

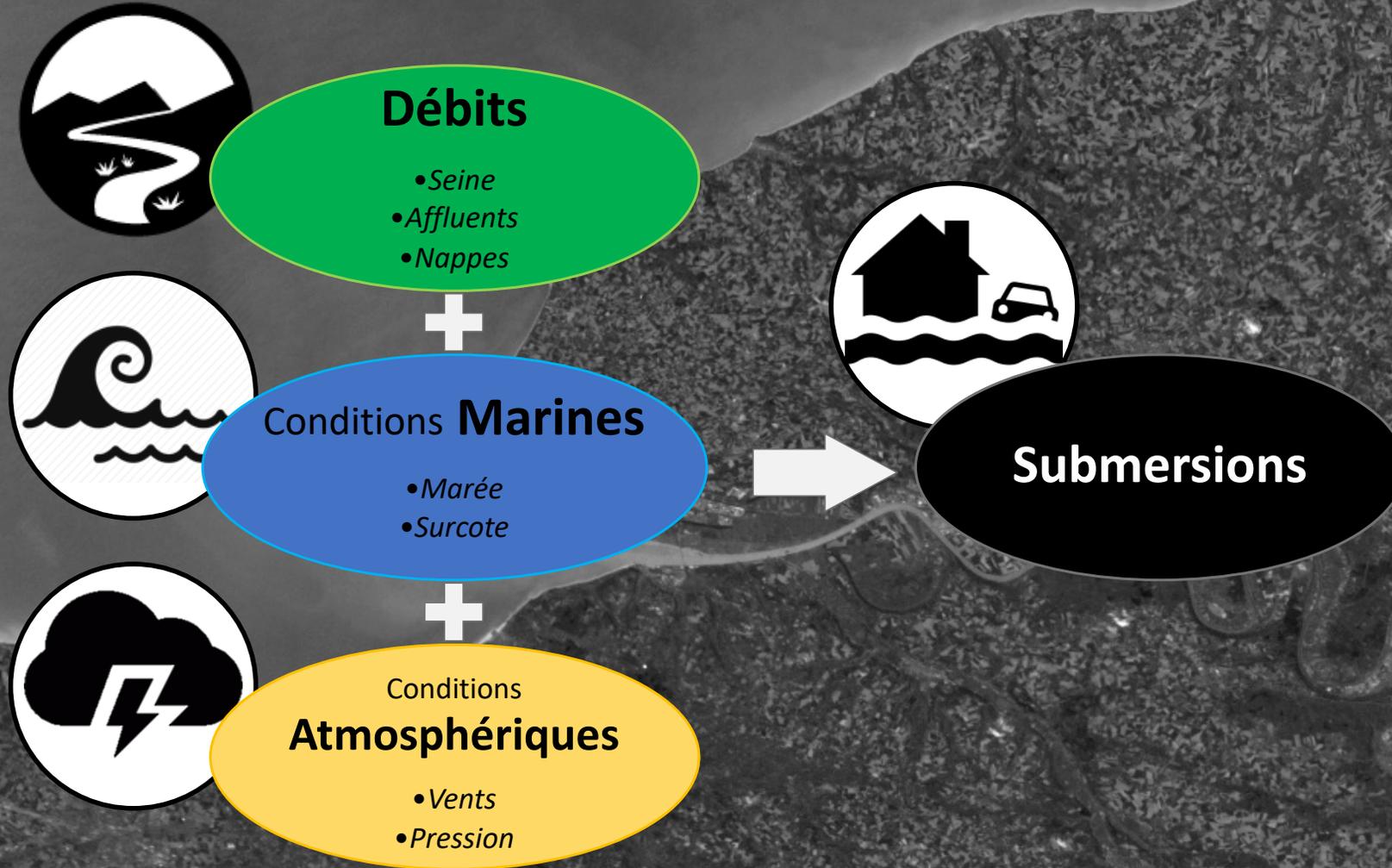


GIP Seine-Aval

Caractérisation & Modélisation des submersions/inondations en estuaire de Seine

Jean-Philippe Lemoine – jplemoine@seine-aval.fr







GIP Seine-Aval

Les études “inondations” au GIP-Seine Aval

- 1^{ère} phase d'études 2013 - 2015
- 2^{nde} phase 2019 - 2022
- **Objectif :**
 - fédérer les acteurs autour de la caractérisation et la compréhension des inondations/submersions
- 2 Volets :
 - Analyse des événements historiques
 - Modélisation

DDTM76 SMGSN
Le Havre Métropole
Seine-Eure
Métropole Rouen Normandie

Seine-Maritime HAROPA DDTM27 DREAL

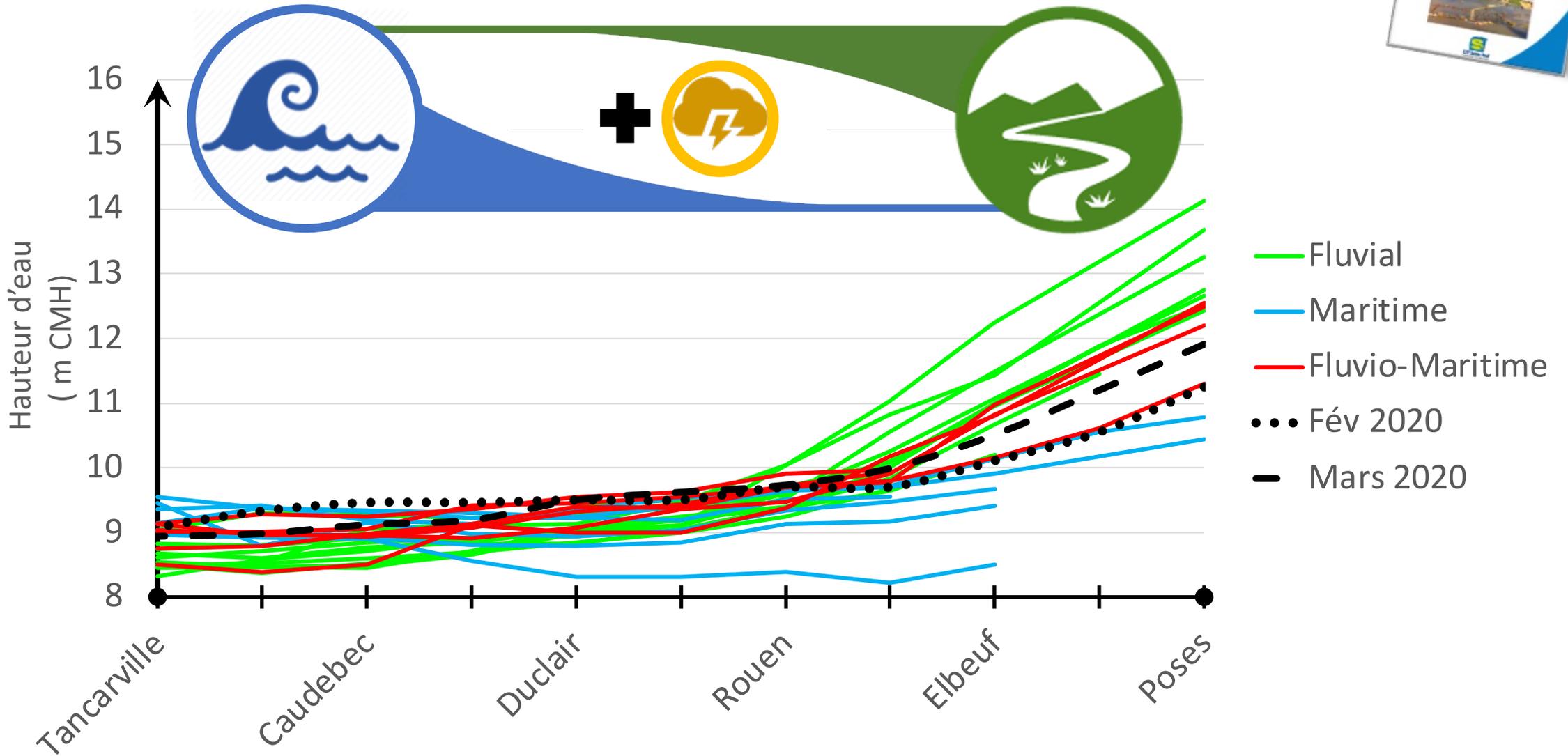
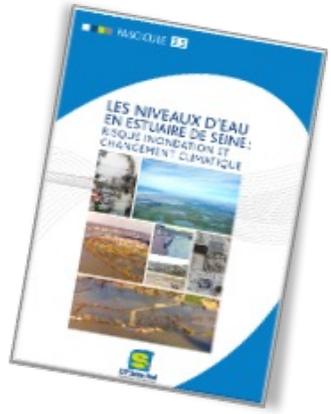
AESN
Service Prévision des Crues
Caux Seine Agglo
Vallée de Seine
Roumois Seine

Analyse des évènements historiques

- Analyse des forçages
 - débits Seine + affluents
 - pression atmosphérique
 - vents
 - *Surcote (SHOM / CETMEF)*
- Analyse des évènements historique
 - Analyse des forçages (*intensités/concomitances*)
 - Hauteurs d'eau



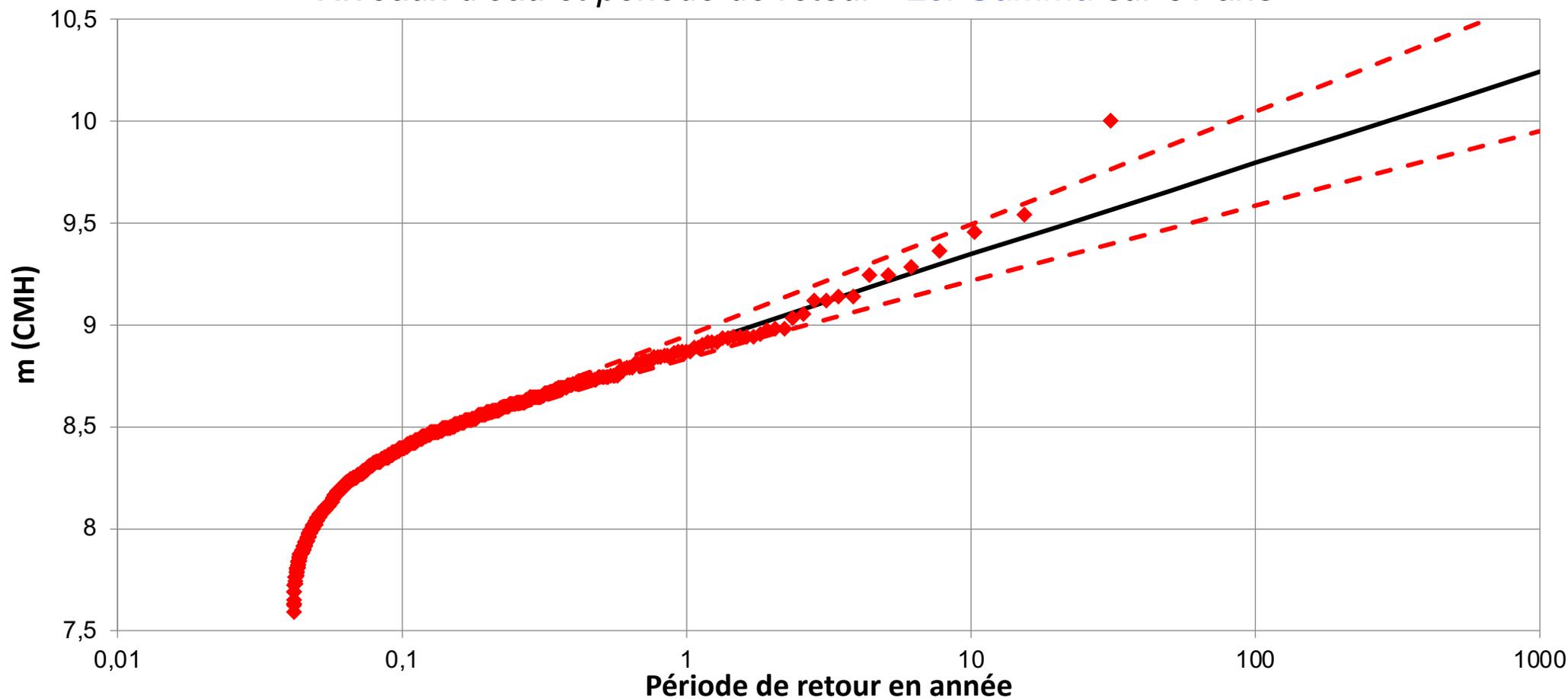
Analyse des évènements historiques



Plus ou moins fréquentes

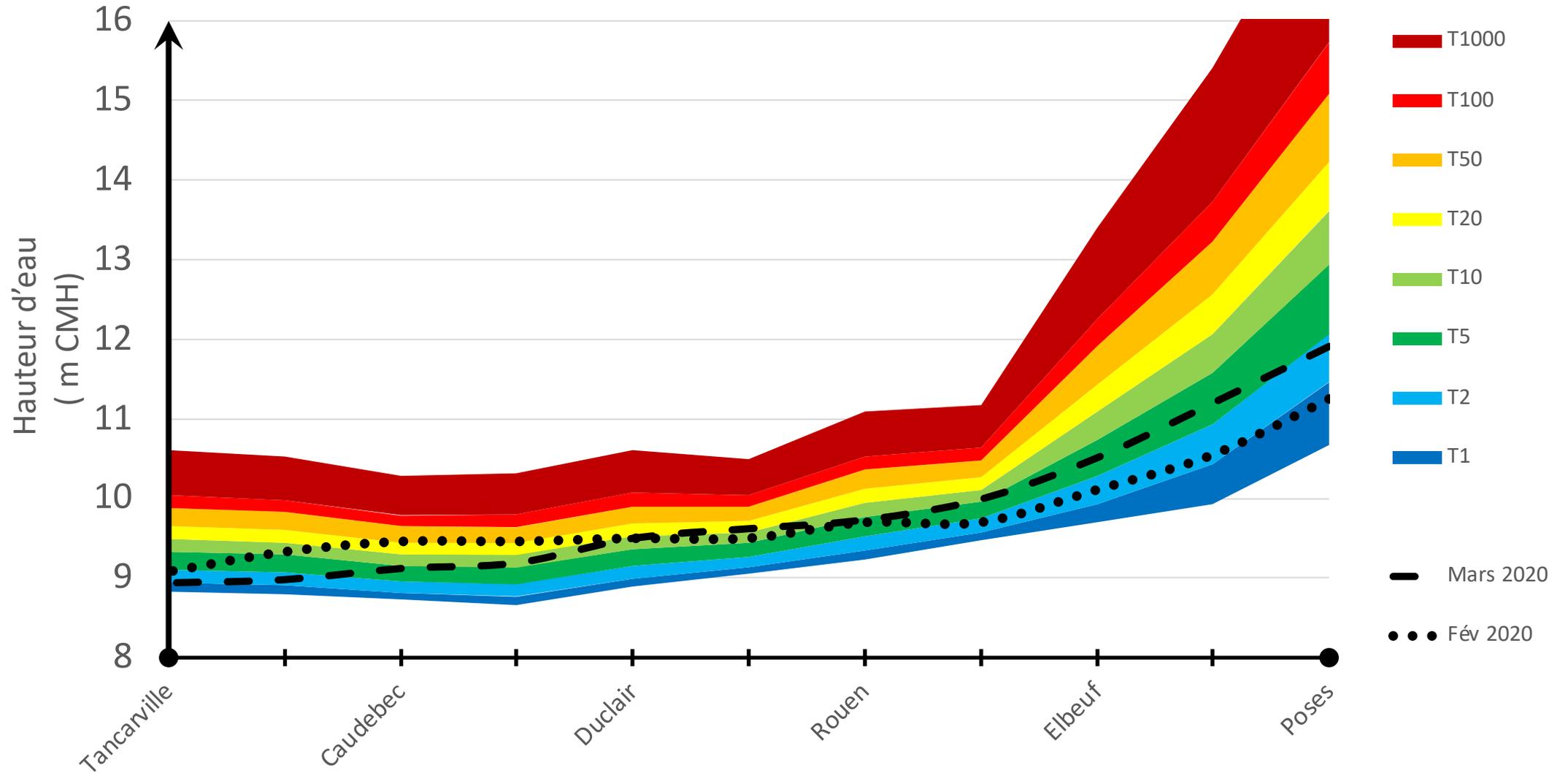
Tancarville

Niveaux d'eau et période de retour - *Loi Gamma* sur 31 ans



→ dispo à Fatouville, Aizier, Caudebec, Heurteauville + tous les marégraphes GPMR

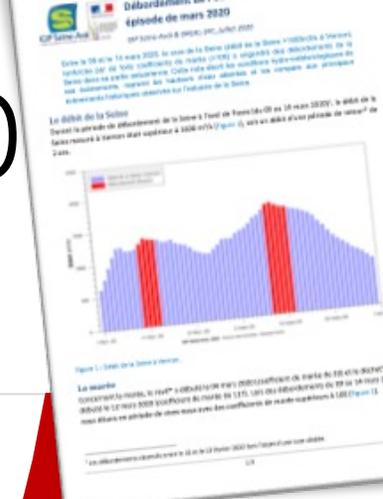
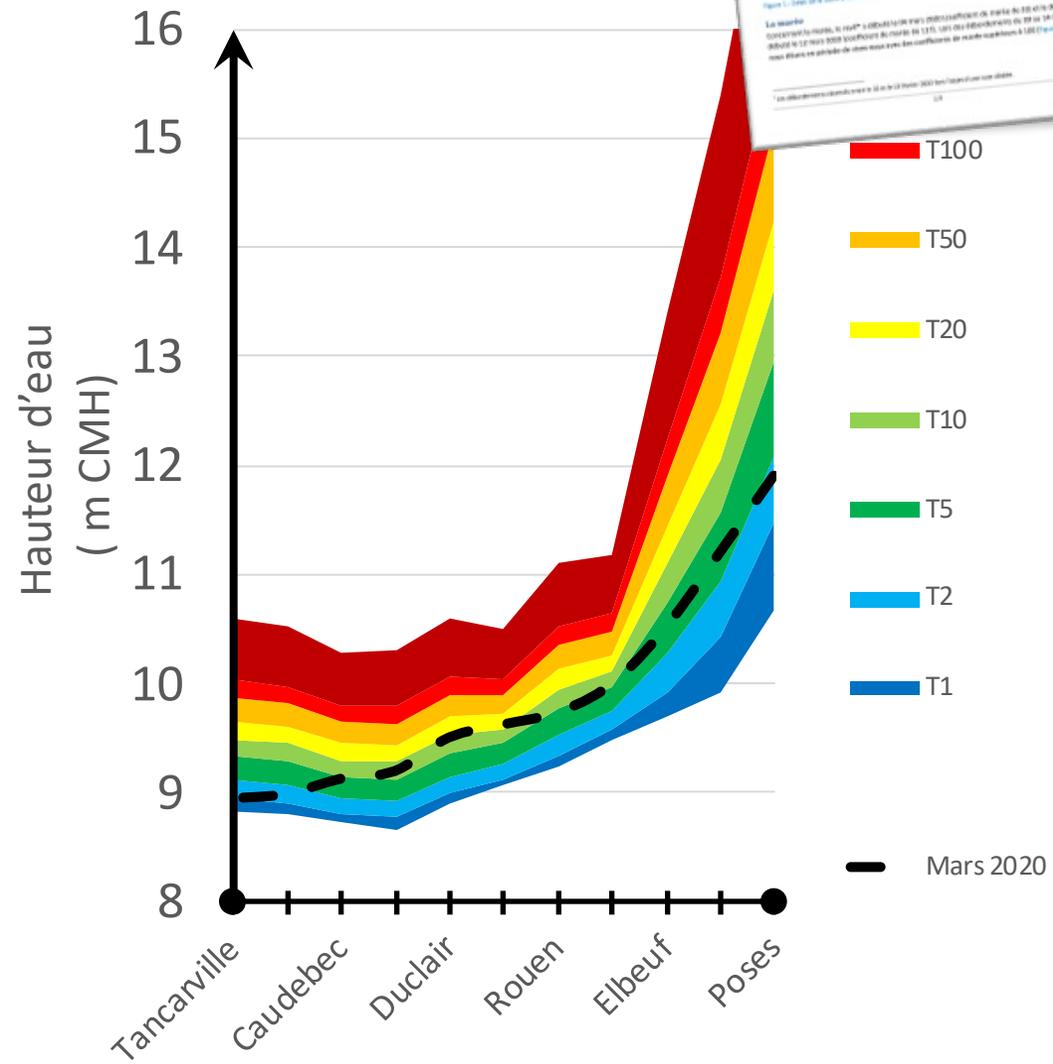
Plus ou moins fréquentes



Zoom sur l'évènement de Mars 2020

- Période de retour des hauteurs d'eau
 - 20 ans à Duclair
 - 5 ans à Rouen
 - 1an à Tancarville
- Débordement à Rouen pendant 11 pleines mers (débit soutenu longtemps + VE)

- Débit à Poses : 1600 m³/s | Q2
- Coeff. de marée : 117 | +++
- Surcote en baie : ± 50cm | <T1
- Vent : 40km/h de Sud Ouest | <T1
- Pression Atmo : ∅



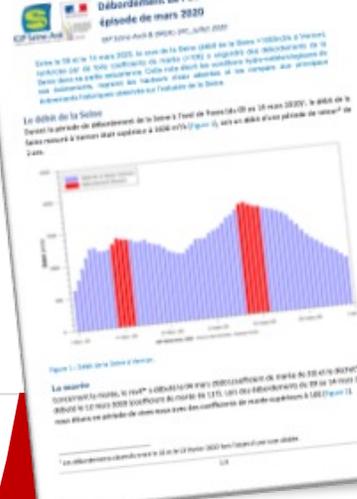
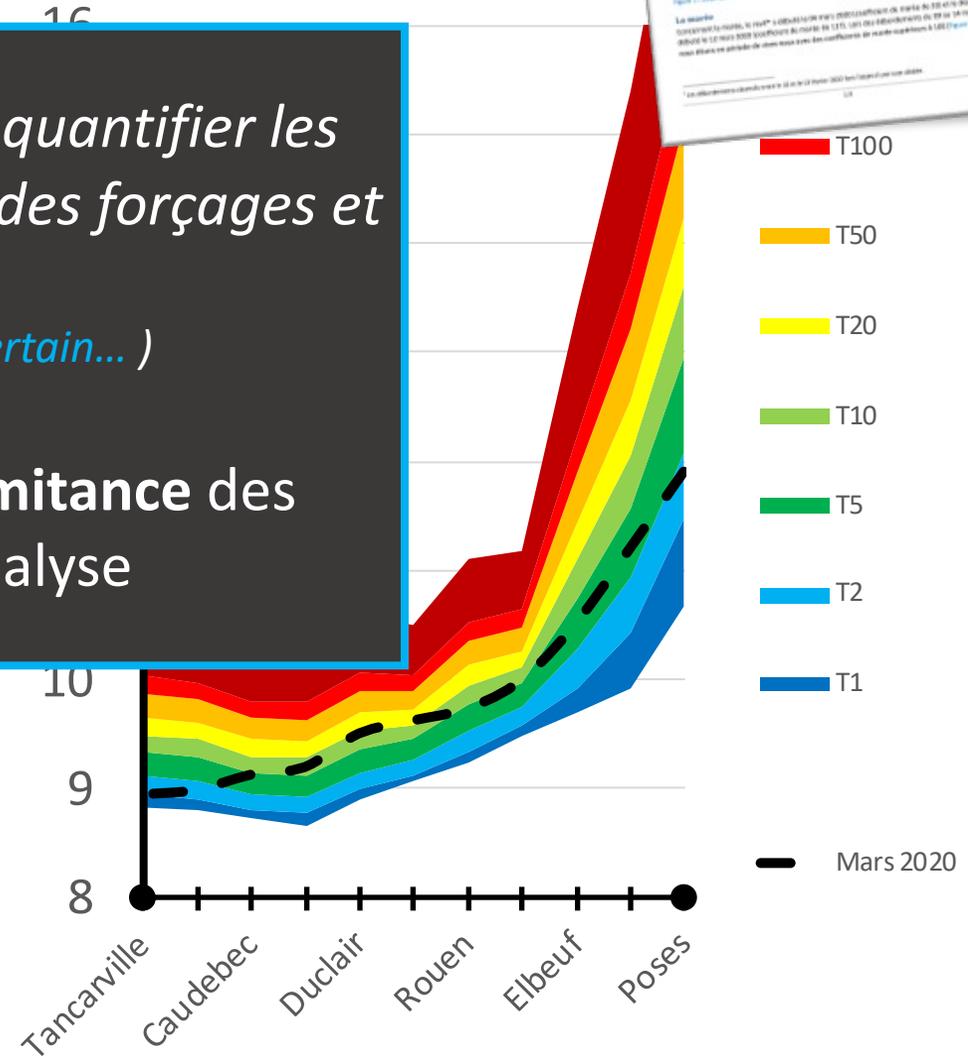
Zoom sur l'évènement de Mars 2020

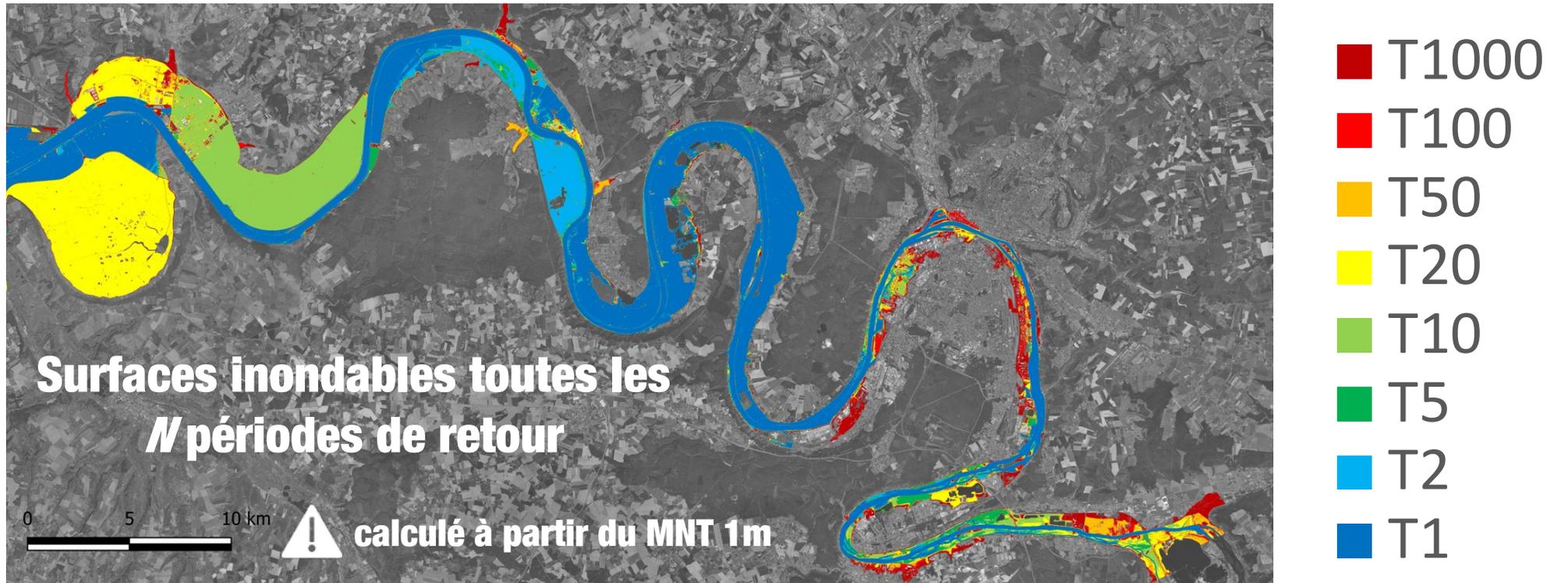
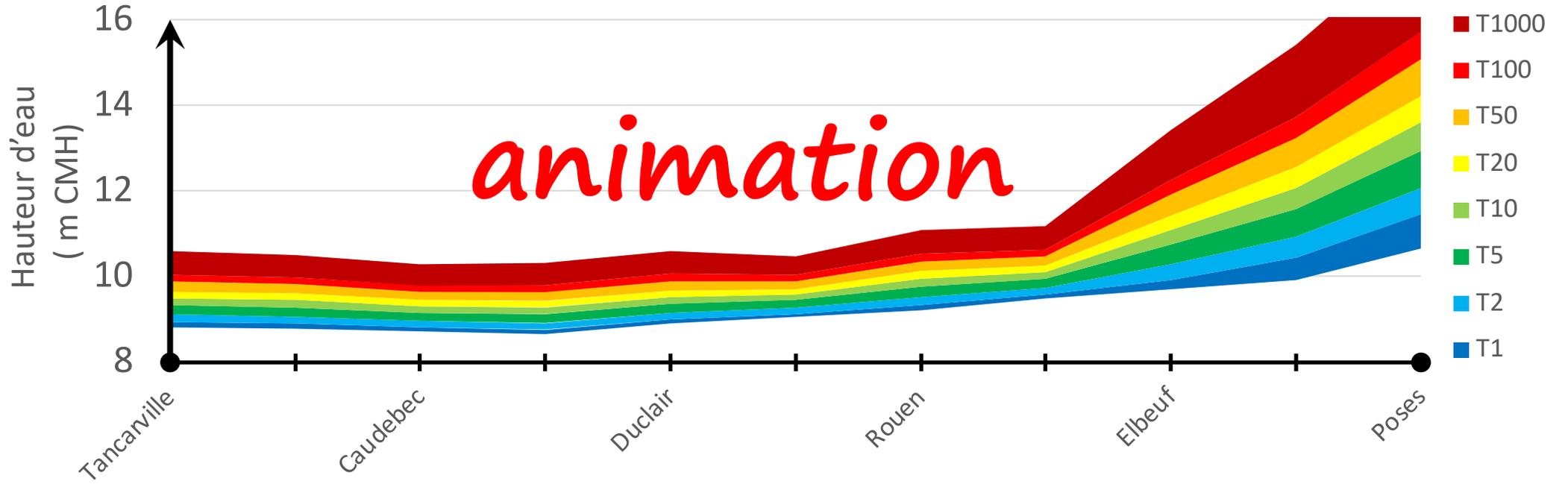
- Période de retour
 - 20 ans à Duclair
 - 5 ans à Rouen
 - 1an à Tancarville
- Débordement à mers (débit so

dans l'état nous ne savons pas faire quantifier les relations entre les périodes de retour des forçages et les niveaux d'eau
(modèle statistique de 2013 : trop incertain...)

→ temporalité/variabilité/concomitance des forçages à intégrer dans l'analyse

- Débit à Poses : 16
- Coeff. de marée :
- Surcote en baie : $\pm 50\text{cm}$ | <T1
- Vent : 40km/h de Sud Ouest | <T1
- Pression Atmo : \emptyset





Robustesse/représentativité des analyses rétrospectives - Exemple **forçages**

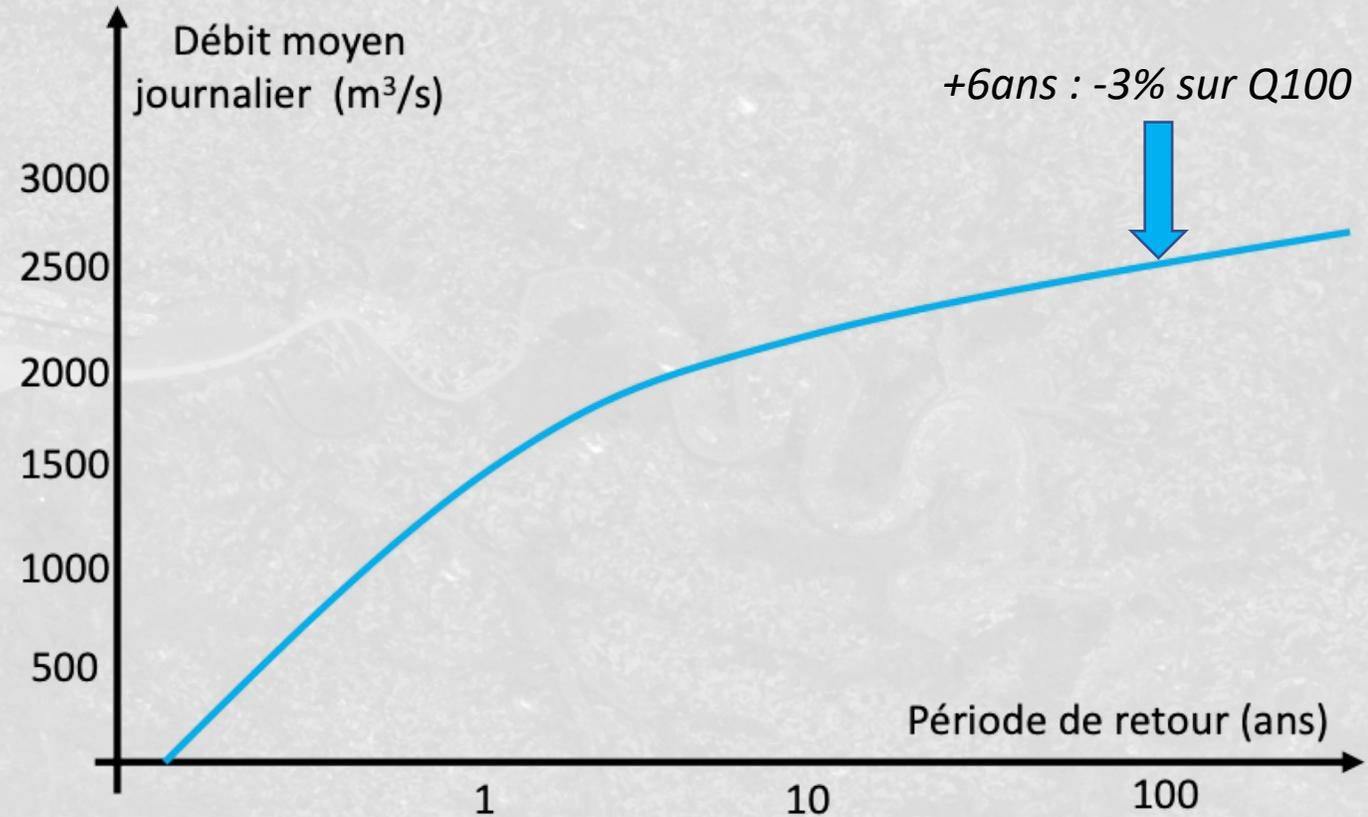
mise à jour 2013 → 2019

→ + 6 ans de données dans l'analyse

- $Q_{100}_{2019} : 2625 \text{ m}^3/\text{s} < Q_{100}_{2013} : 2700 \text{ m}^3/\text{s} (+3\%)$
- $\Delta Pa_{100}_{2019} \simeq \Delta Pa_{100}_{2013}$
- $\Delta V_{100}_{2019} < \Delta V_{100}_{2013}$

→ évolutions des régressions !

Quid des effets du changement climatique ...



Analyse des événements historiques

Bilan

- Compréhension des interactions entre les forçages et leurs répercussions:
 - *cf. analyse des événements récents*

- Caractérisation de l'aléa : “probabilité d'occurrence”

- Limitations
 - caractérisation rétrospective basée sur les observations disponibles (± 30 ans)
 - non prise en compte du changement climatique (pas de prospectifs)
 - basé uniquement sur les maximums observés : pas de notion de temporalité

- Permet la définition de scénarios pour les études du risque inondation
 - *via l'intensité des forçages*
 - *via les hauteurs d'eau atteintes*

Débit

Conditions
Marines

Modélisation des Submersions

Conditions
Atmosphériques

Topographie

INONDATIONS

5 km 15 km 25 km 35 km

Modélisation des submersions

Objectif : dépasser les observations et caractériser

- les interactions entre les forçages
- l'exposition au risque
- le rôle des ouvrages de protection
- les effets du changement climatique
- les effets des zones d'expansion des crues

Rappels sur l'étude modélisation "Artelia"

Objectifs :

- Améliorer la caractérisation et la compréhension des phénomènes de débordement dans l'estuaire de la Seine (notamment pour les périodes extrêmes) via la modélisation.
- Développement d'un modèle numérique de l'estuaire re-mobilisable ultérieurement pour d'autres études

3 actions :

- Construction, calage/validation du modèle
- Simulation de 20 scénarios
- Formation + transfert du modèle

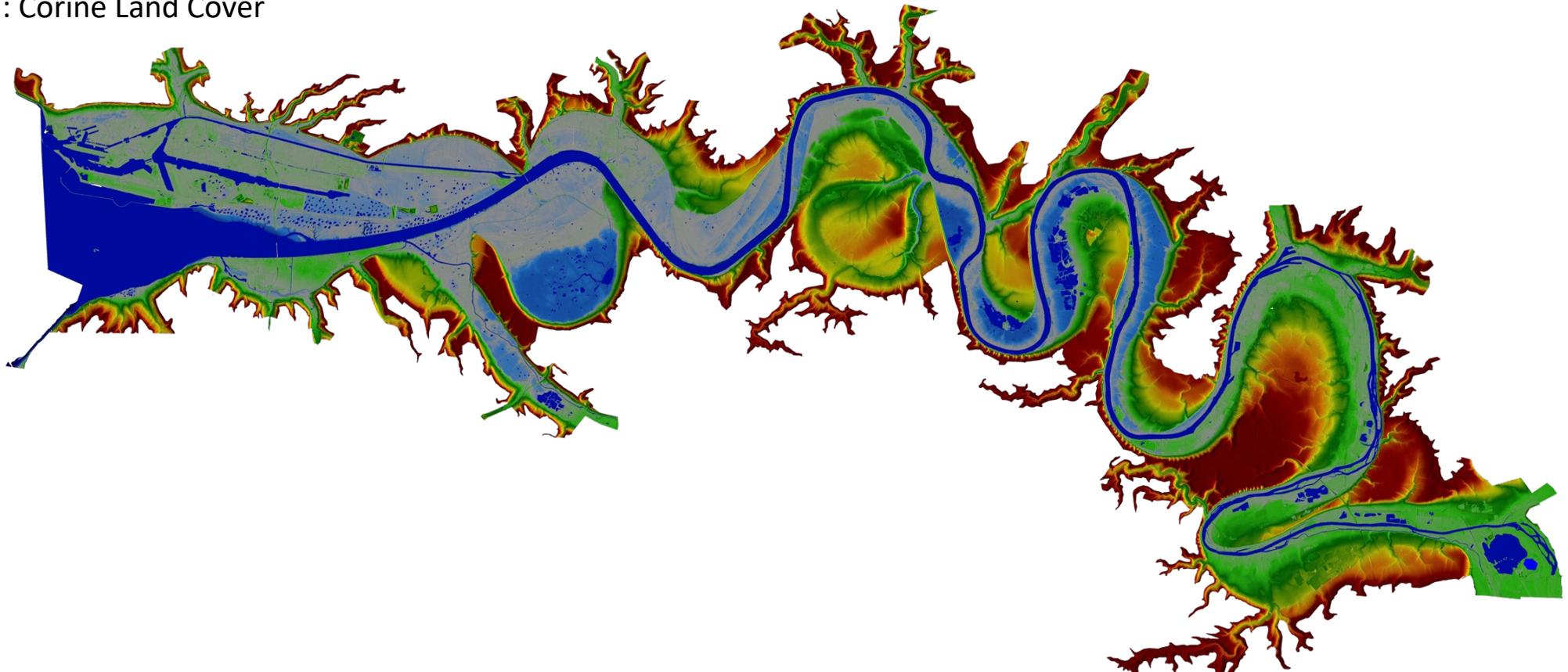
2 rapports :



Caractéristiques du modèle

Topographie :

- Lidar GIP Seine-Aval 2010
- Inventaire des ouvrages type murets
- + *màj des secteurs aménagés entre 2010 et 2019*
- Rugosité : Corine Land Cover



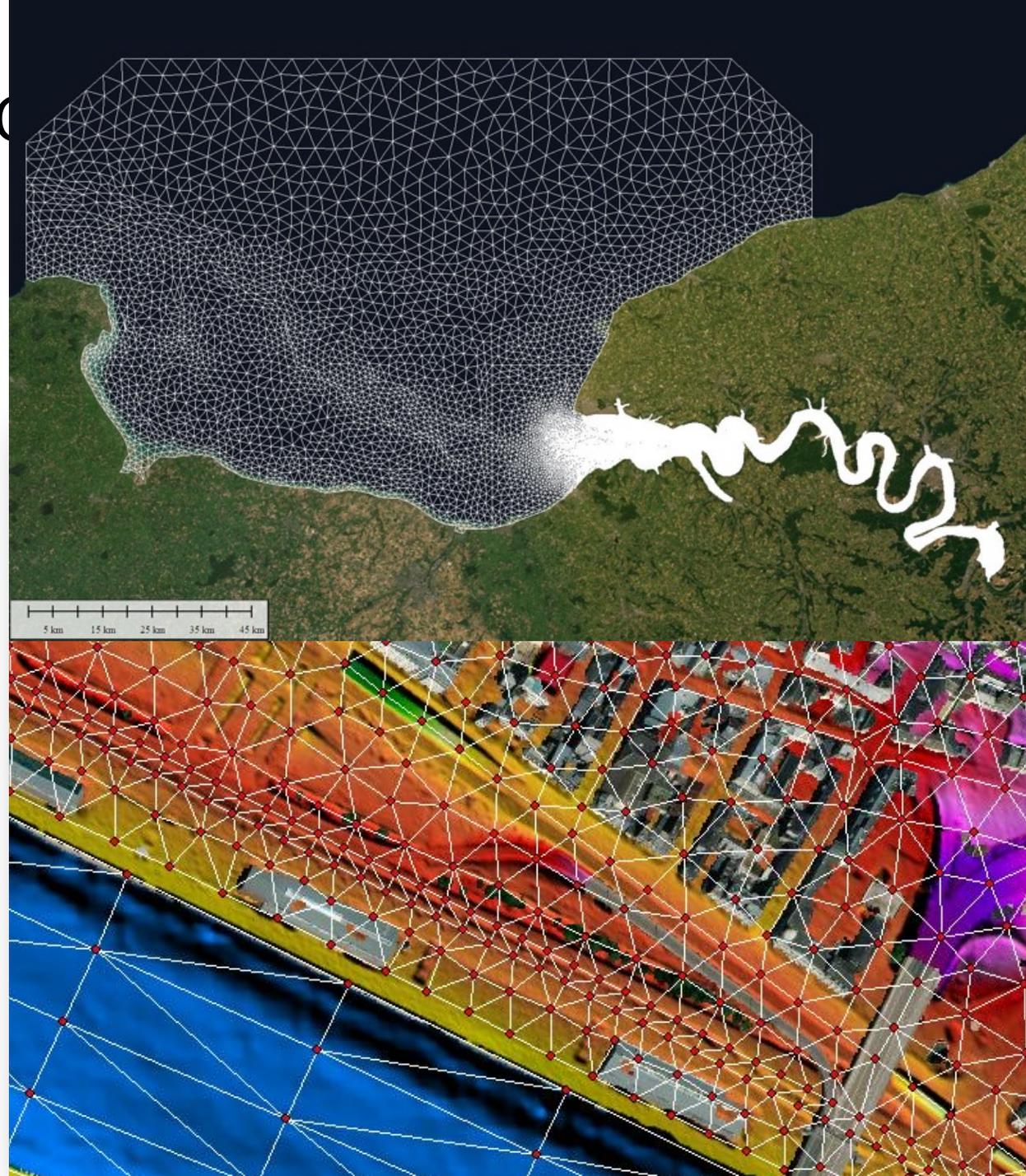
Caractéristiques du mo

Topographie :

- Lidar GIP Seine-Aval 2010
- Inventaire des ouvrages type murets
+ m à j des secteurs aménagés entre 2010 et 2019
- Rugosité : Corine Land Cover

Maillage :

- 23 sous-modèles
- 680 000 nœuds (résolution variable selon enjeux + méth. Lindner)
→ écarts altimétriques à $\pm 20\text{cm}$ sur +80% de la **surface totale** ($\pm 10\text{cm}$ - 60%)
principalement dans les zones à faible enjeux + forts gradients





Caractéristiques du modèle

Topographie :

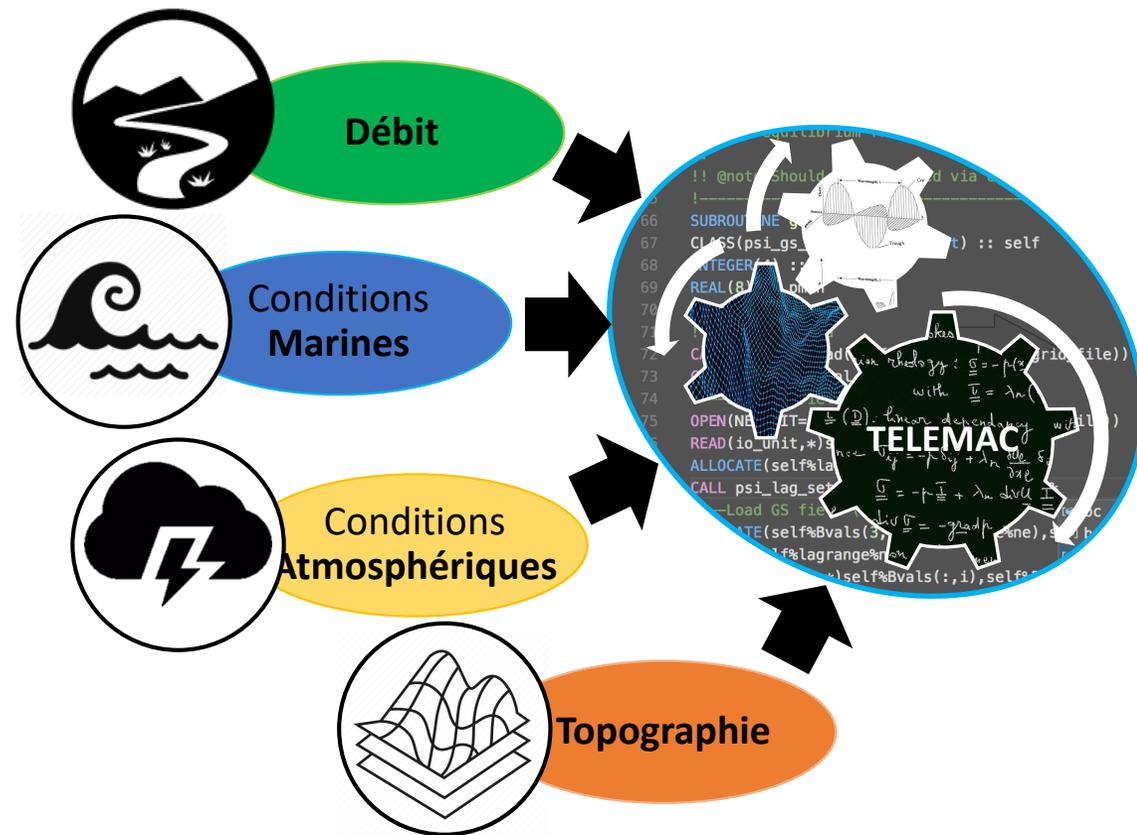
- Lidar GIP Seine-Aval 2010
- Inventaire des ouvrages type murets
+ m à j des secteurs aménagés entre 2010 et 2019
- Rugosité : Corine Land Cover

Maillage :

- 23 sous-modèles
- 680 000 nœuds (résolution variable selon enjeux + méth. Lindner)
→ écarts altimétriques à $\pm 20\text{cm}$ sur +80% de la **surface totale** ($\pm 10\text{cm}$ - 60%)
principalement dans les zones à faible enjeux + forts gradients

Conditions limites :

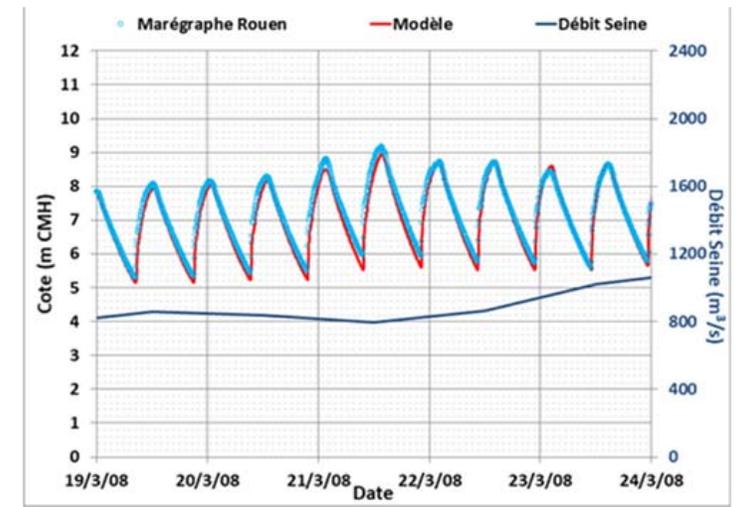
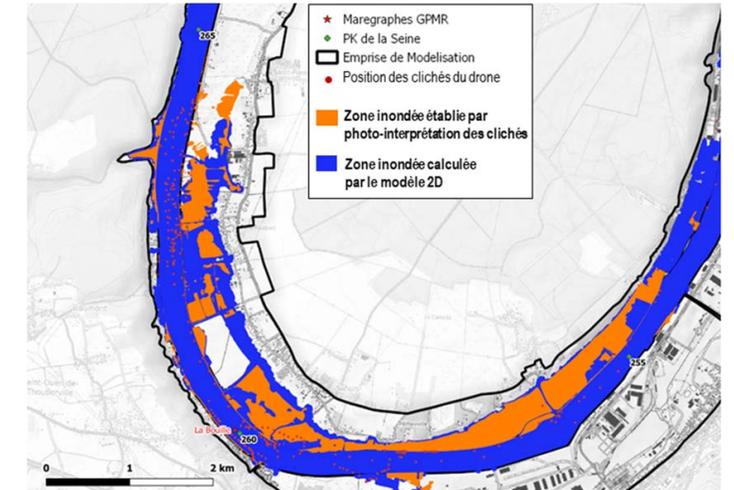
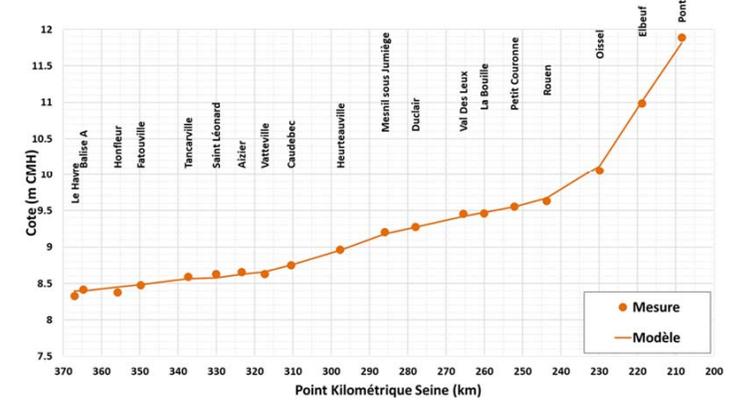
- Débits journaliers de la Seine, Eure et Risle (*Banque hydro*)
- Conditions marines :
 - Marée (*modèle Manche Artelia / TPXO - 10'*)
 - Surcote (*BDD MARC Ifremer - 1h*)
- Conditions atmosphériques : Vent et pression (*Modèle ERA5*)



Caractéristiques du modèle

Calage/validation :

- 6 évènements :
 - fluvial : mars 2001, février 2018
 - maritime : mars 2008 (+1999)
 - fluvio-maritime : janvier 2018, février et mars 2020
- Données :
 - 18 marégraphes
 - laisses de crues (<http://www.reperesdecrues.developpement-durable.gouv.fr>)
 - suivi drone CD76/AESN - Fév 2018 - orthorectifié CEREMA





Les limites du modèles

Le modèle se base sur la schématisation des processus observés ...

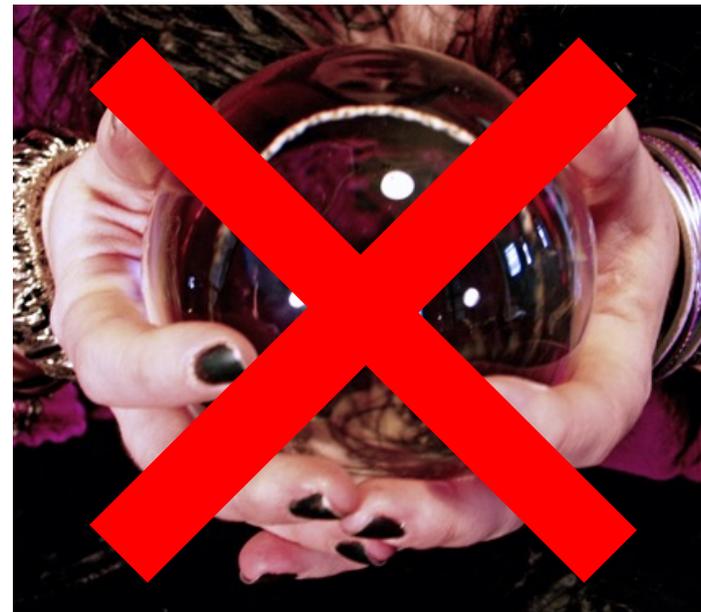
les observations sont incertaines, les schématisations sont incertaines :

→ le modèle est incertain !

Le modèle a été construit et validé pour répondre à des questions/un objectif pour lesquels les incertitudes sont acceptables

Objectif :

“ Quelle est la dynamique des submersions induites par des débits de Seine (+ affluents) importants, et des conditions marines et atmosphériques intenses, à l'échelle de de l'estuaire de la Seine? ”



“Pour ce qui est de l'avenir, il ne s'agit pas de le prévoir, mais de le rendre possible”

Saint Exupéry extrait du Rapport GIEC 2021

Les limites du modèles

“ Quelle est la dynamique des submersions induites par des débits de Seine (+ affluents) importants, et des conditions marines et atmosphériques intenses, à l'échelle de de l'estuaire de la Seine? ”

Principaux processus non pris en compte :

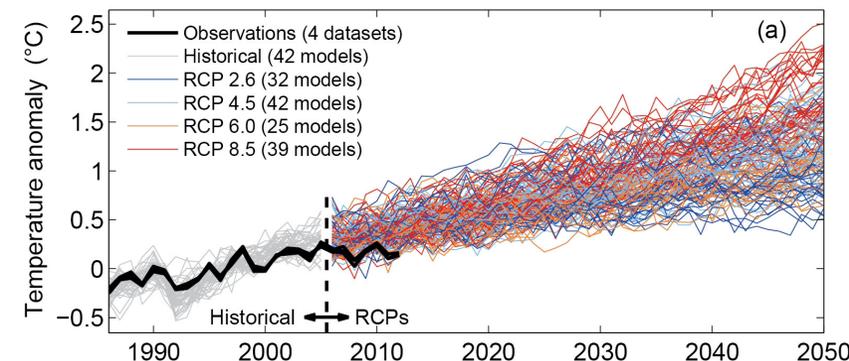
- ouvrages traversants (buse, pont cadre, clapets anti-retour)
- interactions avec les eaux souterraines
- ruissellements + saturation des réseaux d'écoulements des eaux pluviales
- évolutions morpho-sédimentaires des fonds

Incertitudes sur les hauteurs d'eau simulées : $\pm 10\text{cm}$

→ à comparer aux incertitudes sur la topographie : 6cm terrain + crêtes de digues

Illustration des incertitudes

Modélisation des Températures 1990-2050
Observations et Modèles GIEC

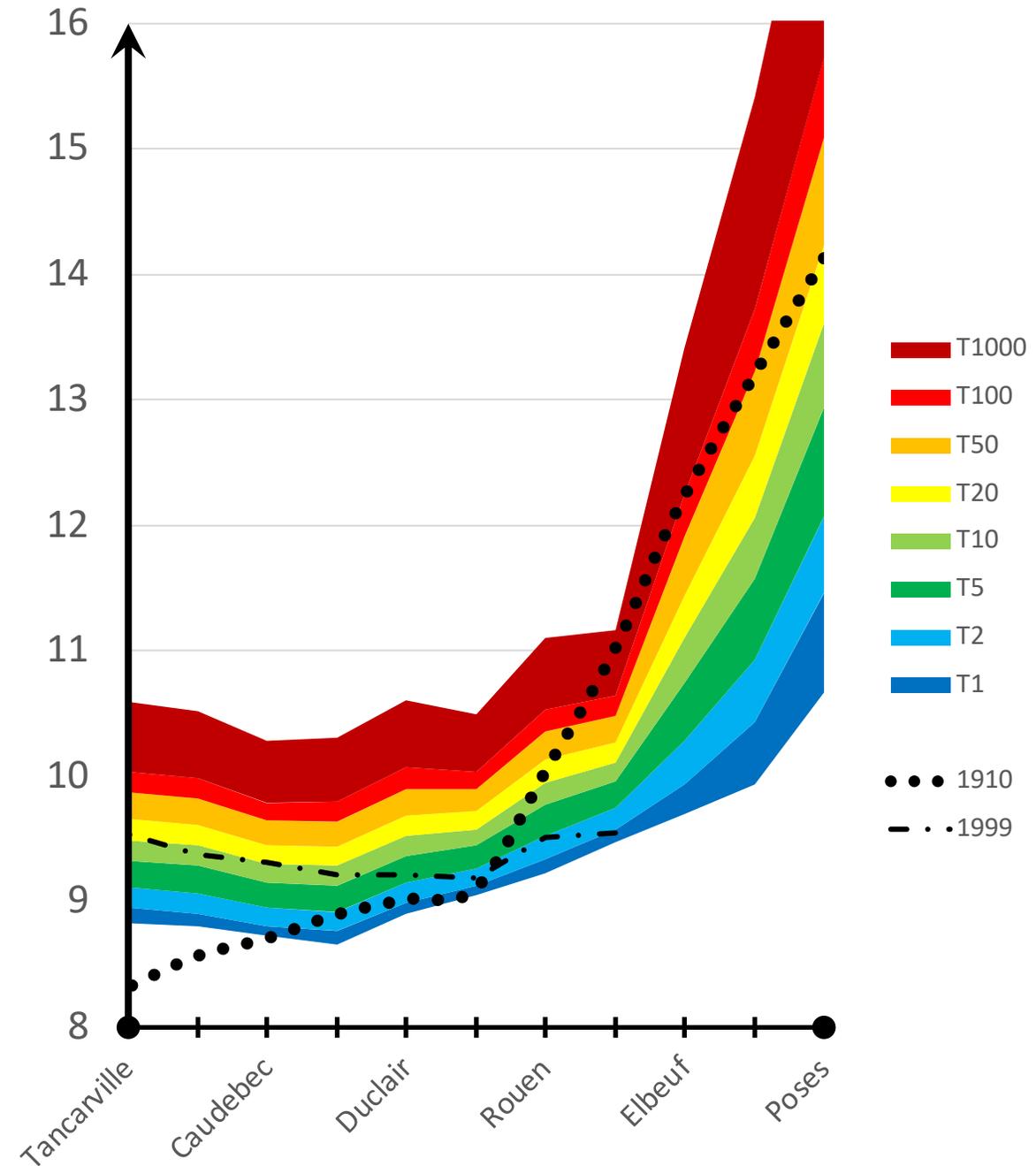


Les scénarios

Scénarios réalistes :

Reproduction d'évènements observés sur la base de la morphologie actuelle + déclinaisons avec et sans élévation du niveau marin

- Evènement type 1910 : débit 1910 + condition marine et atmo. 2016
- Tempête 1999



Les scénarios

Scénarios réalistes :

Reproduction d'évènements observés sur la base de la morphologie actuelle + déclinaisons avec et sans élévation du niveau marin

- Evènement type 1910 : débit 1910 + condition marine et atmo. 2016
- Tempête 1999

Scénarios théoriques :

Construit afin d'atteindre des niveaux de période de retour donné sur 4 marégraphes clés

- *Tancarville*
- *Heurteauville*
- *Rouen*
- *Elbeuf*

T30 : Avec et sans prise en compte des murets anti-inondations

T100 : Avec sans élévation du niveau marin +1m

Secteur de l'estuaire	Marégraphe de référence	Niveau d'eau cible (m CMH)		Cote des premiers débordements (m CMH)	Cote des enjeux significatifs touchés (m CMH)
		T30	T100		
Fluvial	Elbeuf	11.18	11.67	9.60	10.80
Fluvio-maritime amont	Rouen	10.02	10.26	9.30	9.70
Fluvio-maritime aval	Heurteauville	9.36	9.58	9.10	9.40
Maritime	Tancarville	9.56	9.80	9.50	9.75

Les scénarios

Scénarios réalistes :

Reproduction d'évènements observés sur la base de la morphologie actuelle + déclinaisons avec et sans élévation du niveau marin

- Evènement type 1910 : débit 1910 + condition marine et atmo. 2016
- Tempête 1999

Scénarios théoriques :

Construit afin d'atteindre des niveaux de période de retour donné sur 4 marégraphes clés

- *Tancarville*
- *Heurteauville*
- *Rouen*
- *Elbeuf*

T30 : Avec et sans prise en compte des murets anti-inondations

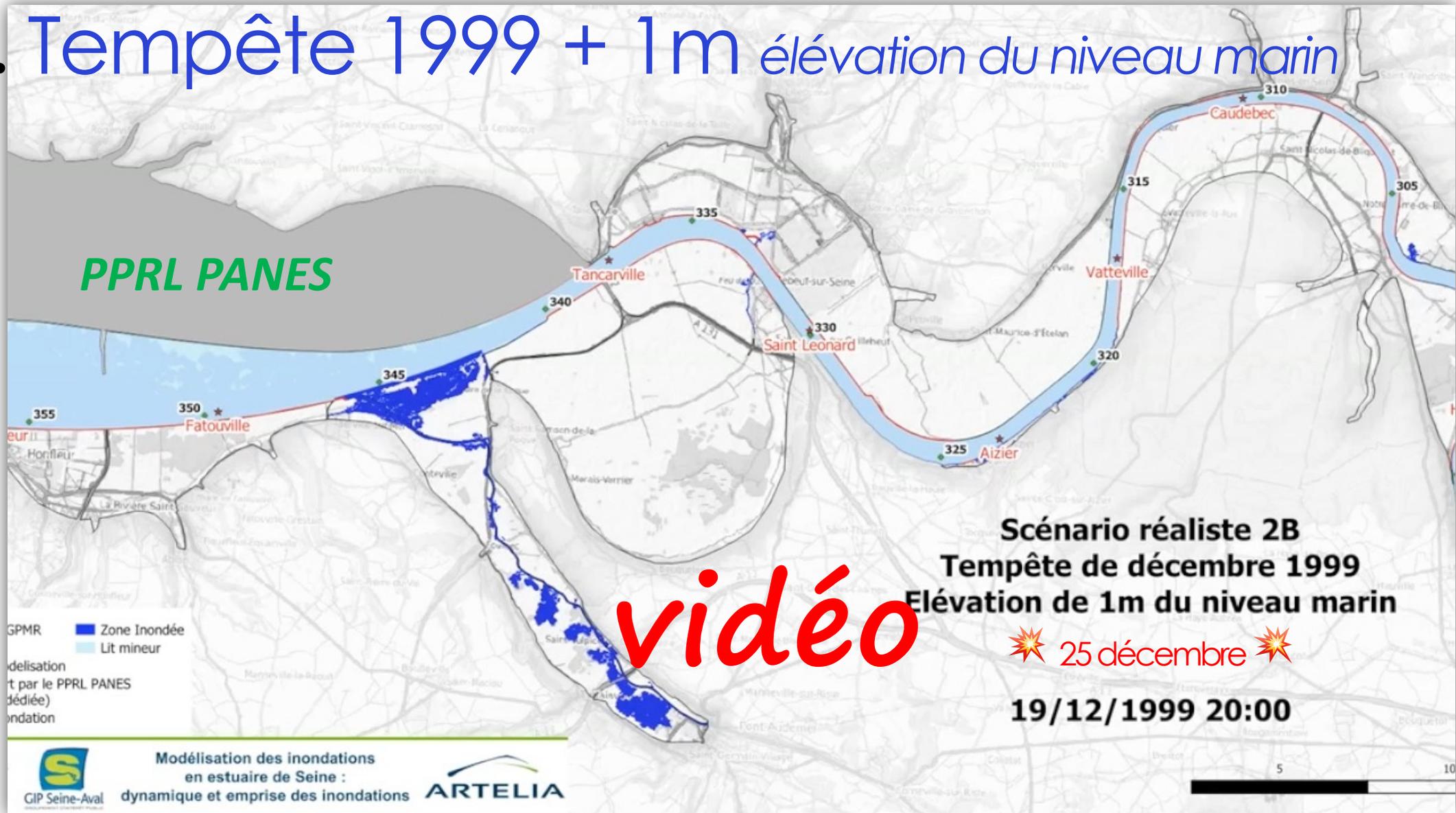
T100 : Avec sans élévation du niveau marin +1m

Secteur de l'estuaire	Marégraphe de référence	Niveau d'eau cible (m CMH)		Cote des premiers débordements (m CMH)	Cote des enjeux significatifs touchés (m CMH)
		T30	T100		
Fluvial	Elbeuf	11.18	11.67	9.60	10.80
Fluvio-maritime amont	Rouen	10.02	10.26	9.30	9.70
Fluvio-maritime aval	Heurteauville	9.36	9.58	9.10	9.40
Maritime	Tancarville	9.56	9.80	9.50	9.75

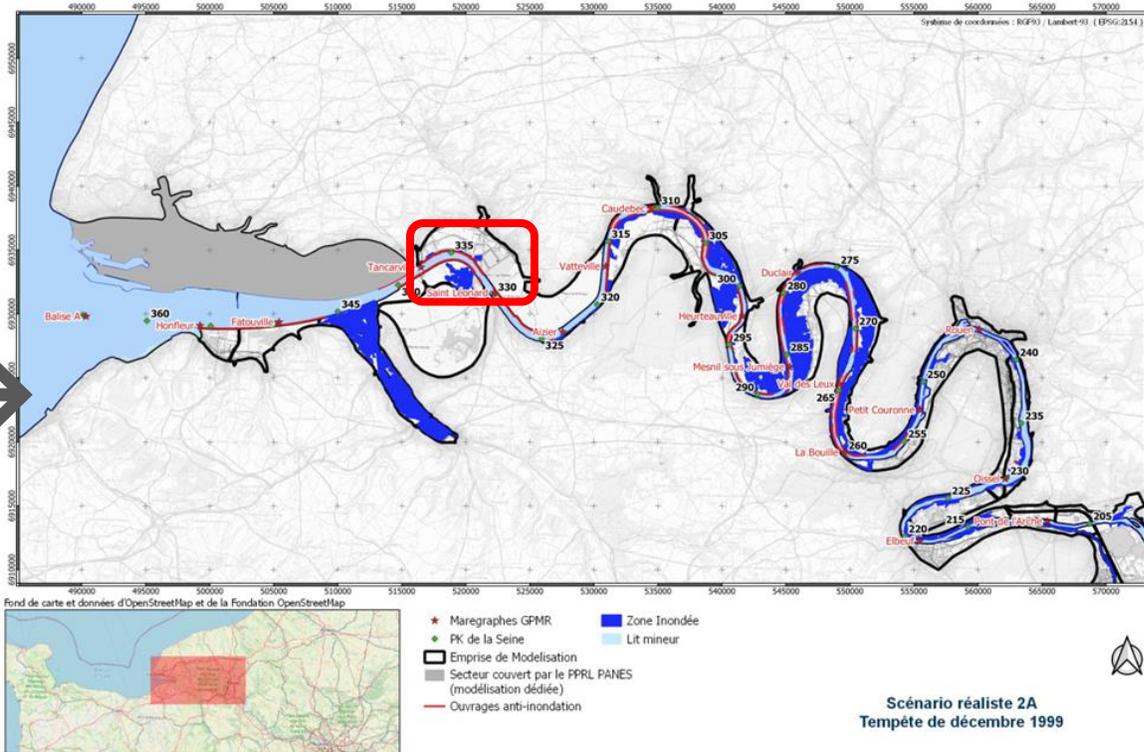
Scénario n°	Secteur de l'estuaire et marégraphe de référence	Evènement de base pour les chroniques de forçages	Niveau d'eau cible	Correctifs appliqués	
				Débits	Conditions météo-océaniques
3A - 3B	<u>Fluvial</u>	Episode fluvio-maritime de février 2018 Débit de pointe = 2 120 m³/s	T30	+3%	-
4A - 4B	Elbeuf		T100	+21%	-
5A - 5B	<u>Fluvio-maritime amont</u>	Tempête Eleanor de janvier 2018 Débit de pointe = 1 540 m³/s	T30	+50%	+40%
6A - 6B	Rouen		T100	+80%	+70%
7A - 7B	<u>Fluvio-maritime aval</u>		T30	+20%	+30%
8A - 8B	Heurteauville		T100	+40%	+70%
9A - 9B	<u>Maritime</u>		T30	-	+55%
10A - 10B	Tancarville		T100	-	+90%

Modélisation des inondations

- Tempête 1999 + 1m élévation du niveau marin



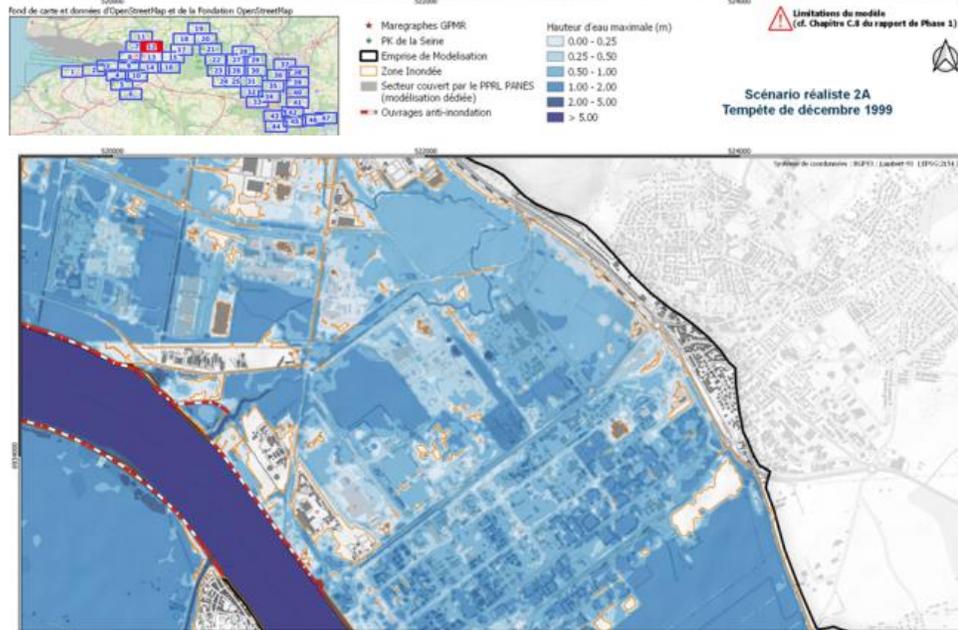
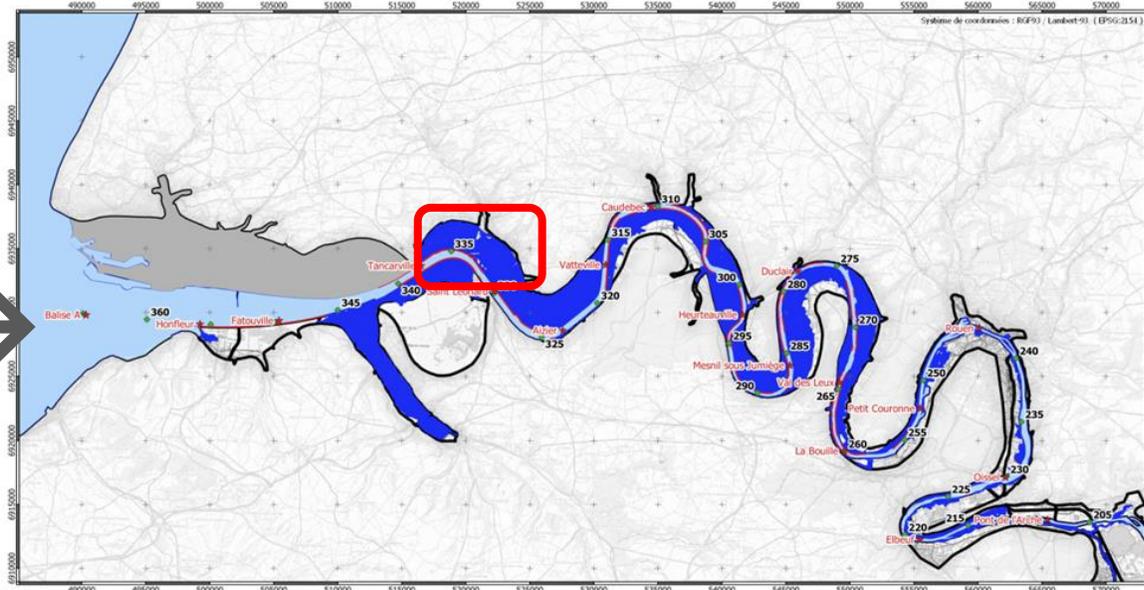
Niveau
Marin
Actuel →



Scénario “Tempête 1999”

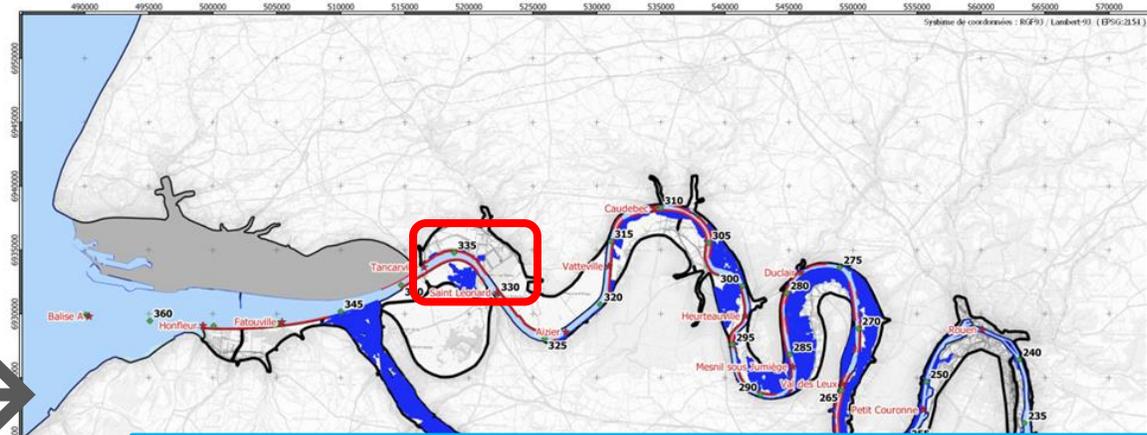


2100
+1m →



Niveau Marin

Actuel →



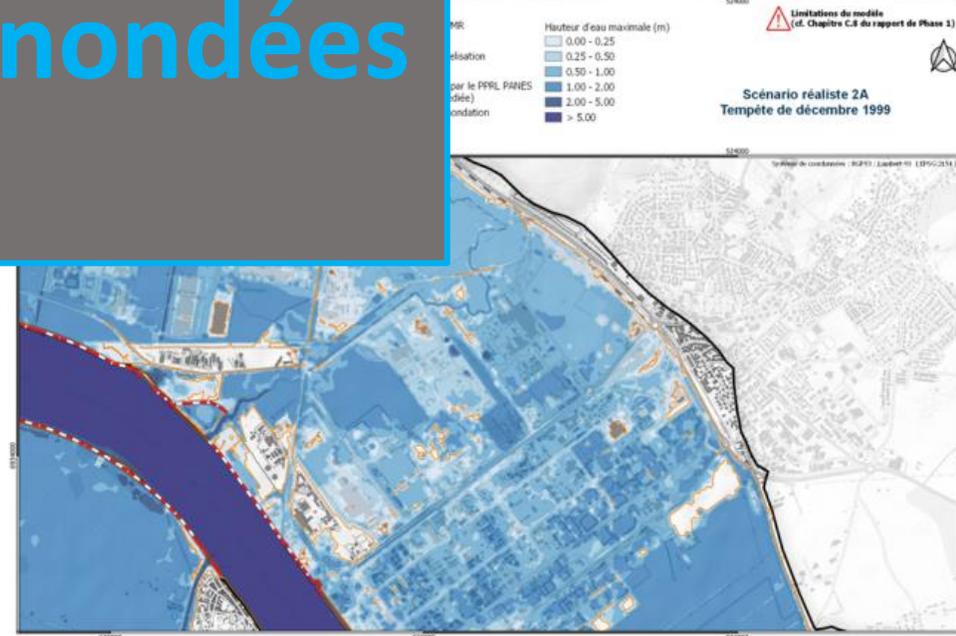
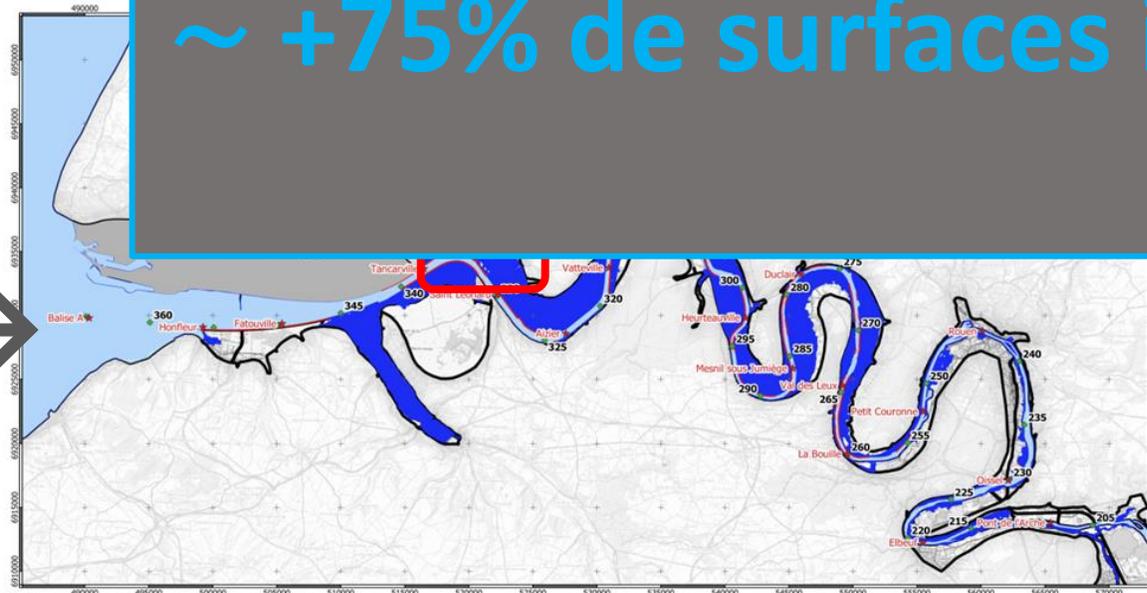
Scénario “Tempête 1999”



**Élévation NM 1M →
~ +75% de surfaces inondées**

2100

+1m →



Modélisation des inondations

$Q_{\text{Poses max}} : 2300\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} - T13$

Coeff. Marée : 107

Surcôte : 1,5m - T55

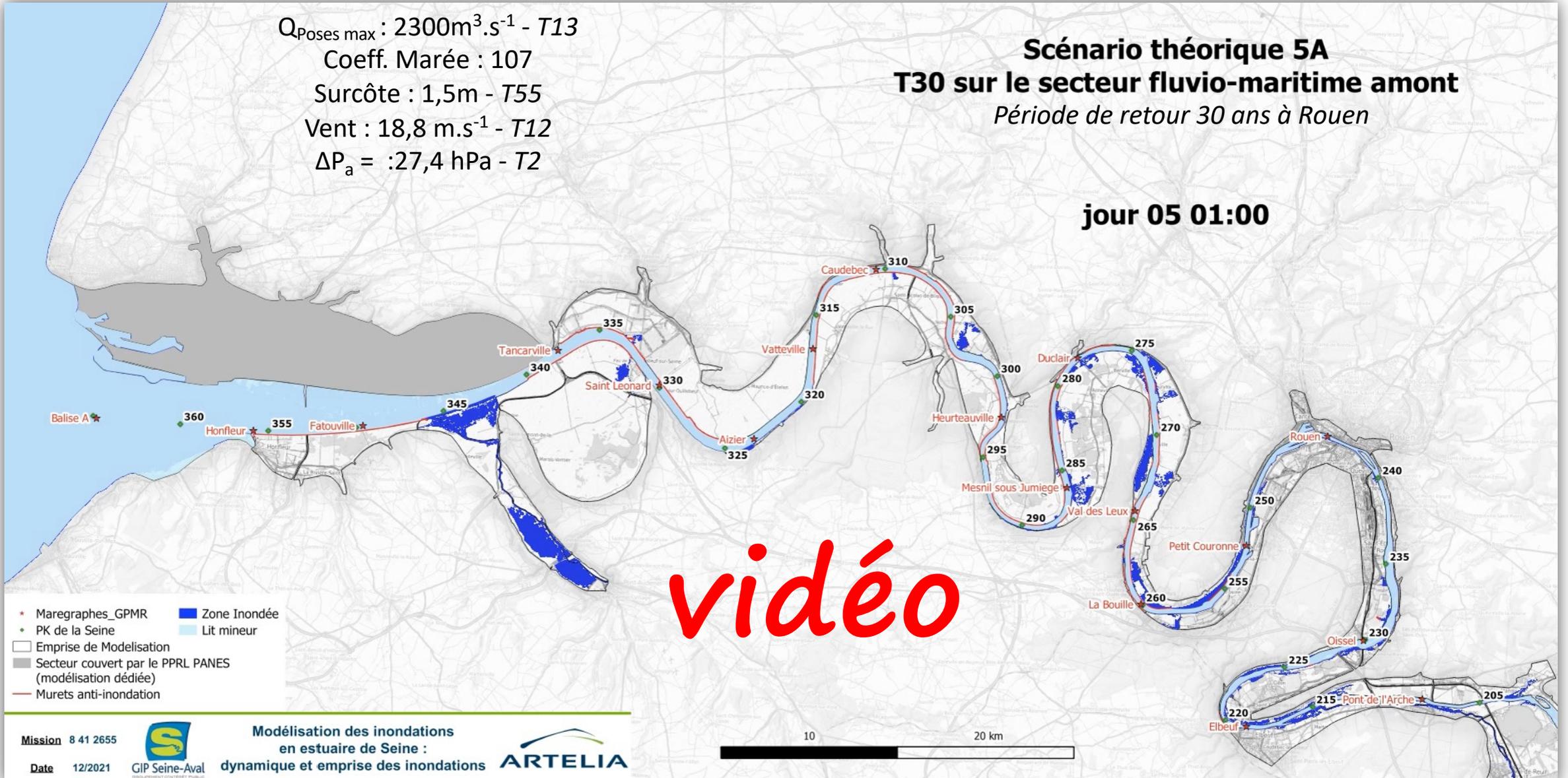
Vent : 18,8 m.s⁻¹ - T12

$\Delta P_a = :27,4 \text{ hPa} - T2$

Scénario théorique 5A
T30 sur le secteur fluvio-maritime amont

Période de retour 30 ans à Rouen

jour 05 01:00

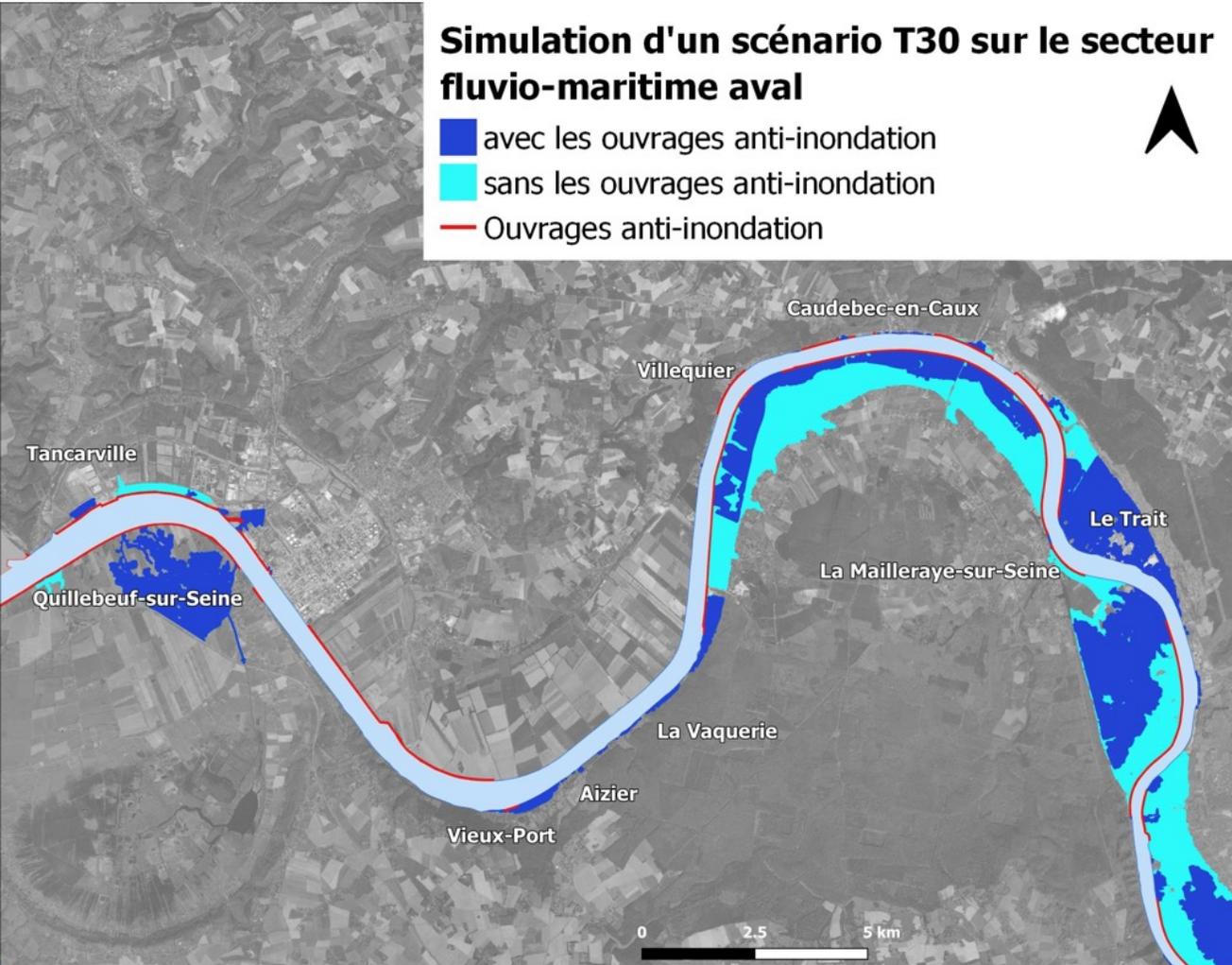


- * Maregraphes_GPMR
- PK de la Seine
- Emprise de Modelisation
- Secteur couvert par le PPRL PANES (modélisation dédiée)
- Murets anti-inondation
- Zone Inondée
- Lit mineur

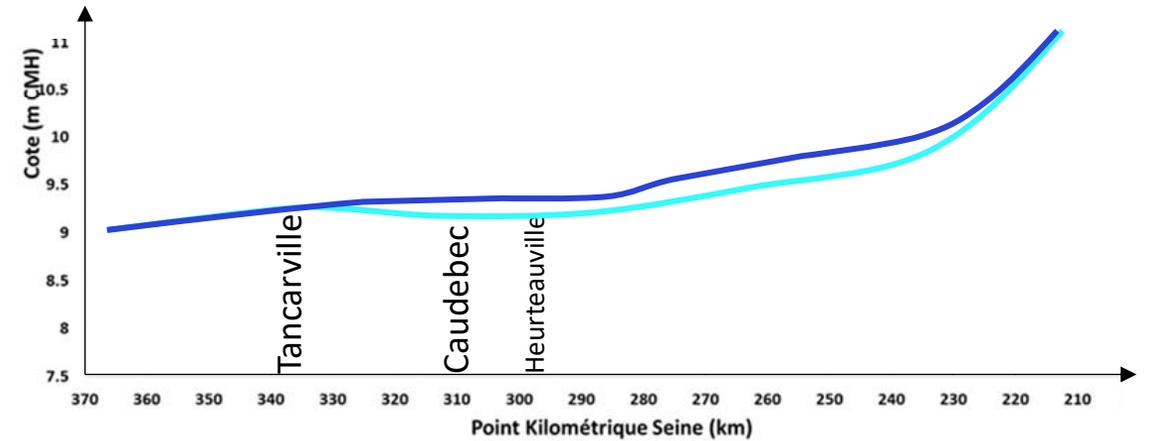
Modélisation des inondations

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



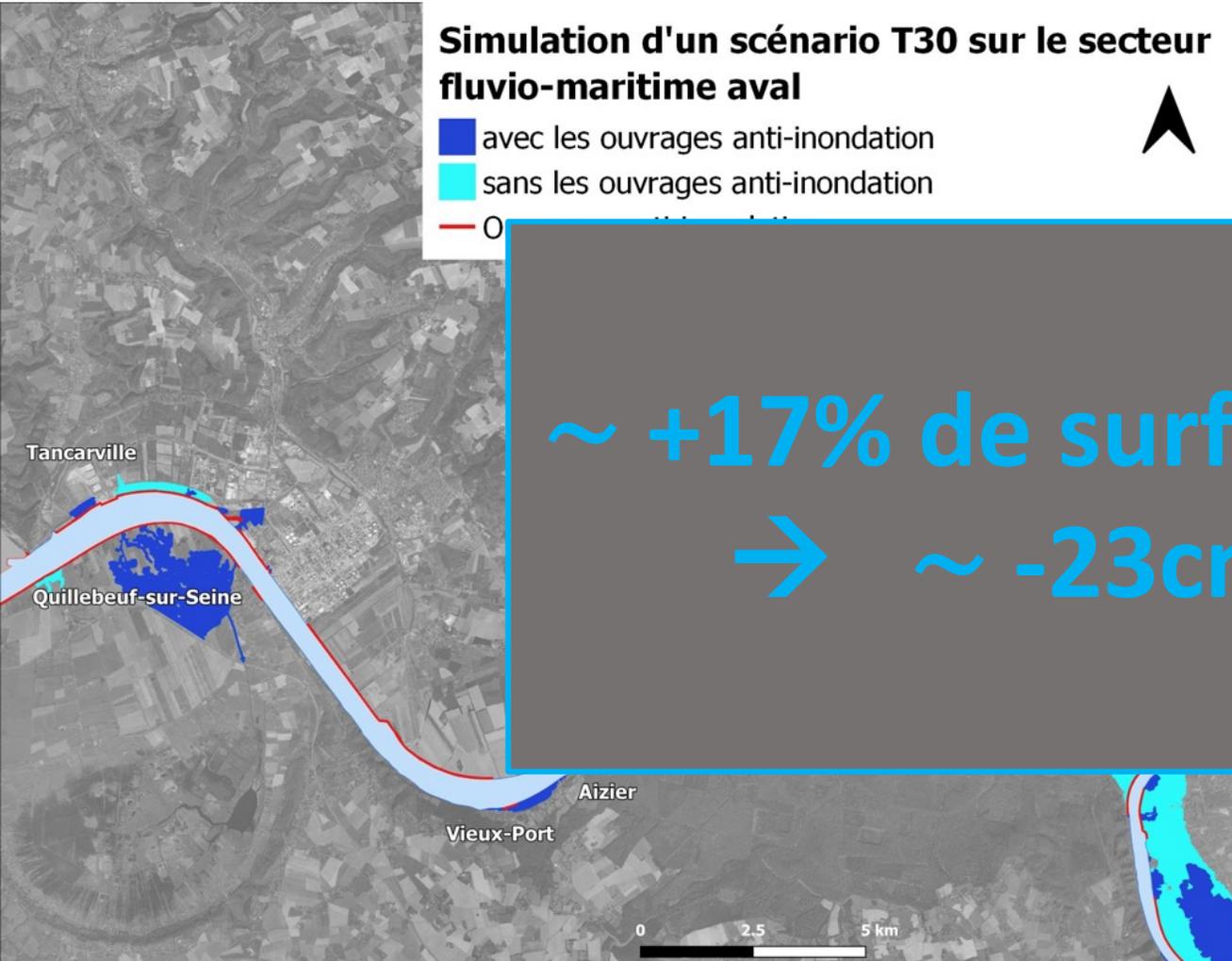
Modélisation des inondations

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

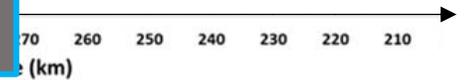
- avec les ouvrages anti-inondation
- sans les ouvrages anti-inondation
- 0



T30 - Heurteauville



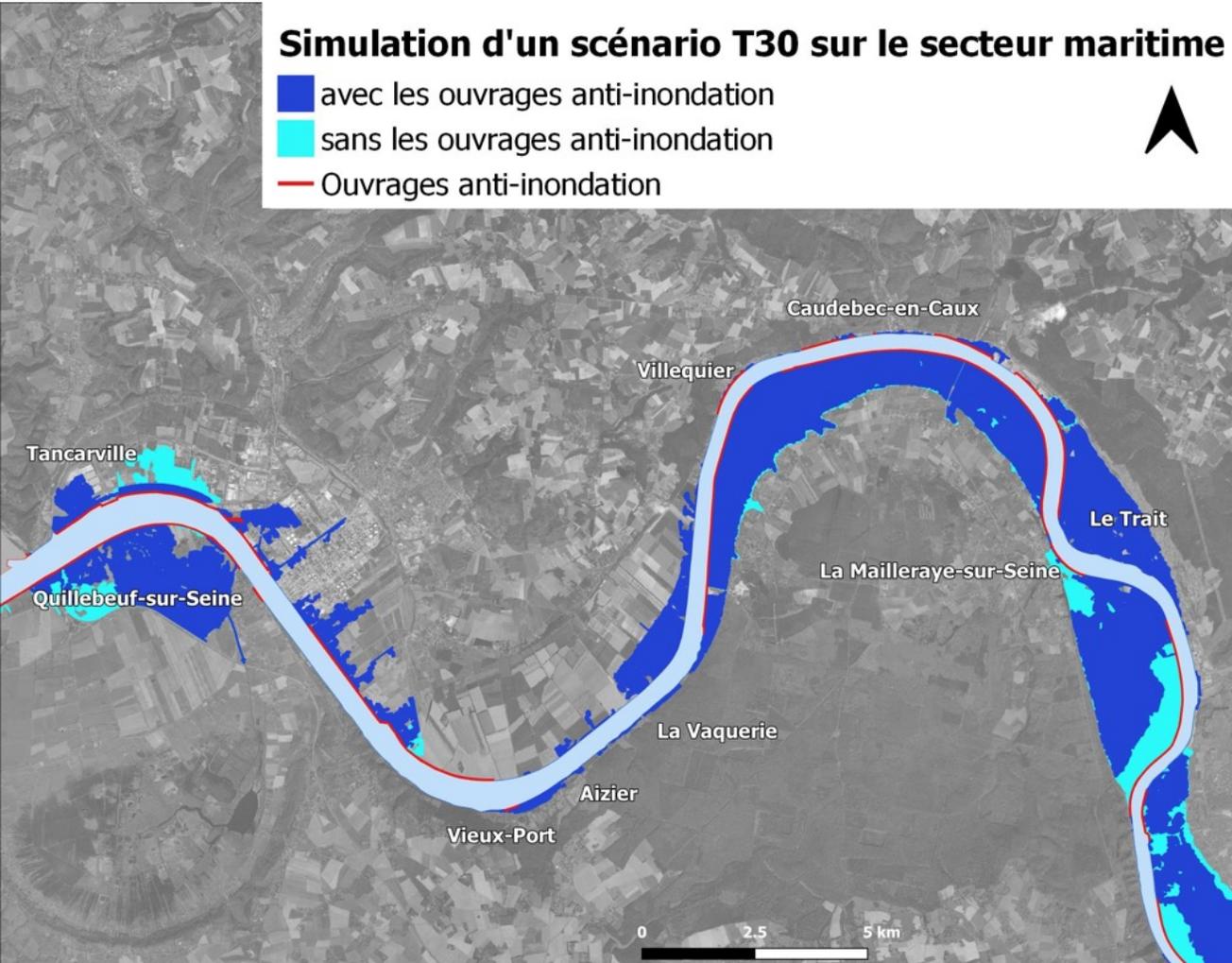
~ +17% de surfaces inondées
→ ~ -23cm à Rouen



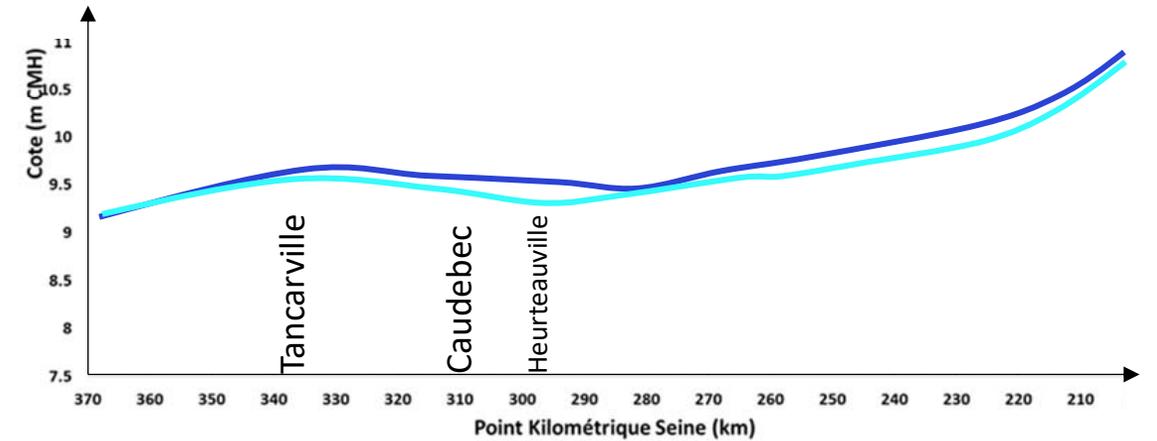
Modélisation des inondations

Simulation d'un scénario T30 sur le secteur maritime

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



T30 - Tancarville



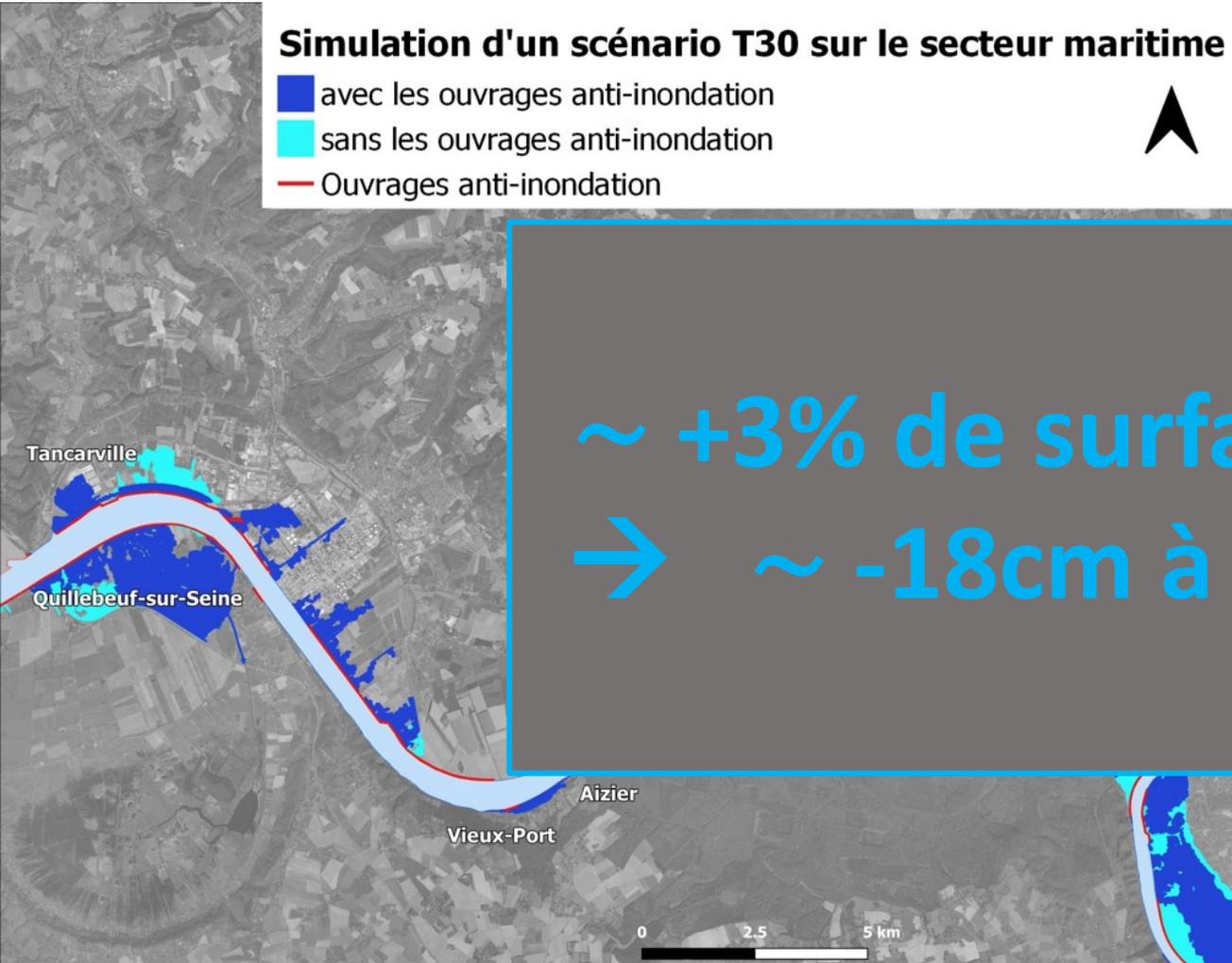
Modélisation des inondations

Simulation d'un scénario T30 sur le secteur maritime

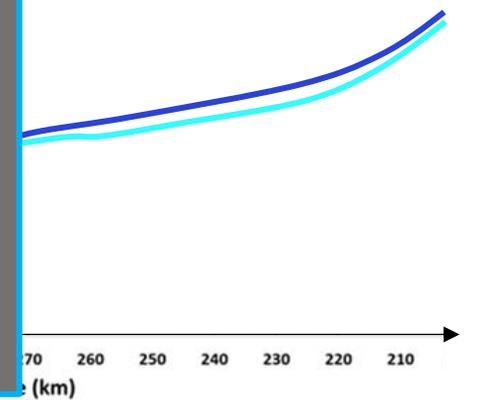
- avec les ouvrages anti-inondation
- sans les ouvrages anti-inondation
- Ouvrages anti-inondation



T30 - Tancarville



~ +3% de surfaces inondées
→ ~ -18cm à Heurteauville



Modélisation des submersions

Bilan

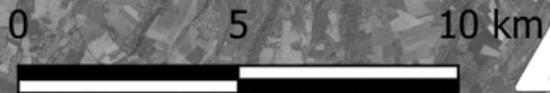
- L'estuaire de la Seine est régulièrement exposé aux inondations
 - *Niveaux T100 simulés dans des conditions réalistes*
- L'élévation du niveau marin va fortement accroître cette vulnérabilité
- Les murets anti-inondation, en limitant l'étalement des eaux dans le lit majeur, accentuent les niveaux de pleine mer
 - *Des Zones d'Expansion des Crues/submersions permettraient donc de diminuer l'aléa*

2 approches complémentaires

Observations / Analyses
&
Modèles numériques

Surfaces inondables sous une cote de
période de retour

10ans | **10ans +60cm**



calculé à partir du MNT 1m



GIP Seine-Aval



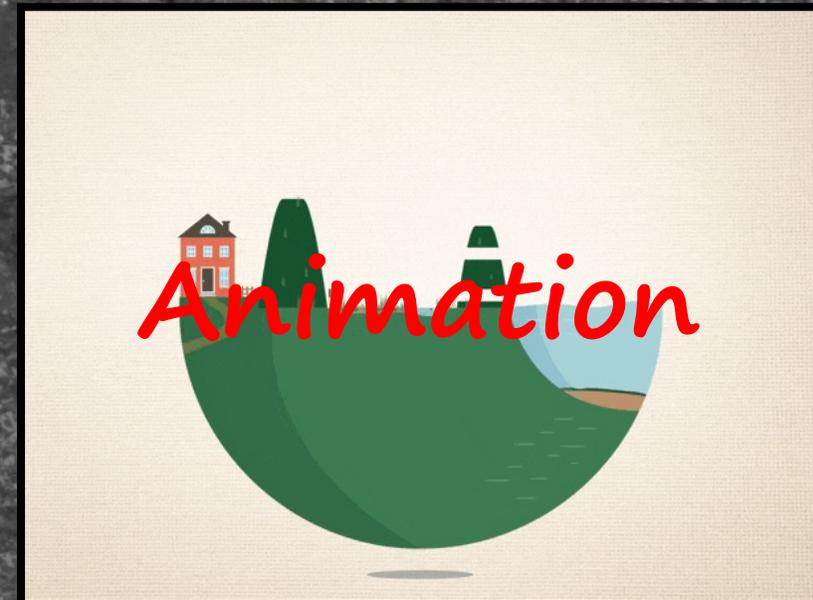
GIP Seine-Aval

PERSPECTIVES

- I. **Acquisition de données sur les emprises inondées**
 - *meilleure compréhension/caractérisation des dynamiques*
 - *amélioration du calage du modèle*
- II. **Progresser dans la caractérisation des extrêmes et leurs répercussions**
 - *notion de temporalité/variabilité à intégrer dans l'analyse statistique (actuellement seulement les Max.)*
 - *quid de l'évolution des statistiques à l'avenir !?*
- III. **Définir la potentialité des Zones d'Expansion des Crues en estuaire**
 - *surfaces minimales, topographie, couverture végétale, position dans l'estuaire*
 - + *Intérêt écologique* → *articulation avec la restauration*
- IV. **Prendre en compte les évolutions morphologiques futures de l'estuaire (induites par le chgt clim et les aménagements)**
 - *lien avec les projets SA6 MorphoSeine et MEANDRES*
- V. **Interactions nappes / rivières**



The Kruikeke Bazel Rupelmonde (KBR)
Controlled Flood Area (CFA)



Journée d'échanges - 10 octobre 2022



GIP Seine-Aval

Merci

plus d'informations → jplemoine@seine-aval.fr