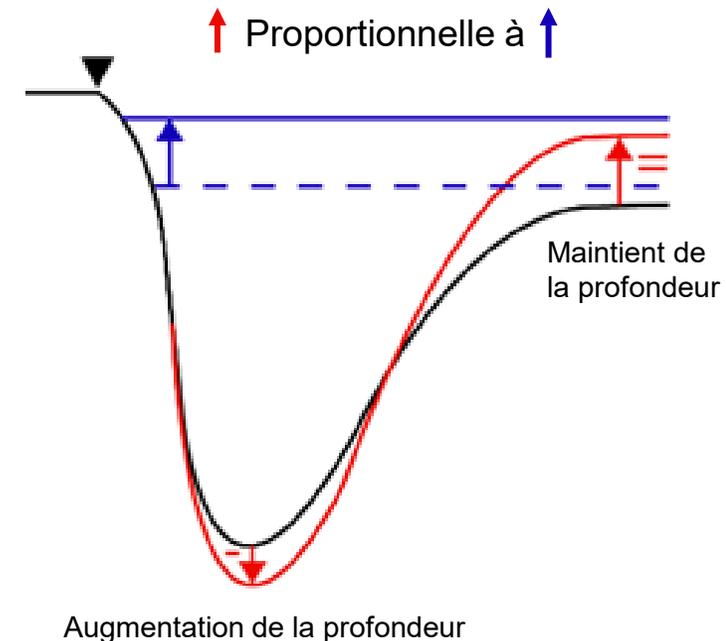
i.e. l'évolution morphologique est différente, mais la profondeur sous le niveau marin moyen est la même en 2066 pour une élévation de 0,135 m ou 1,08 m

3. La **sédimentation et l'érosion simulée est donc proportionnelle à la hausse du niveau marin** (mais en présence de **forçages/apports** sédimentaires **différents** ?)

Des **chenaux plus profonds** et des **bancs à la même profondeur**
→ Quelles **conséquences sur les inondations** ?

Idem pour des **évolutions bathymétriques différentes de l'embouchure** ?

→ réponses à venir SA7 ATLANTIS

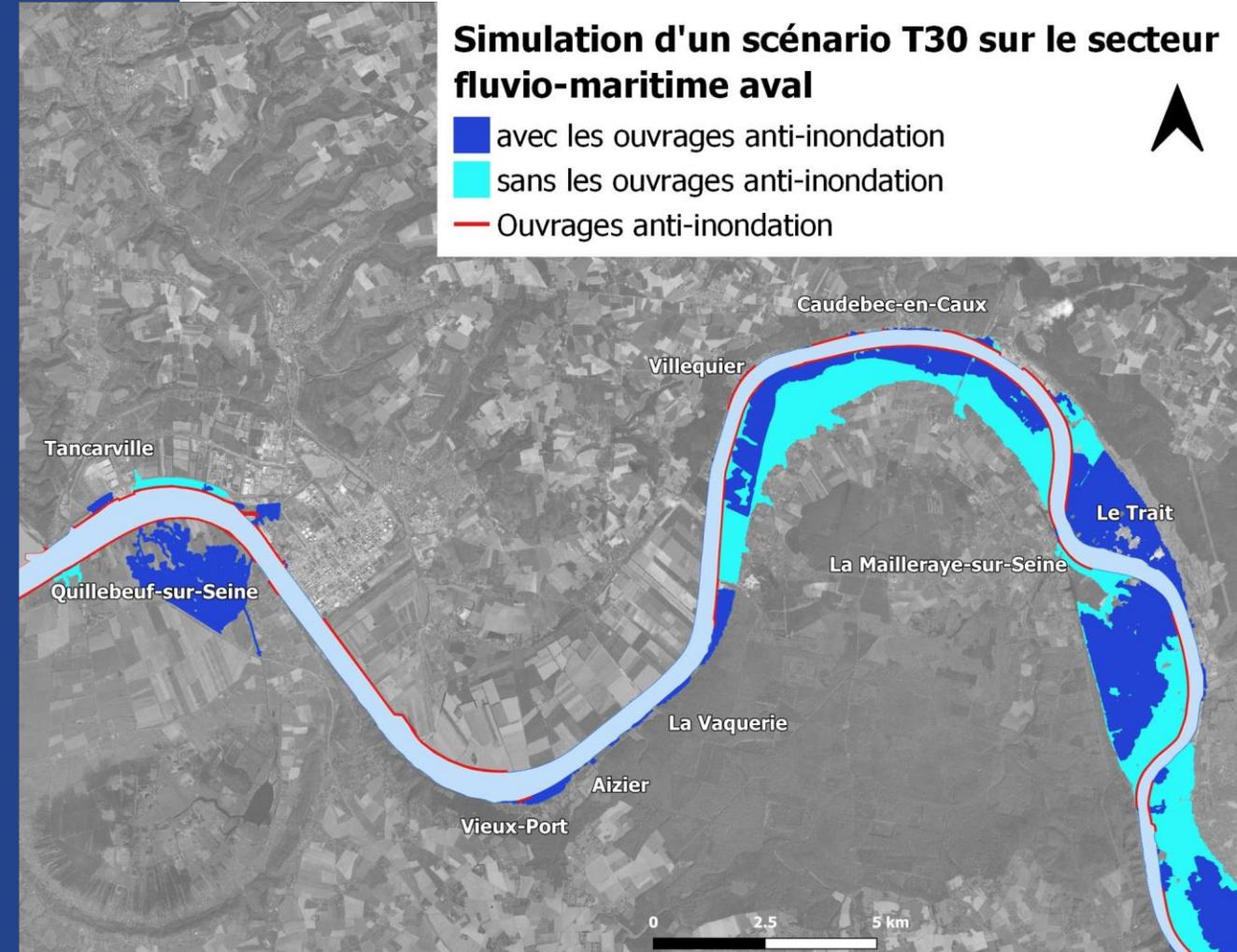


Evolution des facteurs influençant l'aléa inondation par débordement

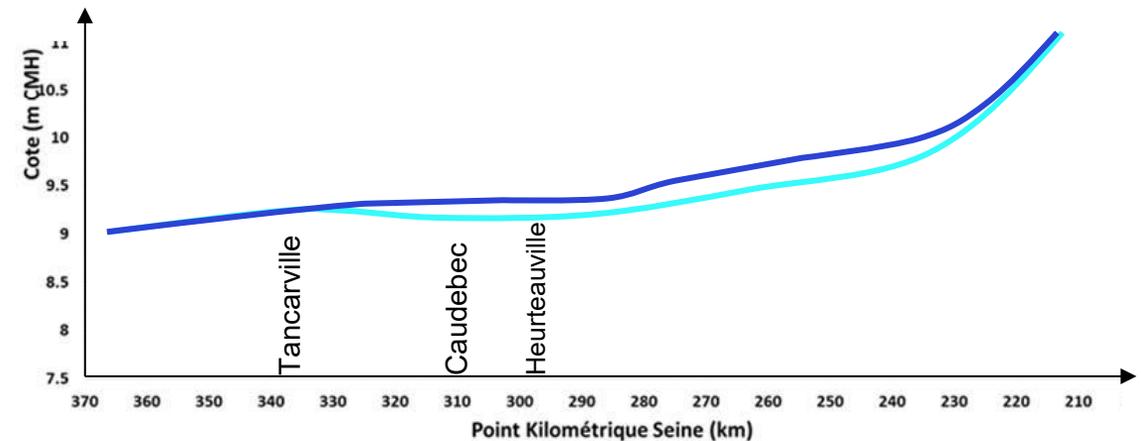
4. Les connexions lits mineur/majeur → exemple de l'aléa maritime

Simulation d'un scénario T30 sur le secteur fluvio-maritime aval

- avec les ouvrages anti-inondation
- sans les ouvrages anti-inondation
- Ouvrages anti-inondation



T30 - Heurteauville



~ + 17 % de surfaces inondées

~ - 23 cm en lit mineur à Rouen

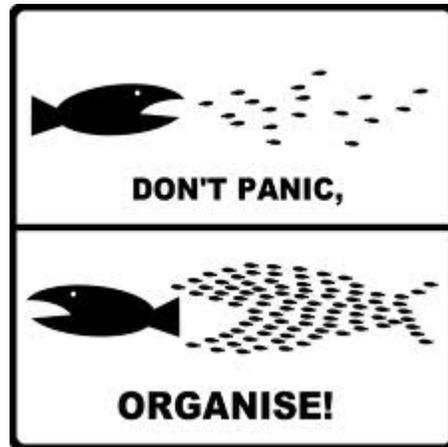
→ 23 cm = passage d'un T100 à un T30 à Rouen !!!

Artélia, 2022. SA7

Les webinaires de l'estuaire #8 – 06 octobre 2025

Vers des solutions d'adaptations

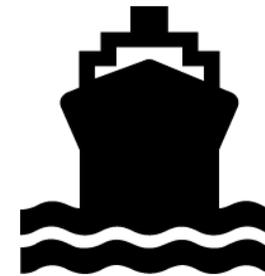
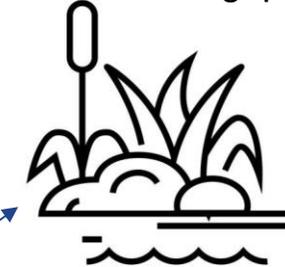
4. Les connexions lits mineur/majeur, une opportunité d'adaptation ?



Réduire l'aléa inondation



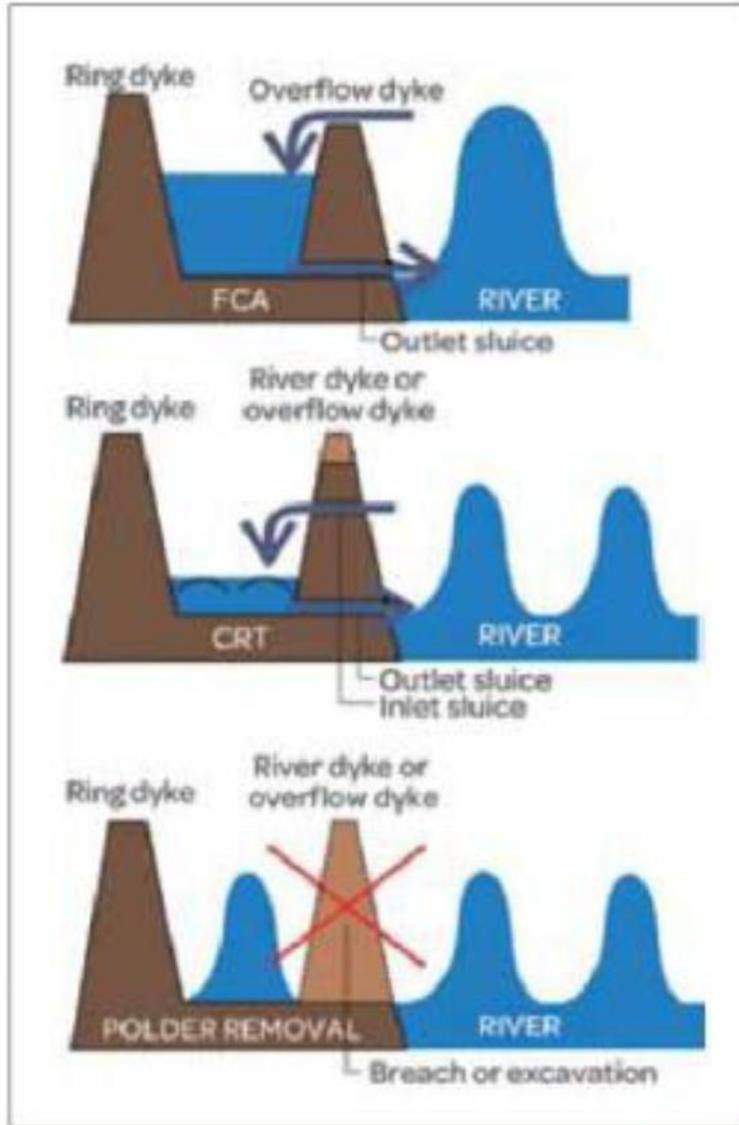
Gains écologiques



Maintient de la navigation

Vers des solutions d'adaptations

4. Les connexions lits mineur/majeur, une opportunité d'adaptation ?



(Maris & Vanlede, 2024 & 2025)



Vers des solutions d'adaptations



Summer 2021



Summer 2022

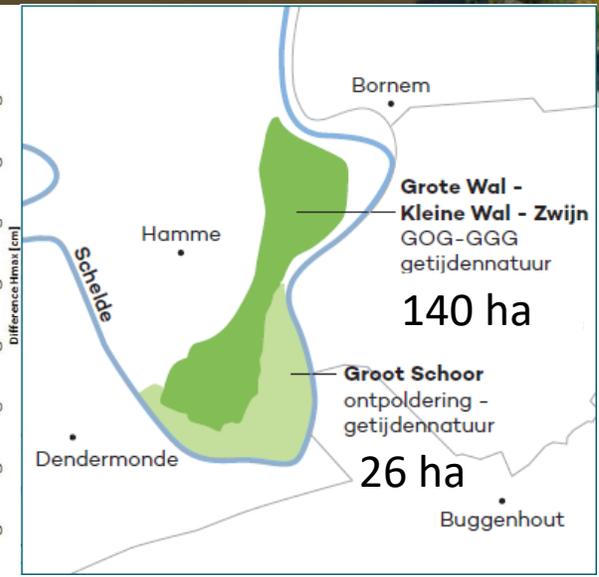
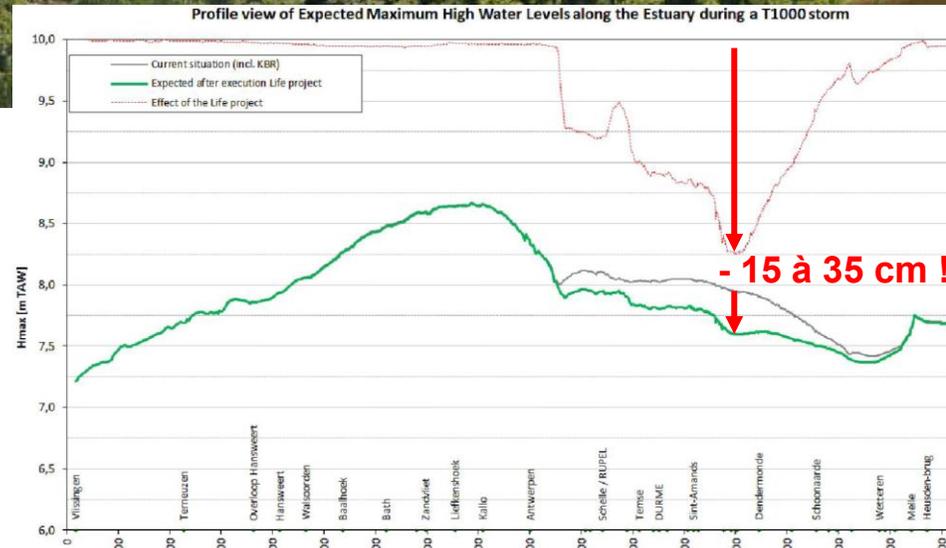
Inondation contrôlée

Libre évolution

Inondation contrôlée

Libre évolution

(Maris & Vanlede, 2024)



Vers des solutions d'adaptations

4. Les connexions lits mineur/majeur : Quel impact de **ZEEE** (zone d'expansion des eaux estuariennes) en **Seine** ?

Objectifs du projet Seine-Aval7 **ATLANTIS** :

- tester l'**impact de ZEEE** sur l'**aléa inondation** actuel
- et en considérant des **scénarios d'évolutions bathymétriques** (morphologie du fond + niveau marin)

5 sites modélisés pour comprendre l'impact potentielle des ZEEE :

- Roselière embouchure/réserve

→ **Maritime**

- Marais Vernier

→ **Maritime**

- Boucle de Petiville

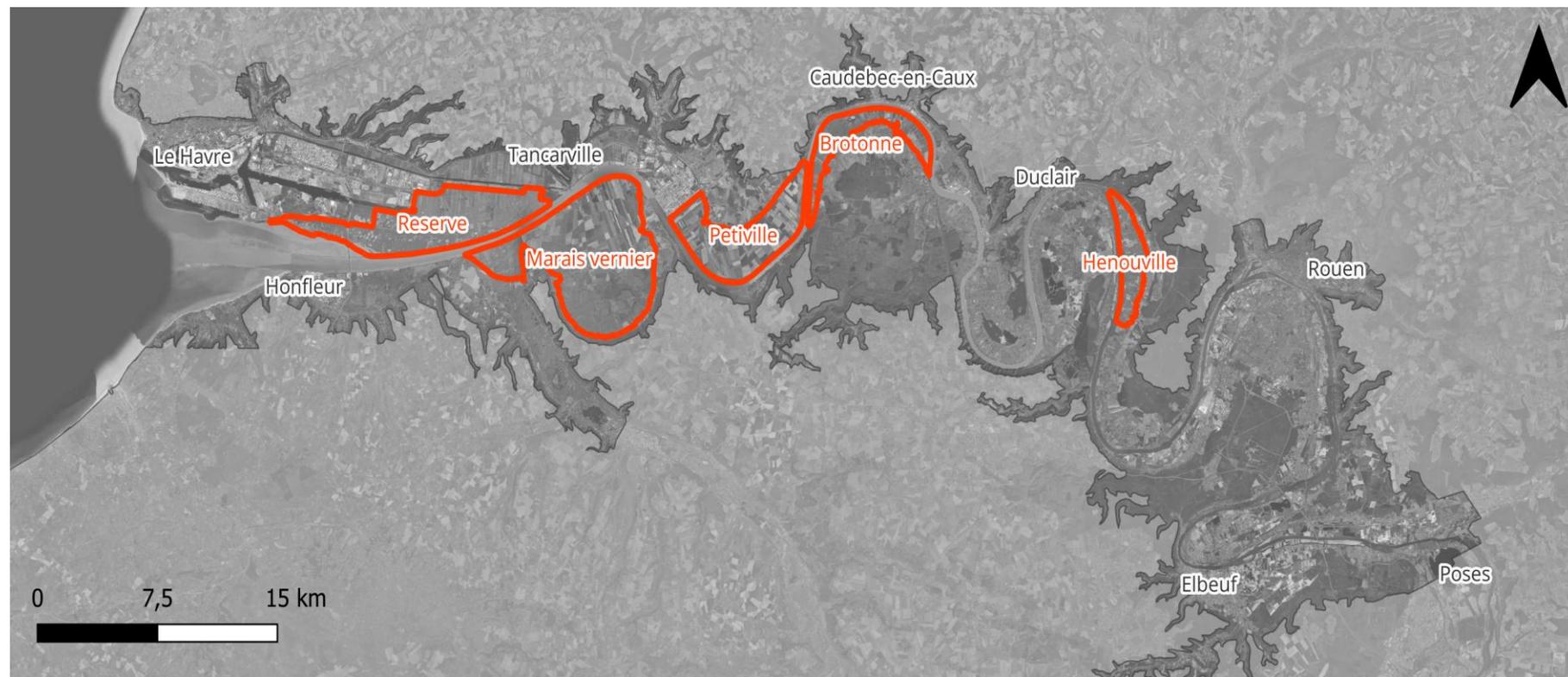
→ **Maritime**

- Boucle de Brotonne

→ **Fluvio-maritime**

- Marais d'Hénouville

→ **Fluvio-maritime**



Vers des solutions d'adaptations

Anticiper pour s'adapter !

De nombreuses démarches en cours et les acteurs de l'estuaire mobilisés



PROGRAMME
D'ACTIONS
ET DE PRÉVENTION
DES INONDATIONS
Le Havre-Estuaire-Pointe de Caux



Et d'autres !



GIP Seine-Aval
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC

Les webinaires de l'estuaire

Ca continue en 2026 ...
programme à venir !

Replays
dispos

www.seine-aval.fr/webinaires-estuaire/

Séminaire scientifique 18-19 novembre

Programme disponible
Inscriptions ouvertes

www.seine-aval.fr/seminaire2025/



18 & 19 Novembre 2025

30 ANS DU PROGRAMME SEINE-AVAL

Séminaire
Scientifique Seine-Aval

Programme

Pavillon des transitions,
Quai de Boisguilbert, 76000 Rouen

 GIP Seine-Aval
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC



GIP Seine-Aval
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC

