



GIP Seine-Aval
GROUPEMENT D'INTERÊT PUBLIC

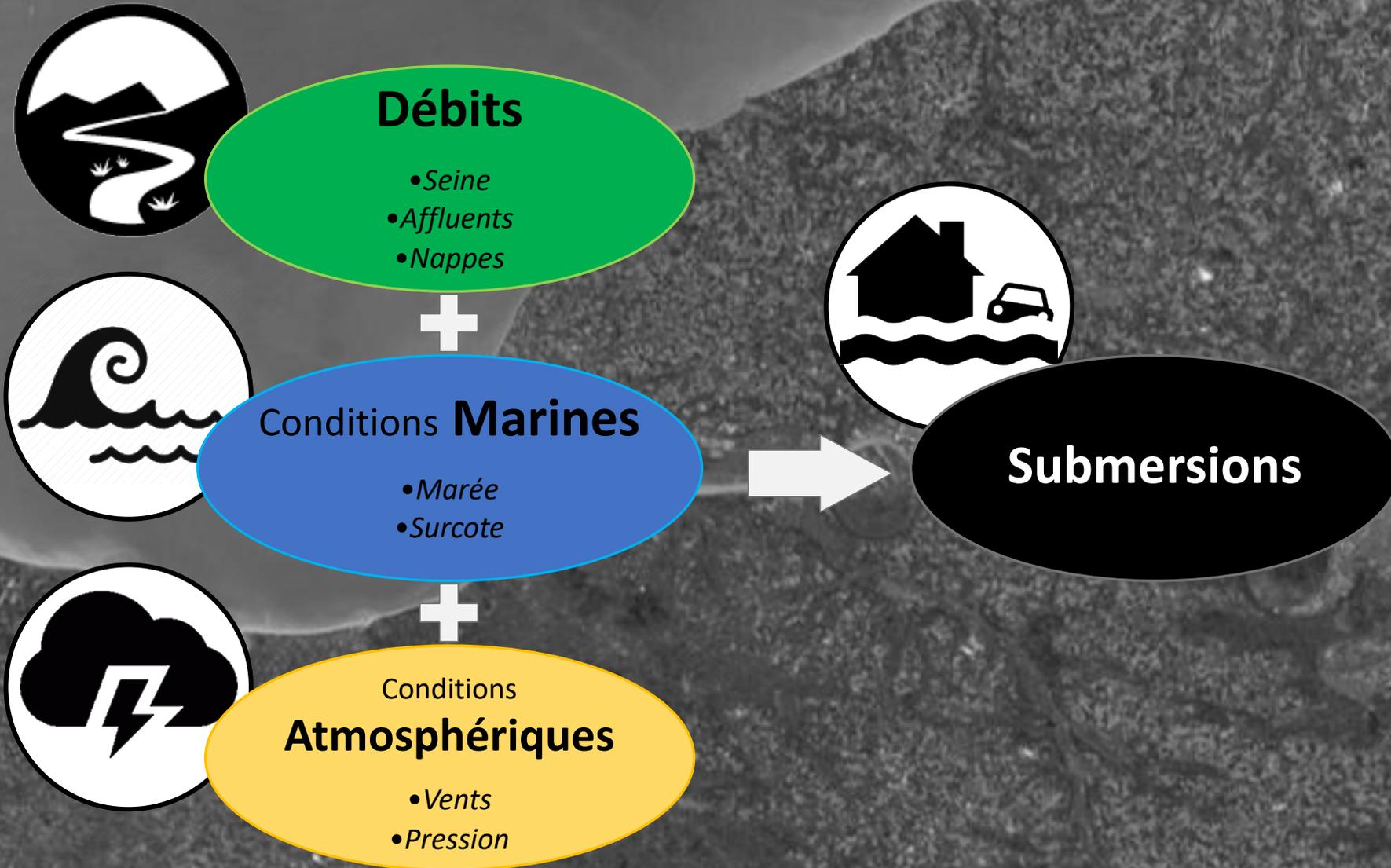
Risque inondation et changement climatique

*Etat des connaissances et
perspectives de recherche*

Jean-Philippe LEMOINE

avec les contributions de ...





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 Axes :

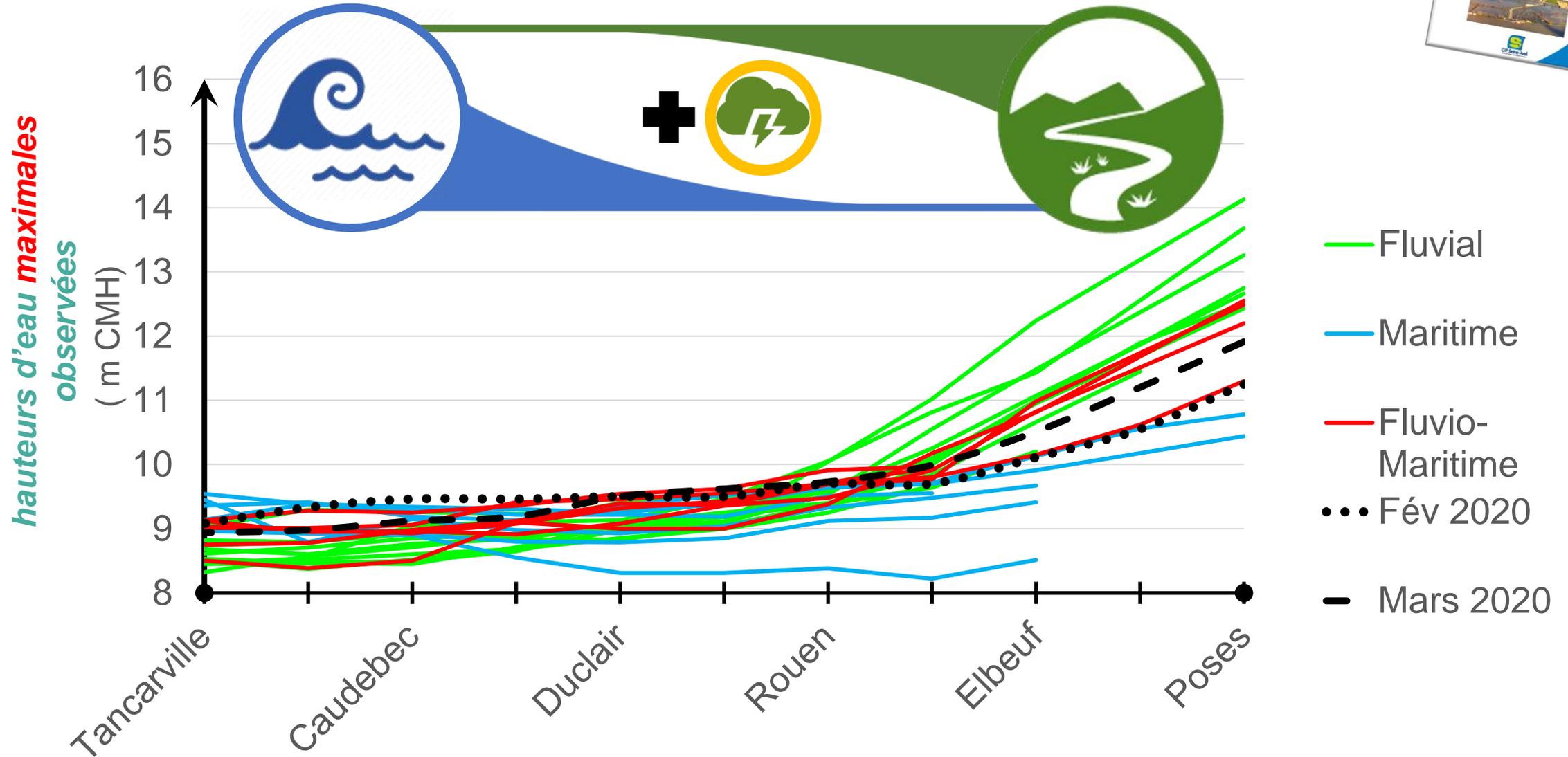
1. Analyse des évènements historiques
2. Modélisation

DDTM76 SMGSN
Le Havre Métropole
Seine-Eure
Metropole Rouen Normandie

Seine-Maritime
HAROPA
AESN
DDTM27
DREAL
Service Prévision des Crues
Caux Seine Agglo
Caux Vallée de Seine
Roumois Seine



Analyse des événements historiques

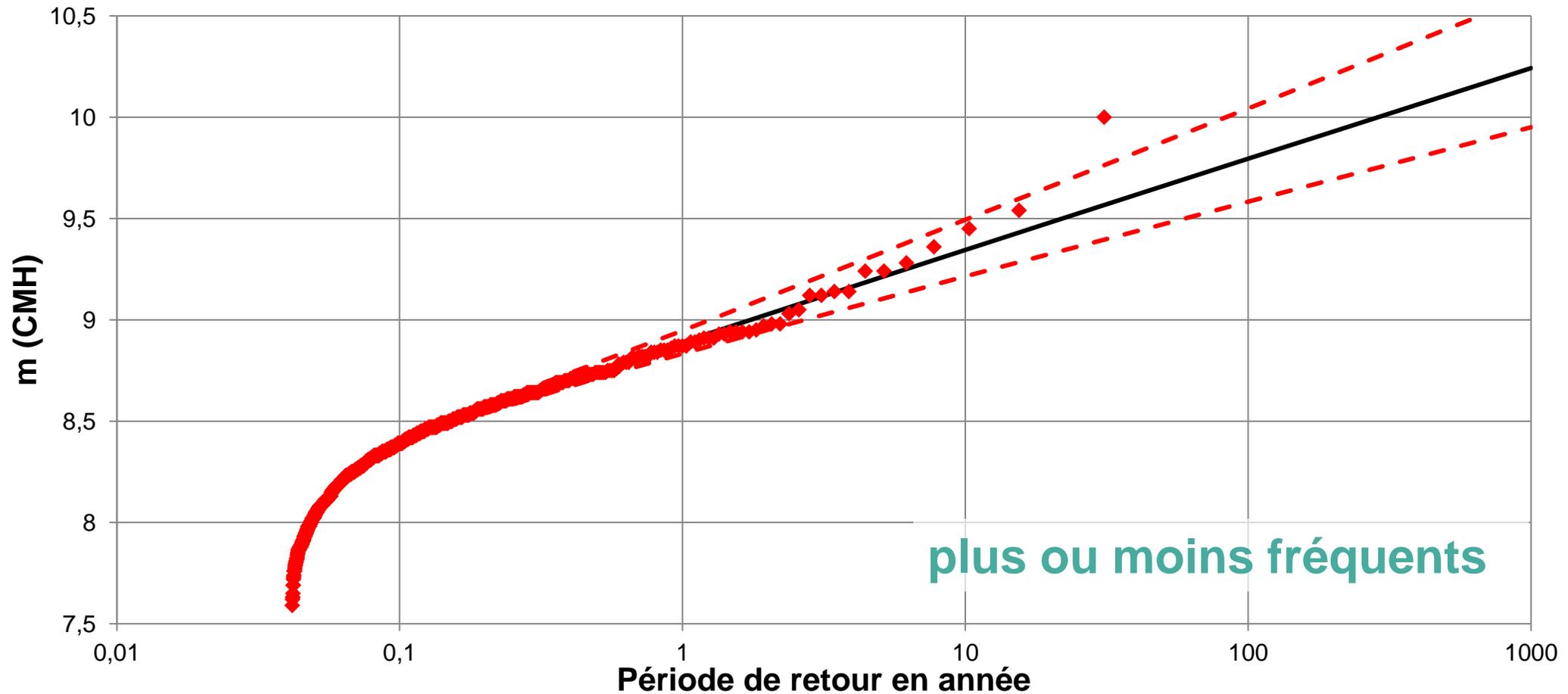


Analyse des événements historiques



Tancarville

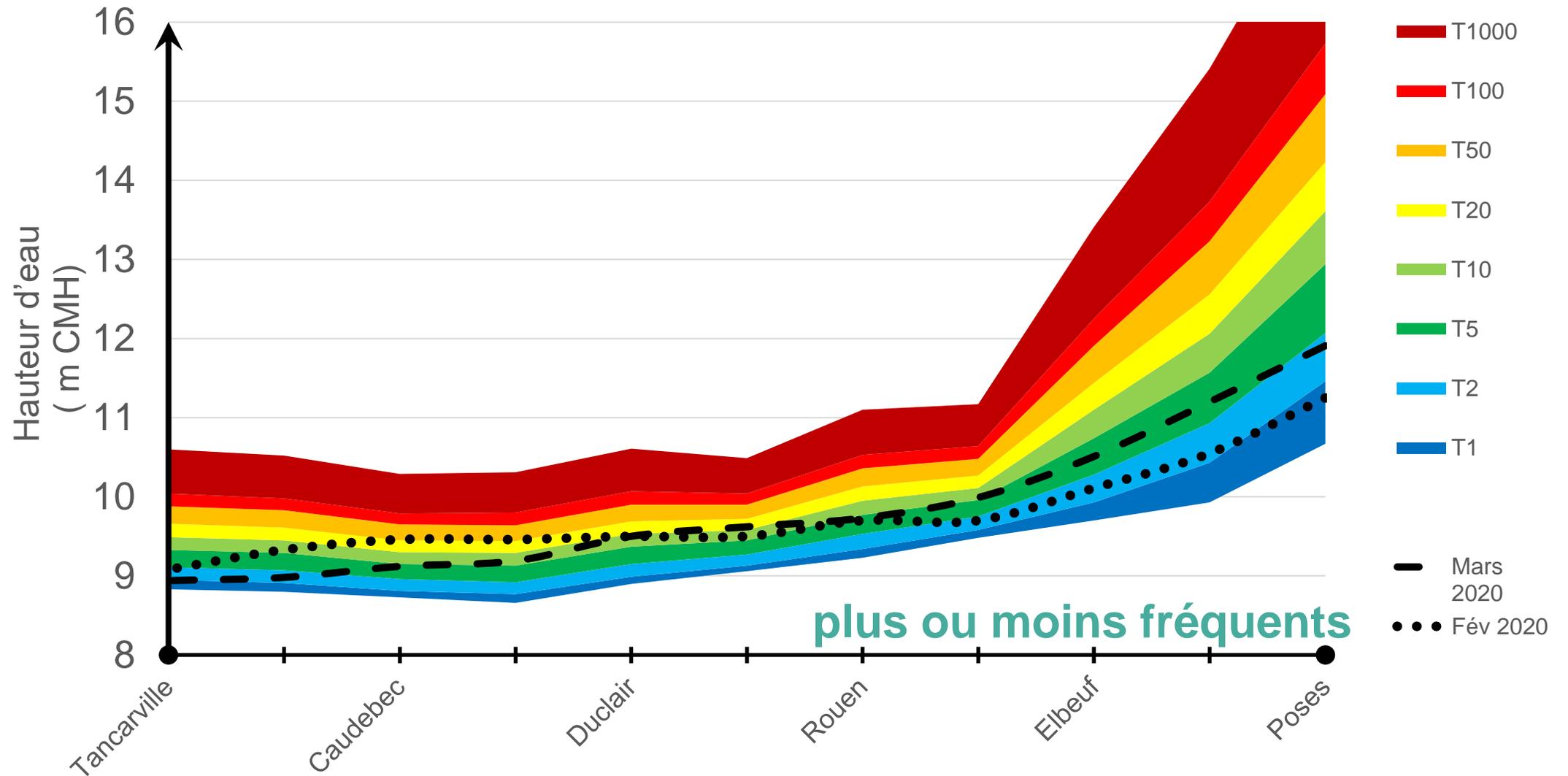
Niveaux d'eau et période de retour - *Loi Gamma* sur 31 ans



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



Analyse des événements historiques





Zoom sur l'évènement de Février 2020

Température

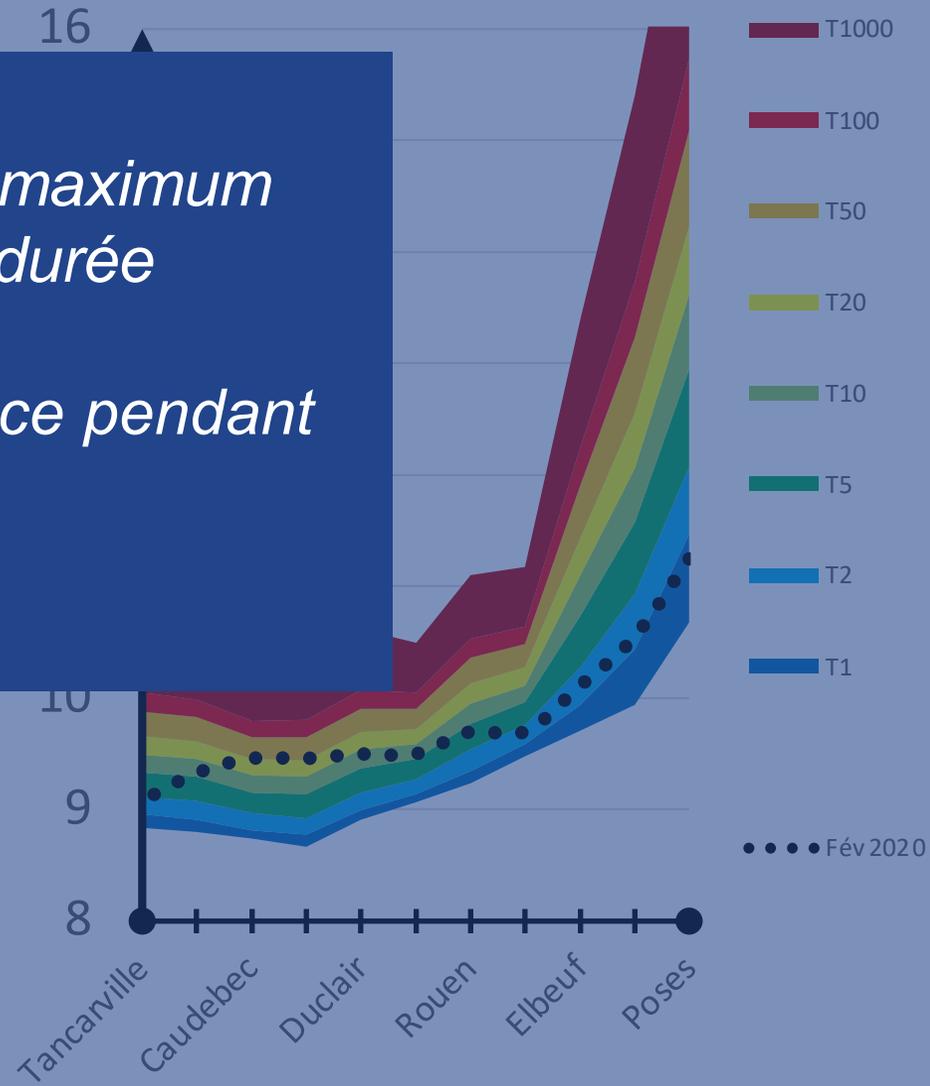
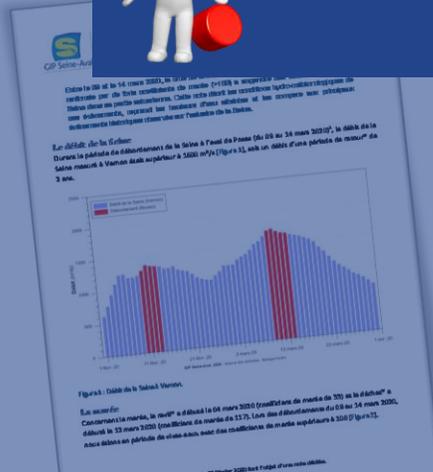
- 20 à 50 ans
- 5 ans à Rouen
- 2 à 5 ans à Poses

→ Tenu plus que



Période de retour basée sur le maximum observé: pas de notion de durée

Quid de la probabilité d'occurrence pendant une telle durée ?





GIP Seine-Aval
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC

Zoom sur l'évènement de Mars 2020

Période de retour des hauteurs d'eau maximales

- 20 ans à Duclair
- 5 ans à Rouen
- 1an à Tancarville

Débit à Poses : 1600 m³/s | Q2

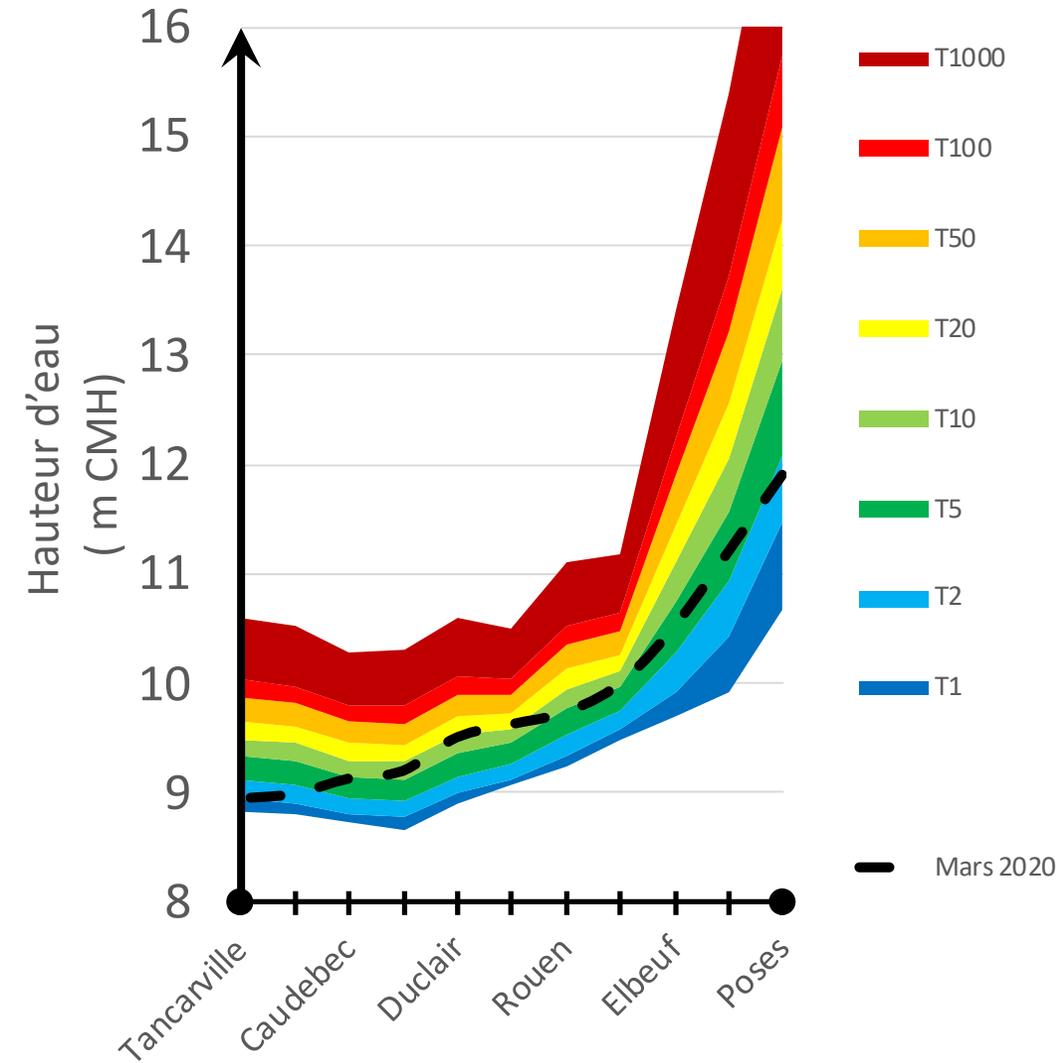
Coeff. de marée : 117 | +++

Surcote en baie : ± 50cm | <T1

Vent : 40km/h de Sud Ouest | <T1

Pression Atmo : ∅

→ Débordement à Rouen pendant 11 pleines mers (débit soutenu + VE)





Zoom sur l'évènement de Mars 2020



- 20
- 5 a
- 1a

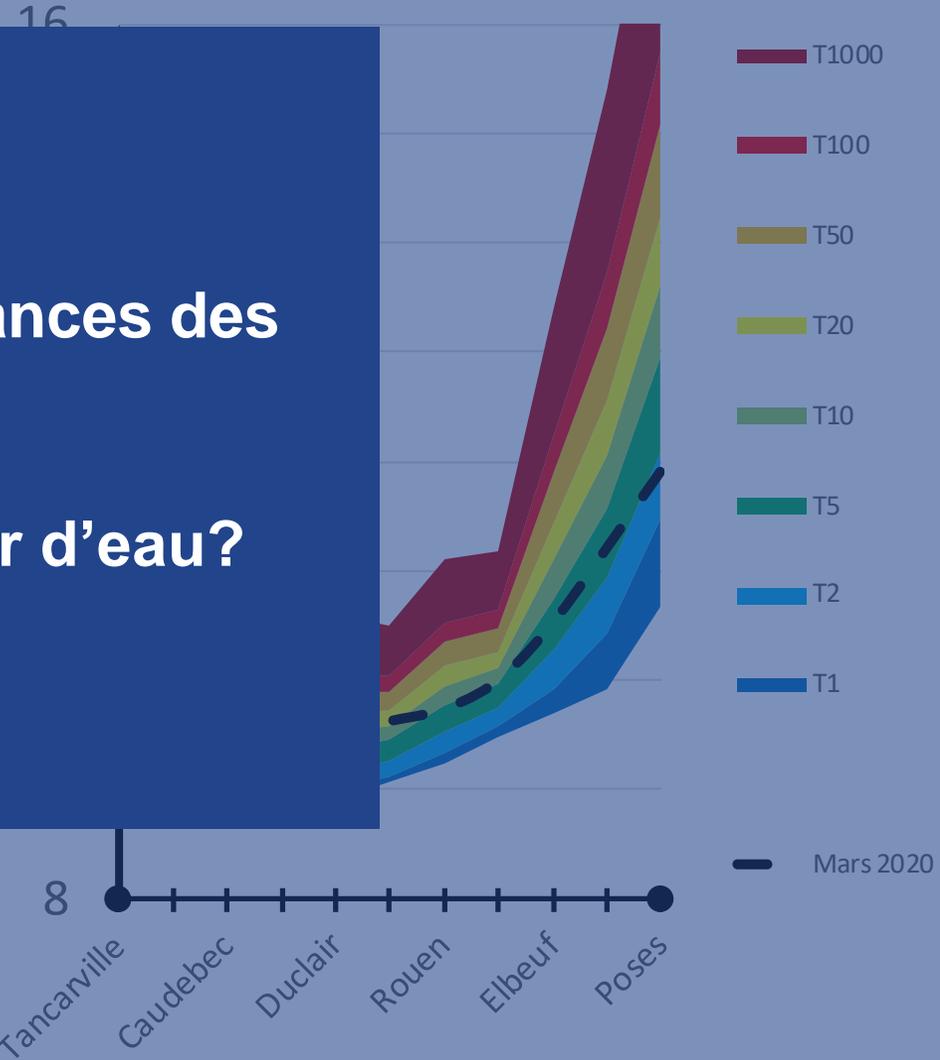
Débit à
Coeff.
Surcot
Vent :
Pressi

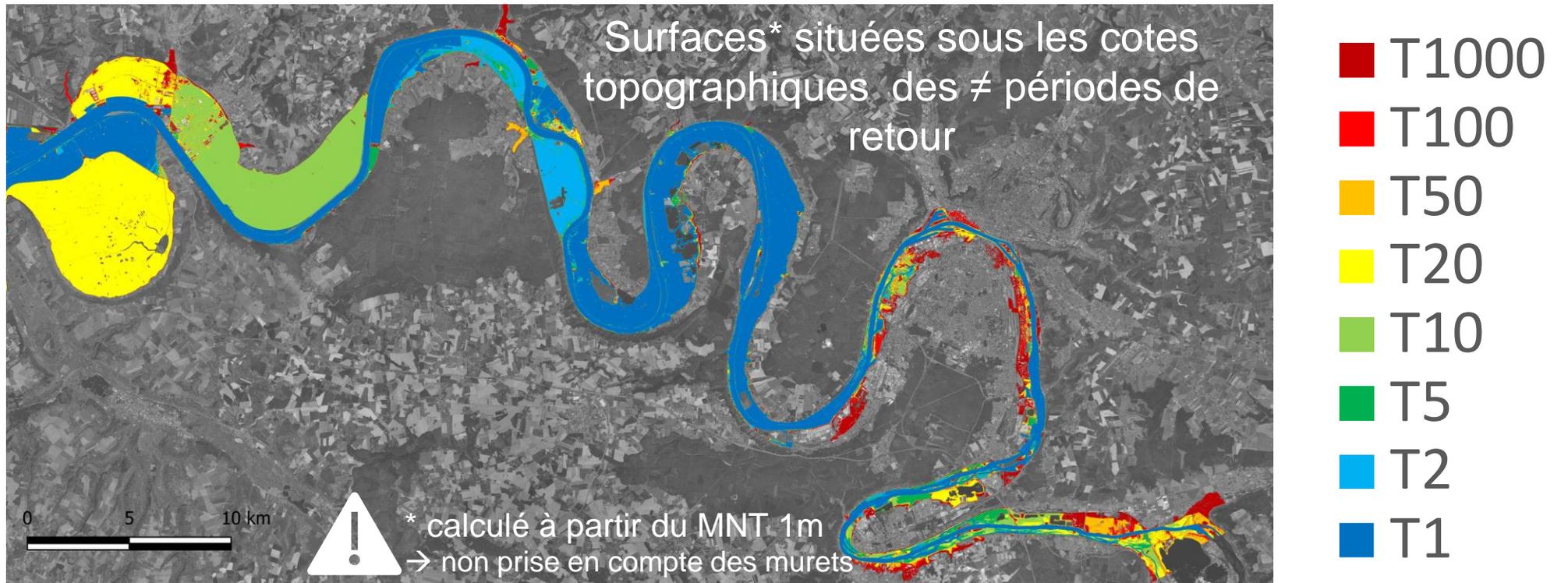
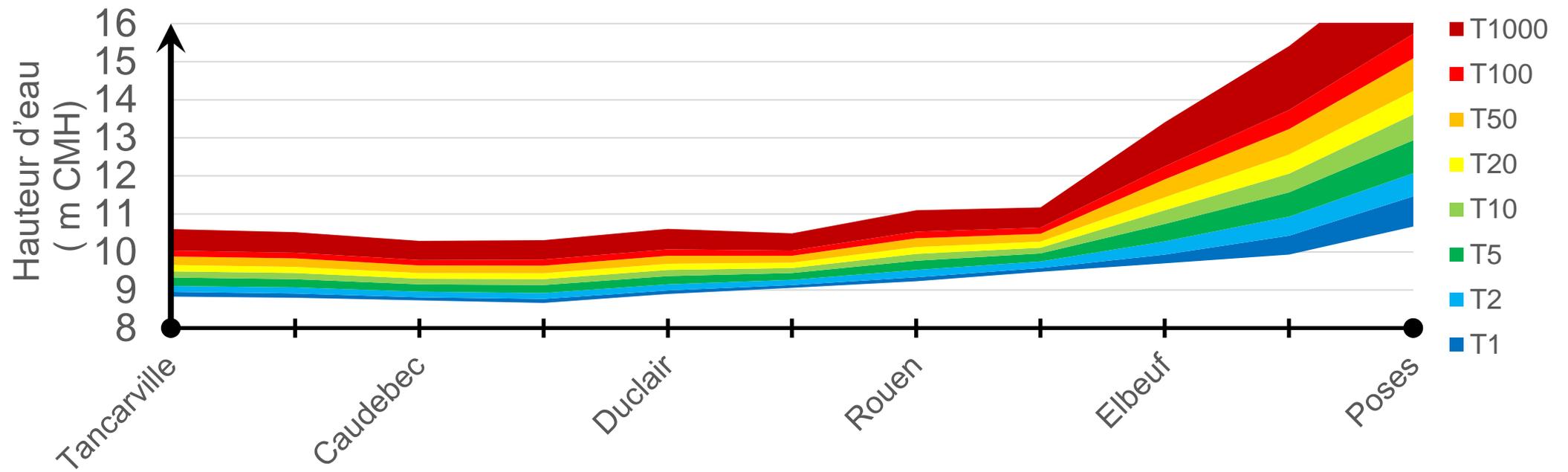


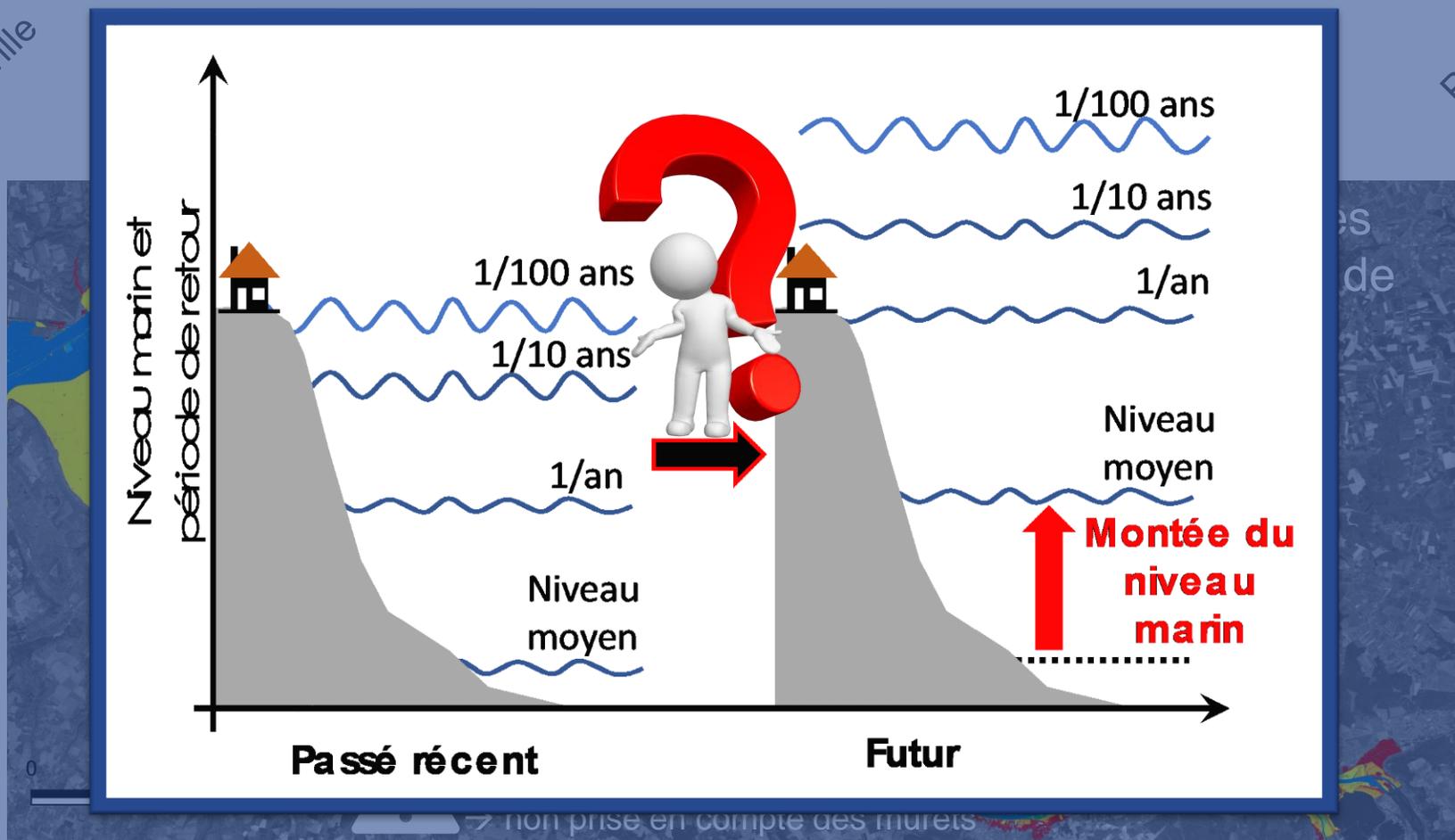
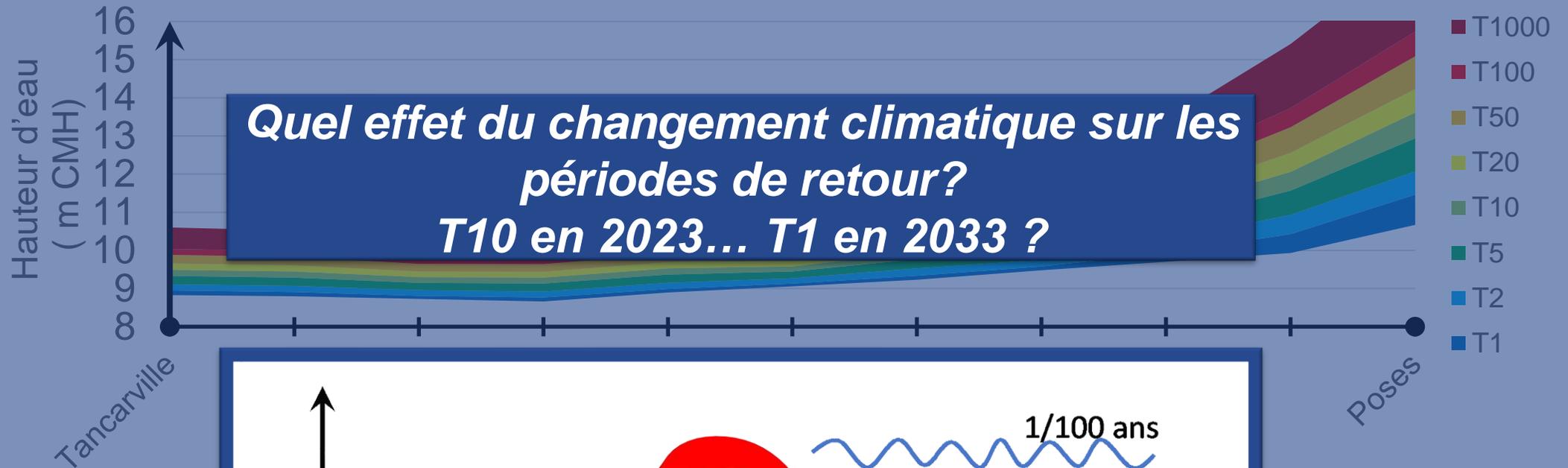
→ temporalités/variabilités/concomitances des forçages ...

quelles conséquences sur la hauteur d'eau?

→ Débordement à Rouen pendant 11
pleines mers (débit soutenu + VE)



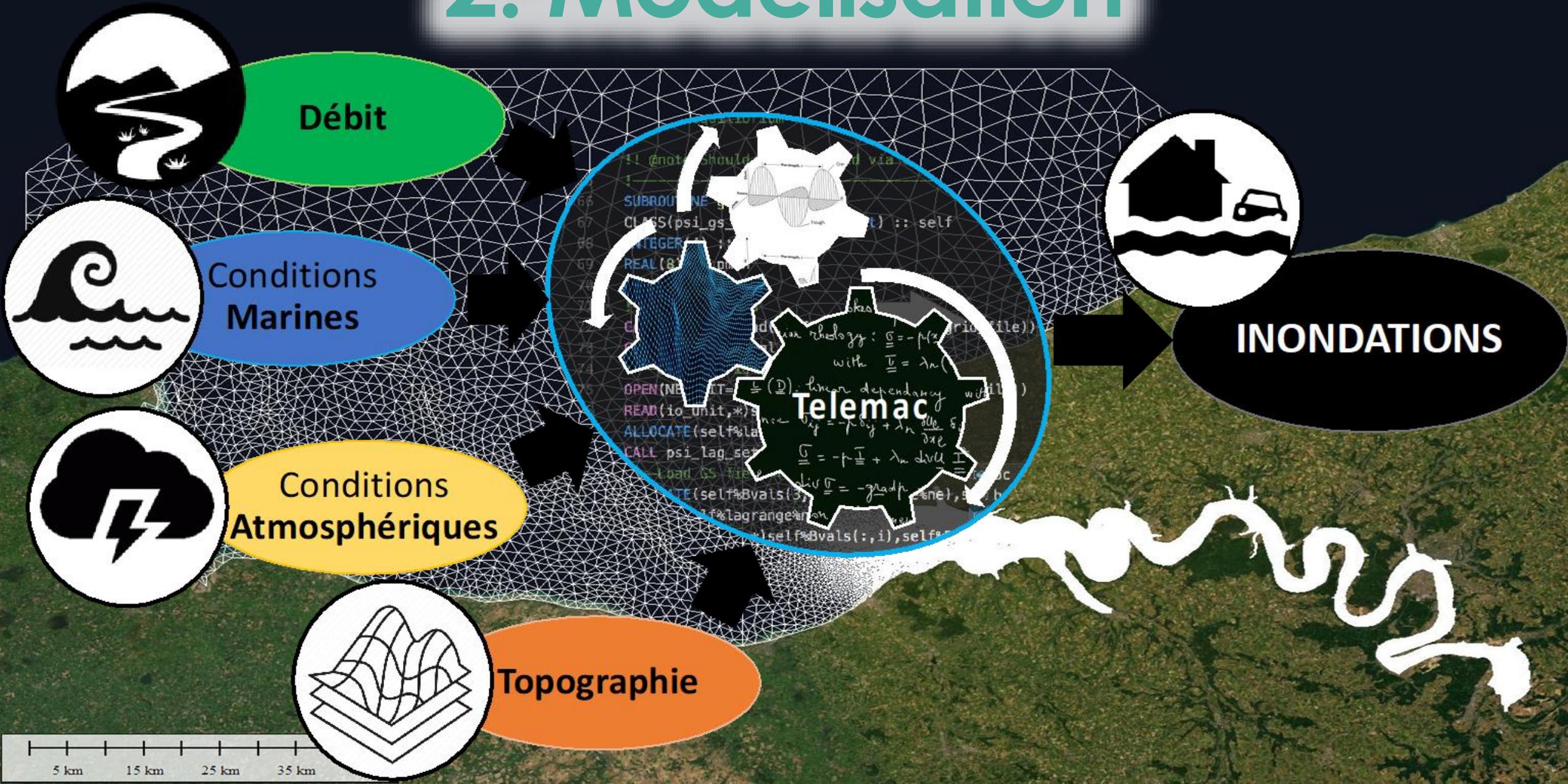




- T1000
- T100
- T50
- T20
- T10
- T5
- T2
- T1



2. Modélisation



2. Modélisation

Objectif : extrapoler 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

→ *Modèle de l'estuaire remobilisable pour d'autres études*

INONDATIONS

Débit

Conditions
Marines

Conditions
Atmosphériques

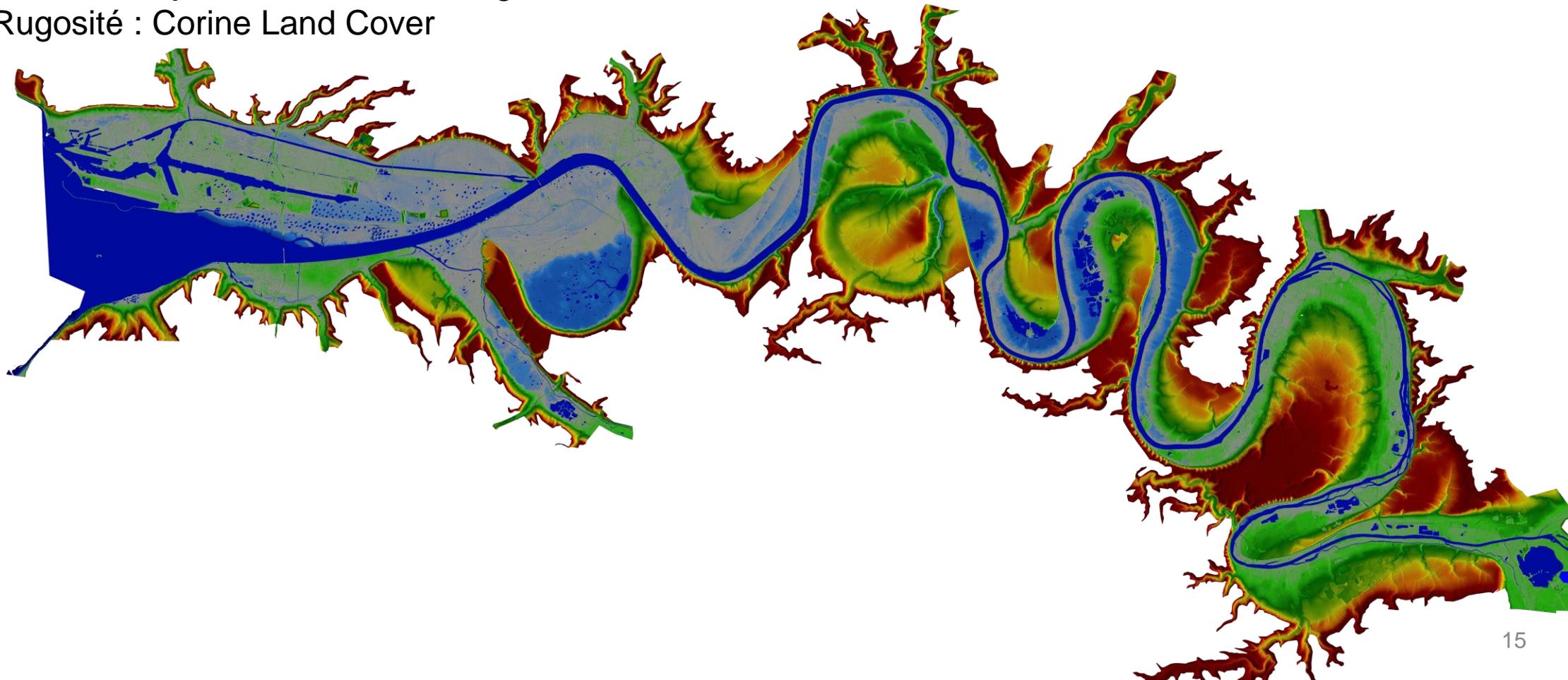
Topographie



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



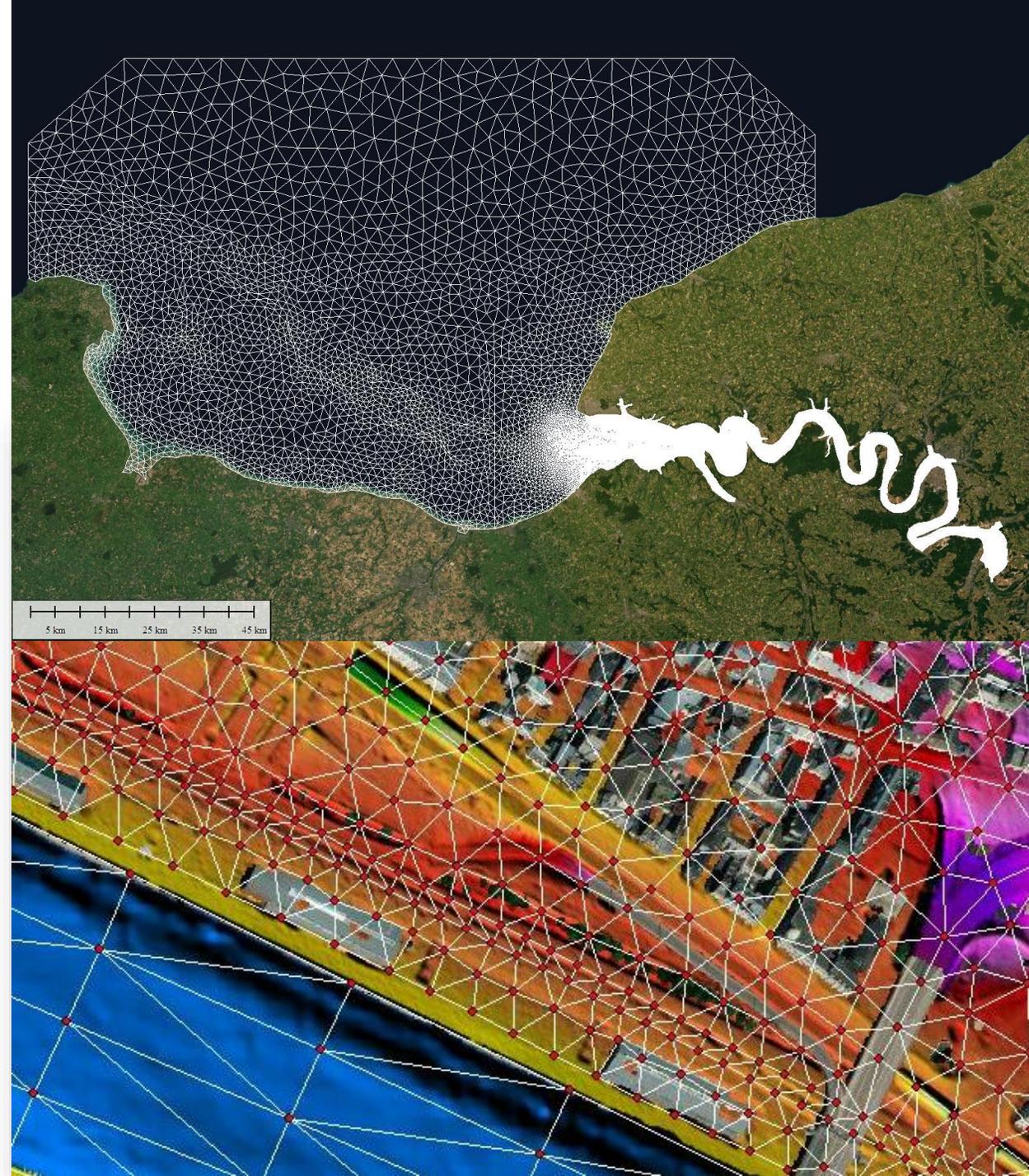
Caractéristiques du modèle

Topographie :

- Lidar GIP Seine-Aval 2010
- Inventaire des ouvrages type murets
+ *màj 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 faibles enjeux + forts gradients



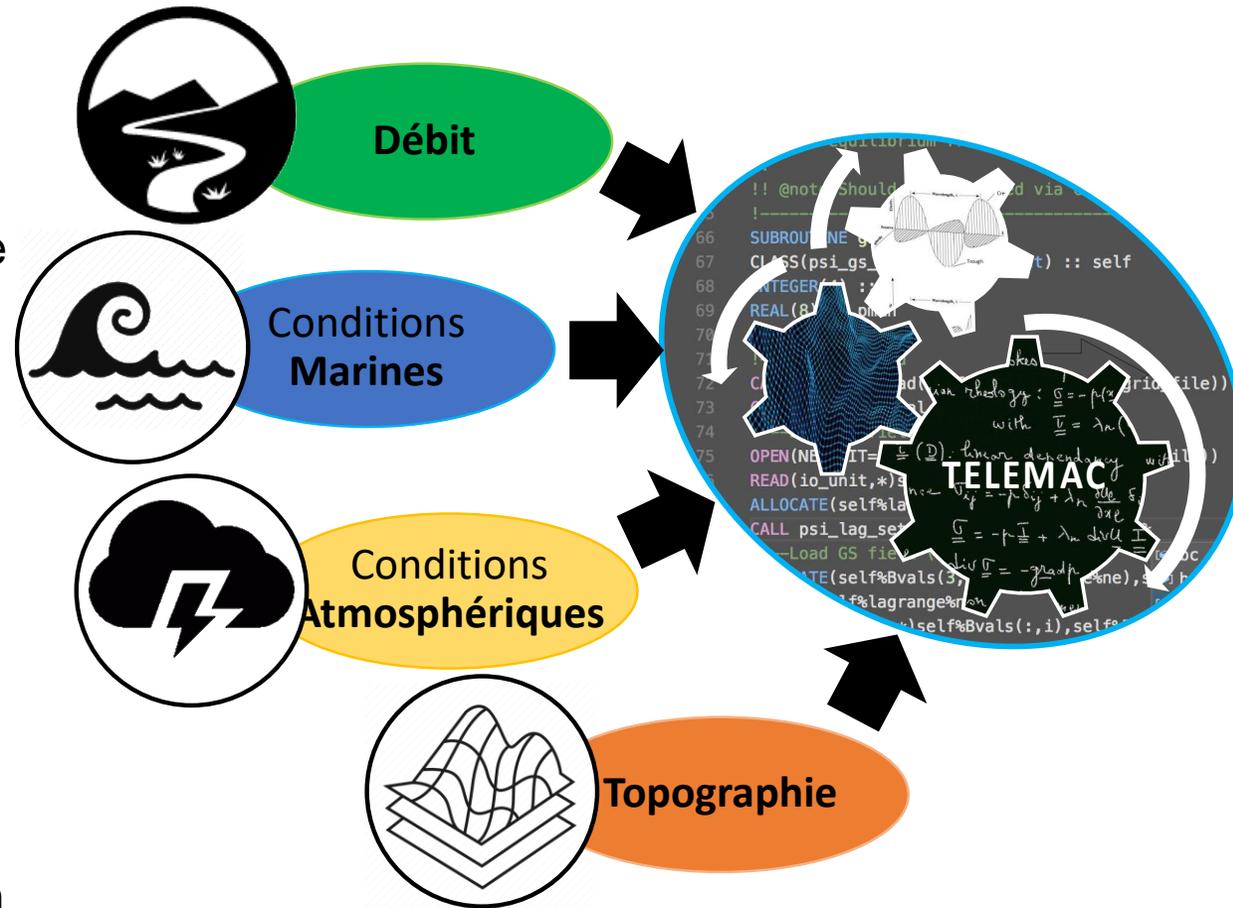
Caractéristiques du modèle

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 faibles 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)

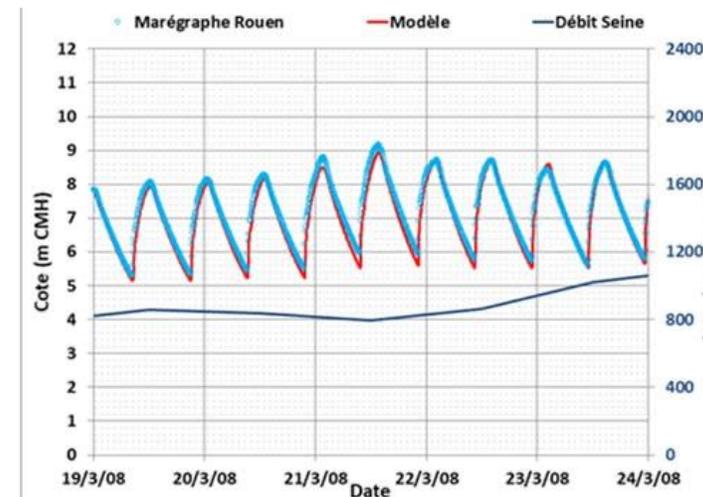
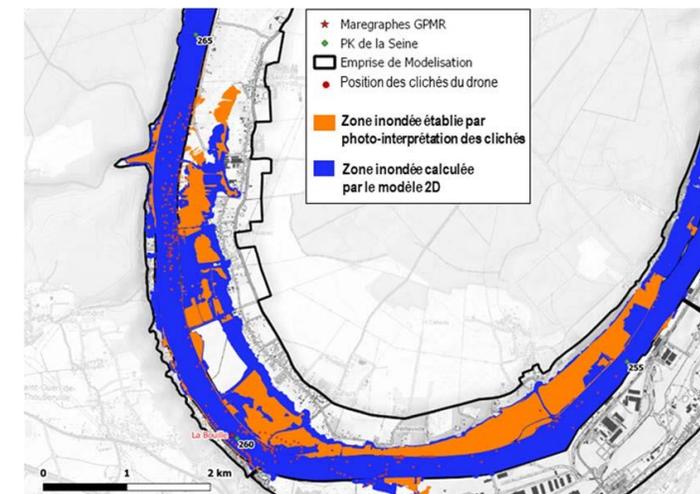
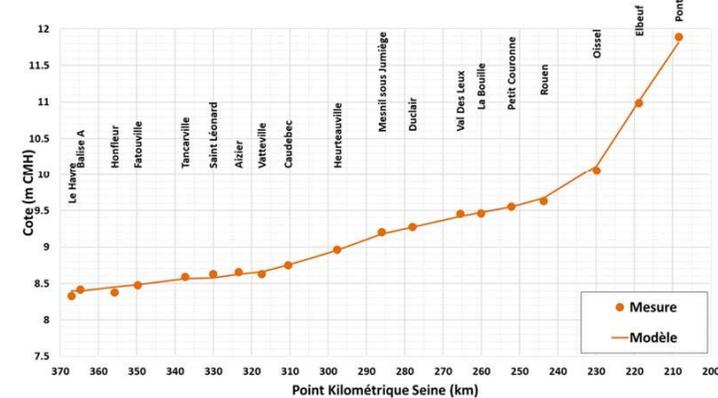
fluvio-maritime : janvier 2018, février et mars 2020

➤ 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

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

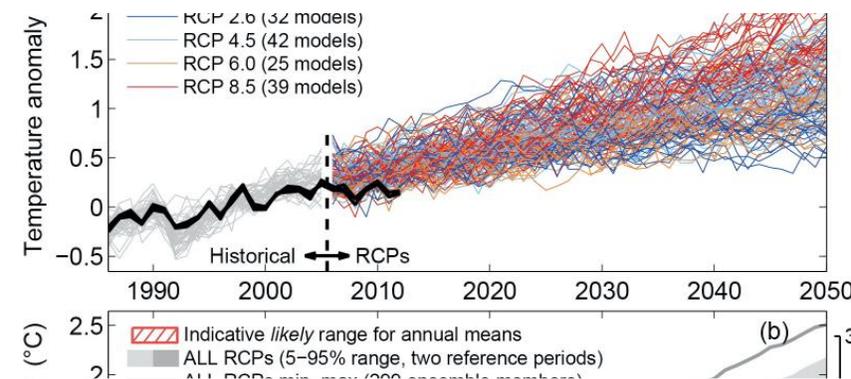
Le modèle simule :

“ le modèle simule 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? ”

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

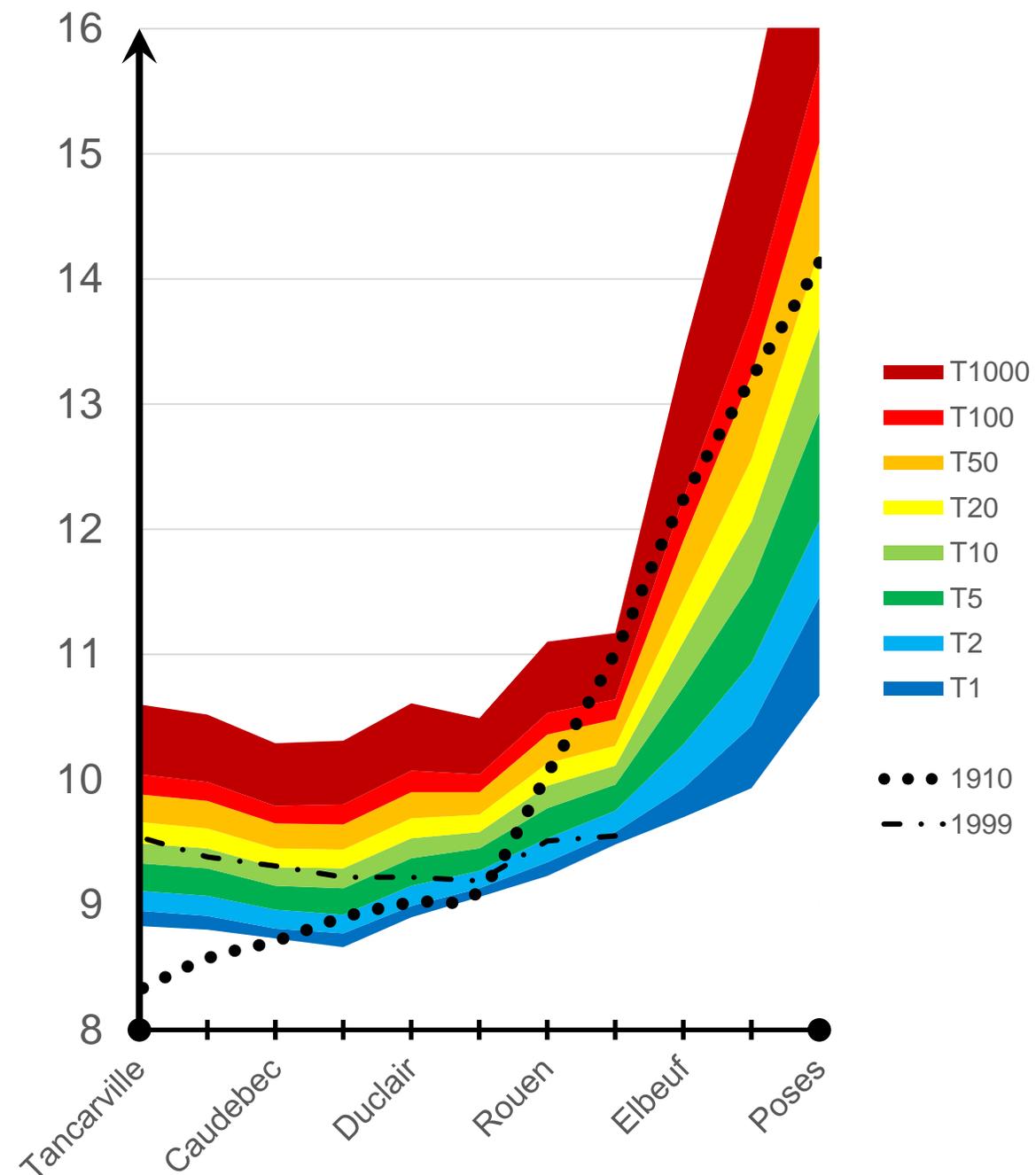


Les scénarios

Réalistes

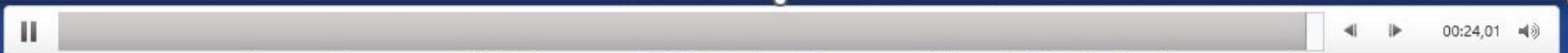
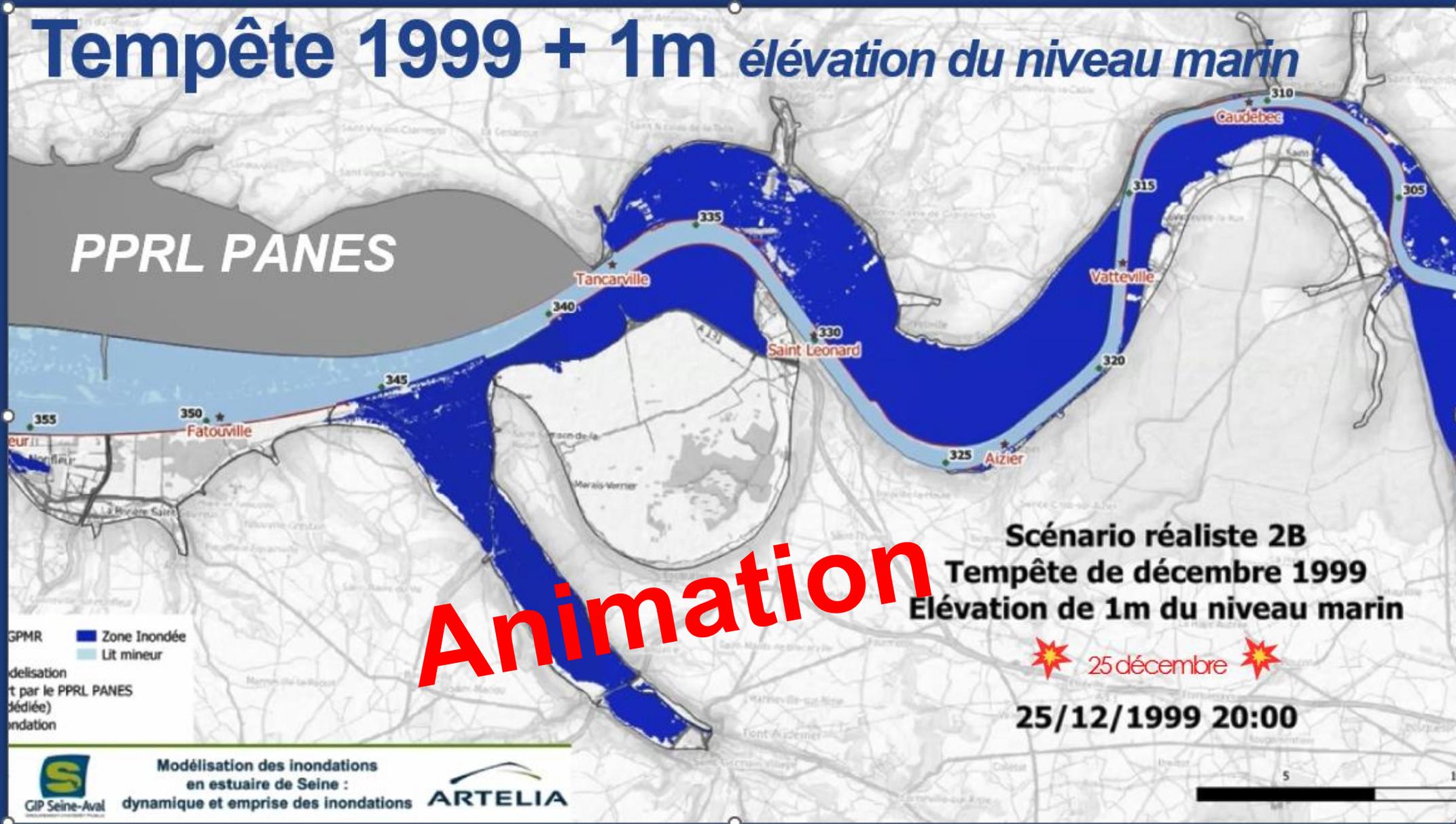
Reproduction d'évènements observés sur la base de la morphologie actuelle + déclinaisons avec et sans élévation du niveau marin

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



Tempête 1999 + 1m élévation du niveau marin

PPRL PANES

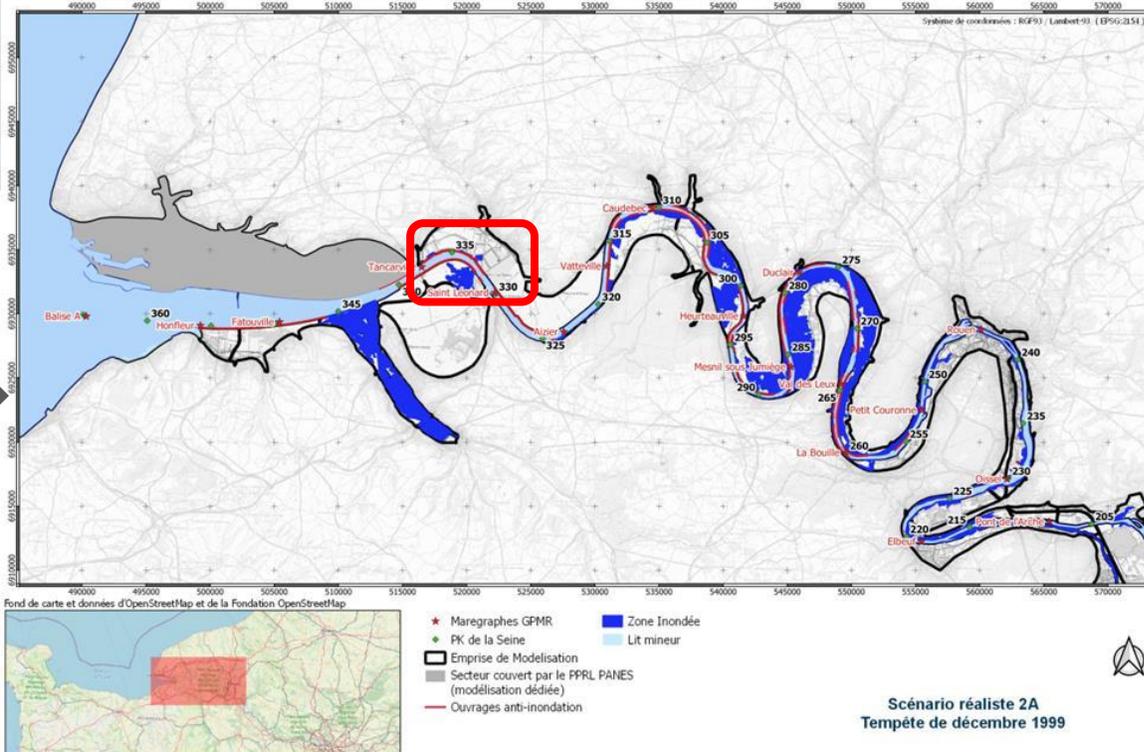


Les niveaux atteints en 1999 entre Tancarville et Port Jérôme sont de période de retour 6 ans !



Niveau Marin

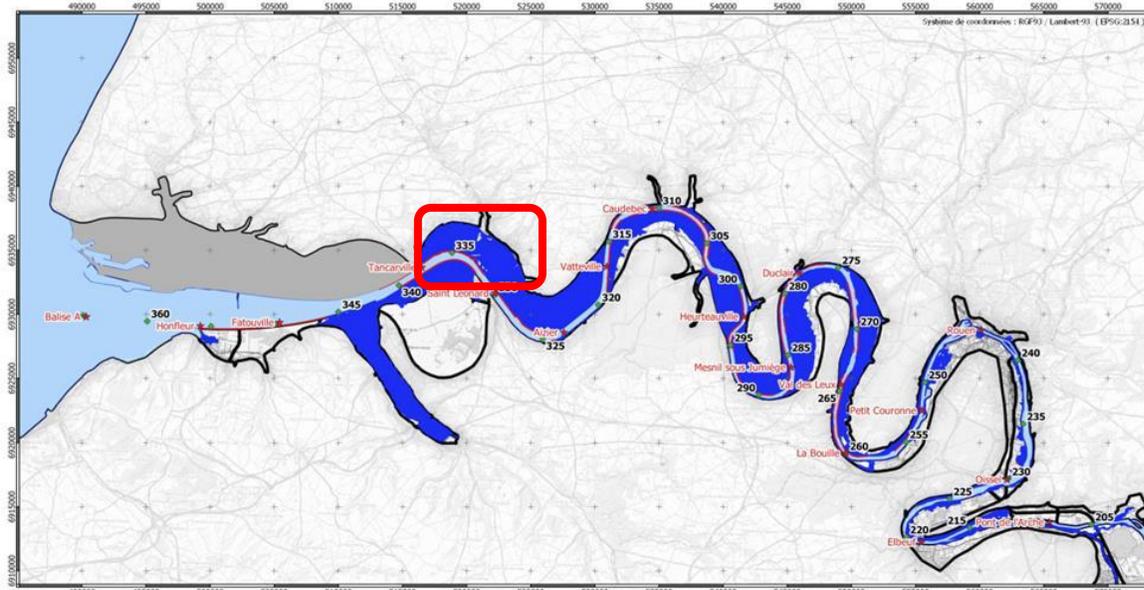
Actuel →



Scénario “Tempête 1999”

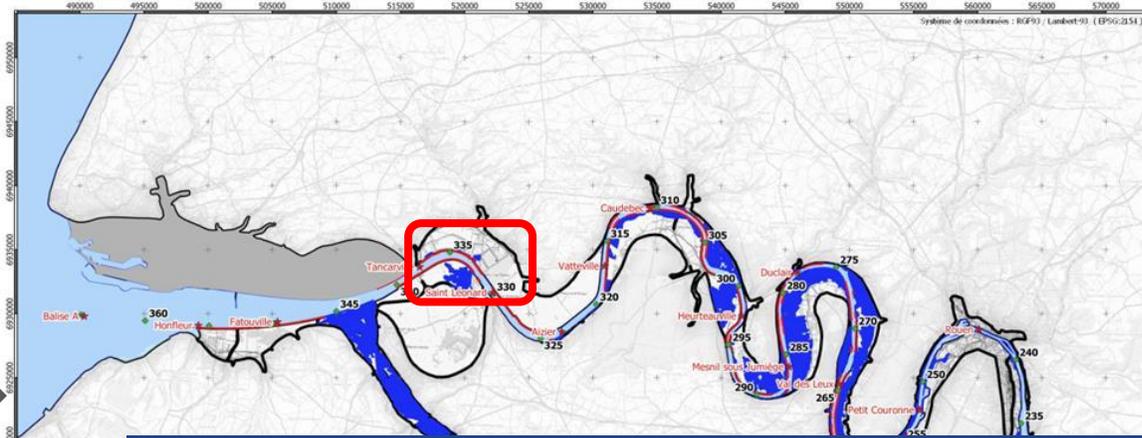


2100
+1m →



Niveau
Marin

Actuel →

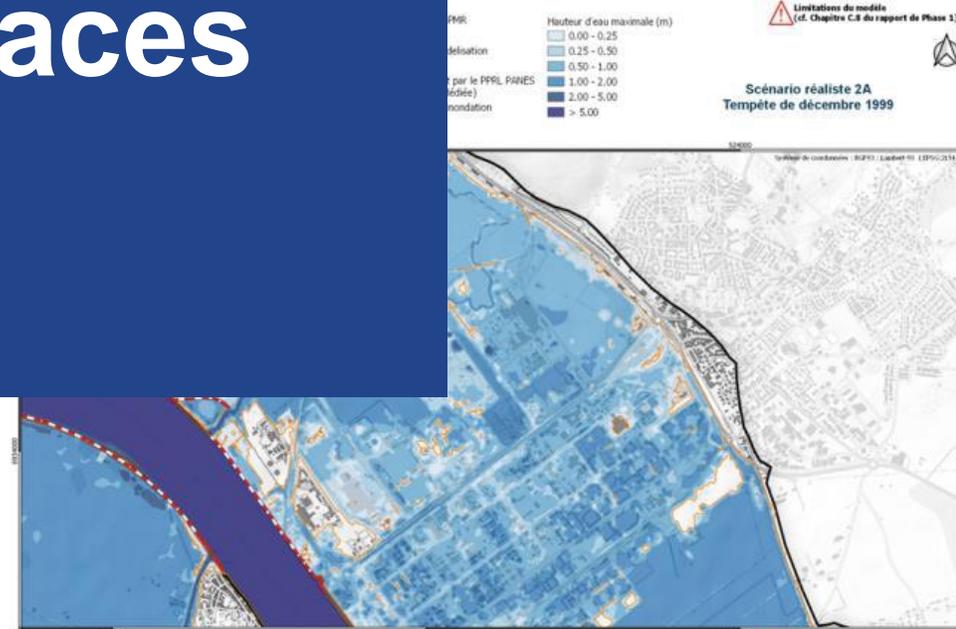
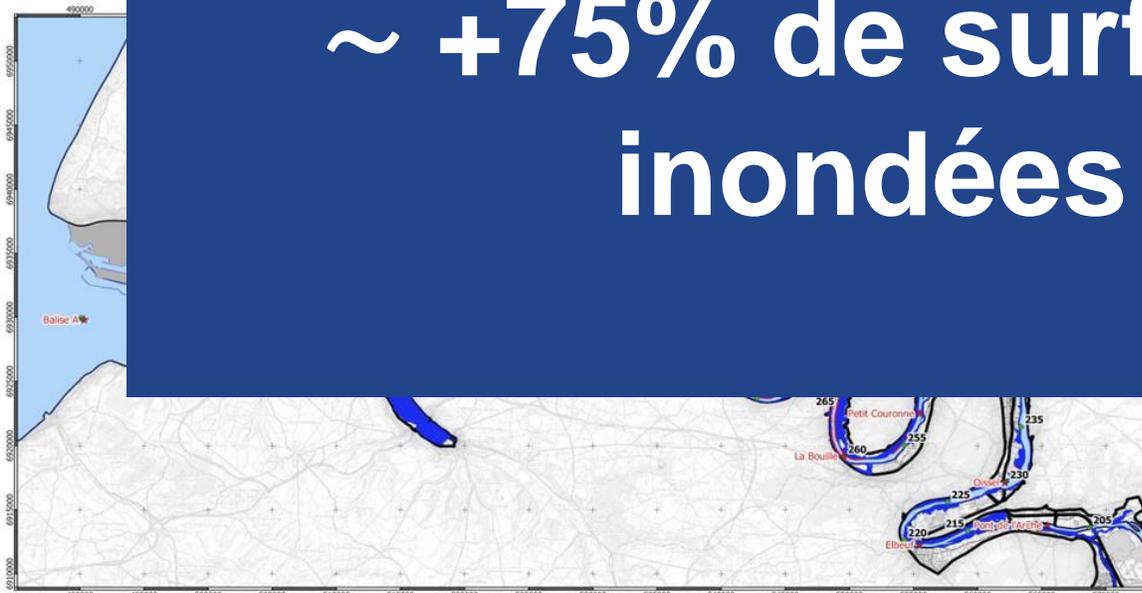


Scénario “Tempête 1999”



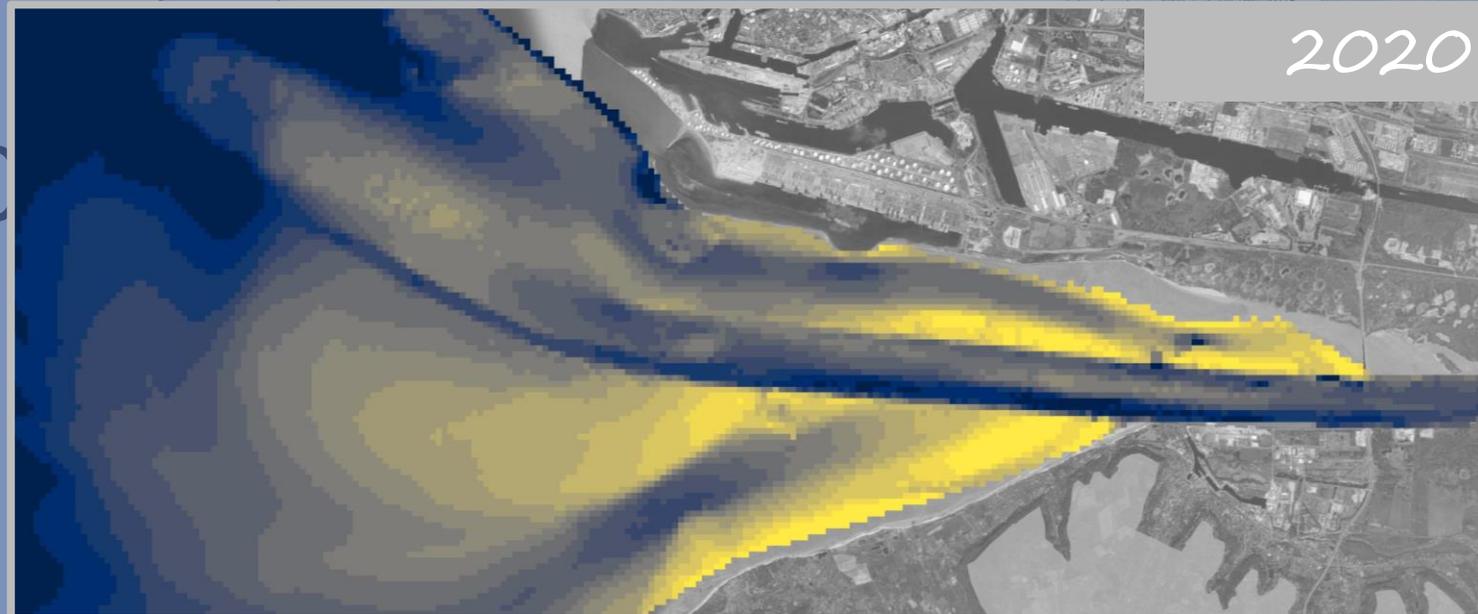
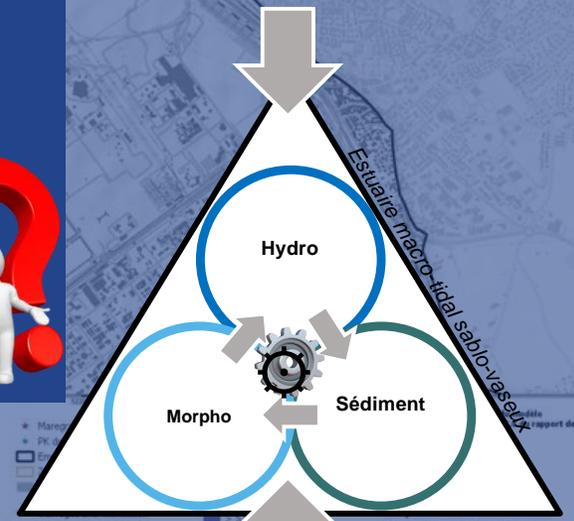
**Élévation NM 1M →
~ +75% de surfaces
inondées**

2100
+1m →





Elévation du niveau marin
→ *bathymétrie différente...*
dynamiques des inondations
différentes ?

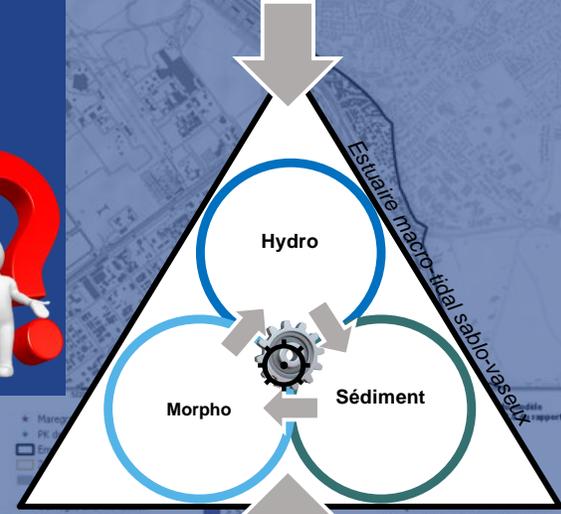


2100
+1m





Elévation du niveau marin
→ *bathymétrie différente...*
dynamiques des inondations
différentes ?



Les 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 :

Construits afin d'atteindre des niveaux de période de retour donnée 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

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 :

Construits afin d'atteindre des niveaux de période de retour donnée 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%

Les scénarios

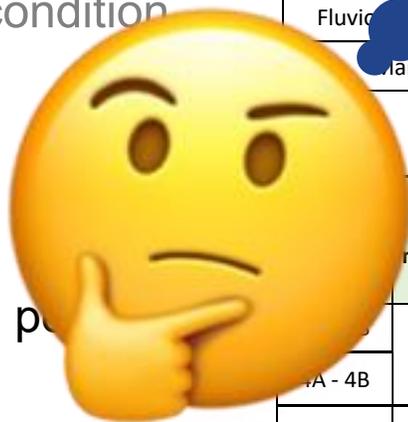
Réalistes

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

T 100 à Duclair
Q : 2200m³/s
avec une tempête...

			(m CMH)		
			T100	Cote des premiers débordements (m CMH)	Cote des enjeux significatifs touchés (m CMH)
			11.67	9.60	10.80
Fluvio-maritime amont		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



Scénarios théoriques :

Construits afin d'atteindre des niveaux de retour donnée 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 et marégraphe de référence	Evènement de base pour les chroniques de forçages	Niveau d'eau cible	Correctifs appliqués		
			Débits	Conditions météo-océaniques	
4A - 4B	Fluvial	T30	+3%	-	
	Elbeuf	T100	+21%	-	
5A - 5B	Fluvio-maritime amont Tempête Eleanor de janvier 2018 Débit de pointe = 1 540 m ³ /s	T30	+50%	+40%	
6A - 6B		Rouen	T100	+80%	+70%
7A - 7B		Fluvio-maritime aval	T30	+20%	+30%
8A - 8B		Heurteauville	T100	+40%	+70%
9A - 9B		Maritime	T30	-	+55%
10A - 10B		Tancarville	T100	-	+90%

Les 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 :

Construits afin d'atteindre des niveaux de retour donnée sur 4 marégraphes clés

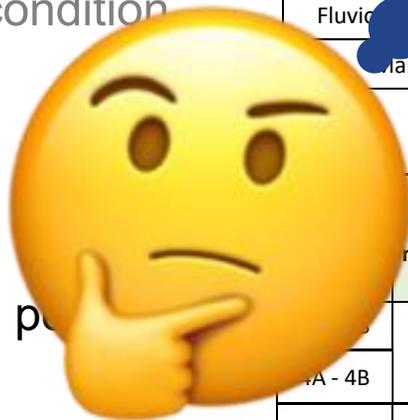
- Tancarville
- Heurteauville
- Rouen
- Elbeuf

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

T100 : Avec sans élévation du niveau marin +1m

T 100 à Duclair
Q : 2200m³/s
avec une tempête...

Possible même sans élévation du niveau marin

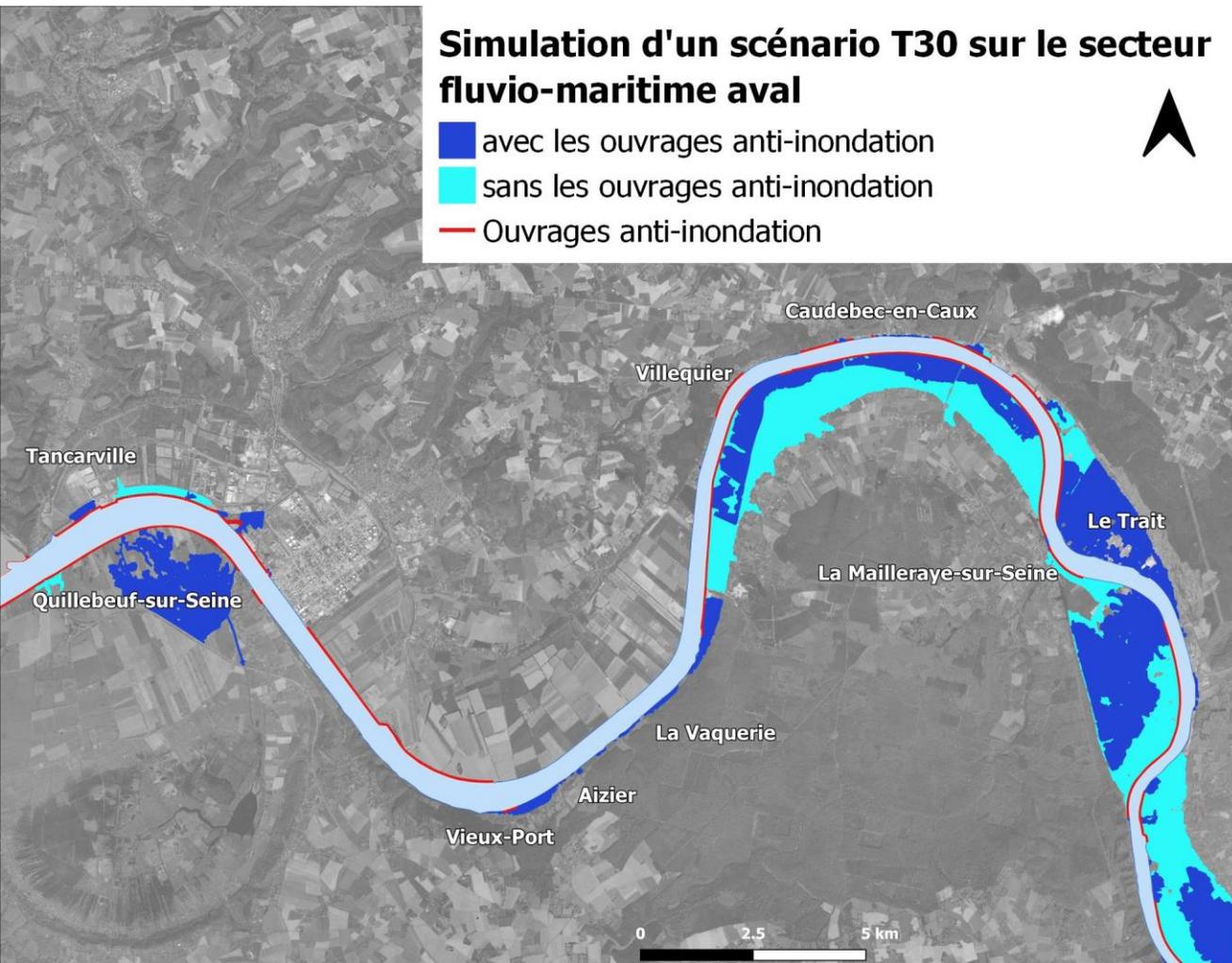


Secteur de l'estuaire et marégraphe de référence	Type d'évènement	Débit de pointe (m ³ /s)	Cote (m CMH)				
			T100	Cote des premiers débordements (m CMH)	Cote des enjeux significatifs touchés (m CMH)		
Fluvio-maritime amont		10.02	10.26	9.30	9.70		
Fluvio-maritime aval	Heurteauville	9.26					
Fluvio-maritime	Tancarville						
Secteur de l'estuaire et marégraphe de référence	Fluvial	Episode de février					
	Elbeuf	Débit de pointe = 2					
	5A - 5B	Fluvio-maritime amont		T30	+50%	+40%	
	6A - 6B			T100	+80%	+70%	
	7A - 7B	Fluvio-maritime amont	Tempête Eleanor janvier 2018		T30	+20%	+30%
	8A - 8B				T100	+40%	+70%
	9A - 9B		Débit de pointe = 1 540 m ³ /s		T30	-	+55%
	10A - 10B				T100	-	+90%

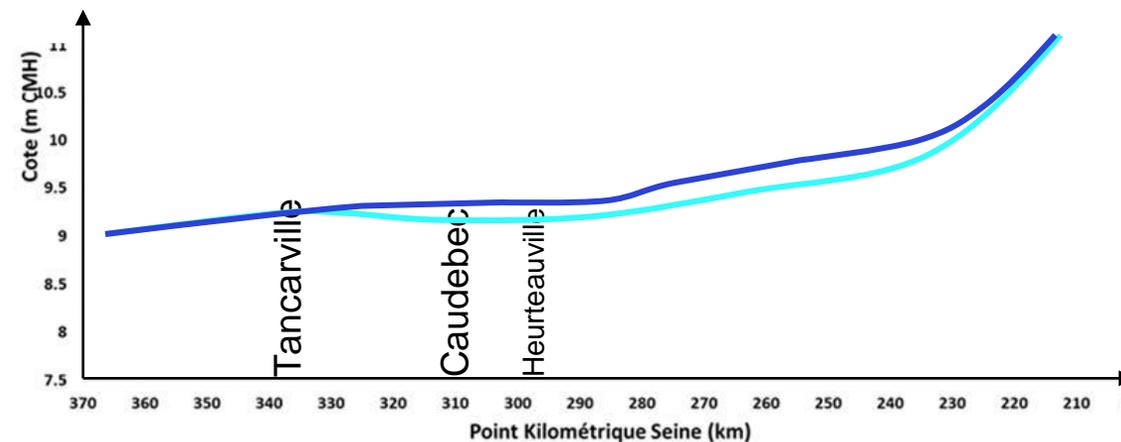
Rôle des murets

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



Rôle des murets

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

■ avec les ouvrages anti-inondation

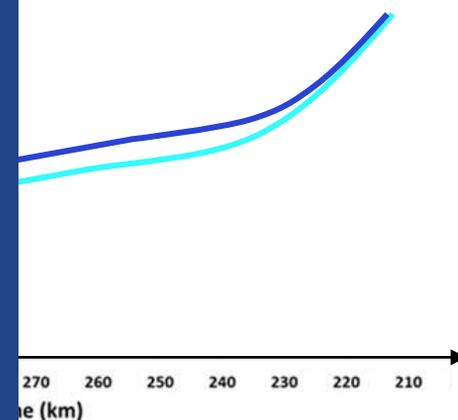
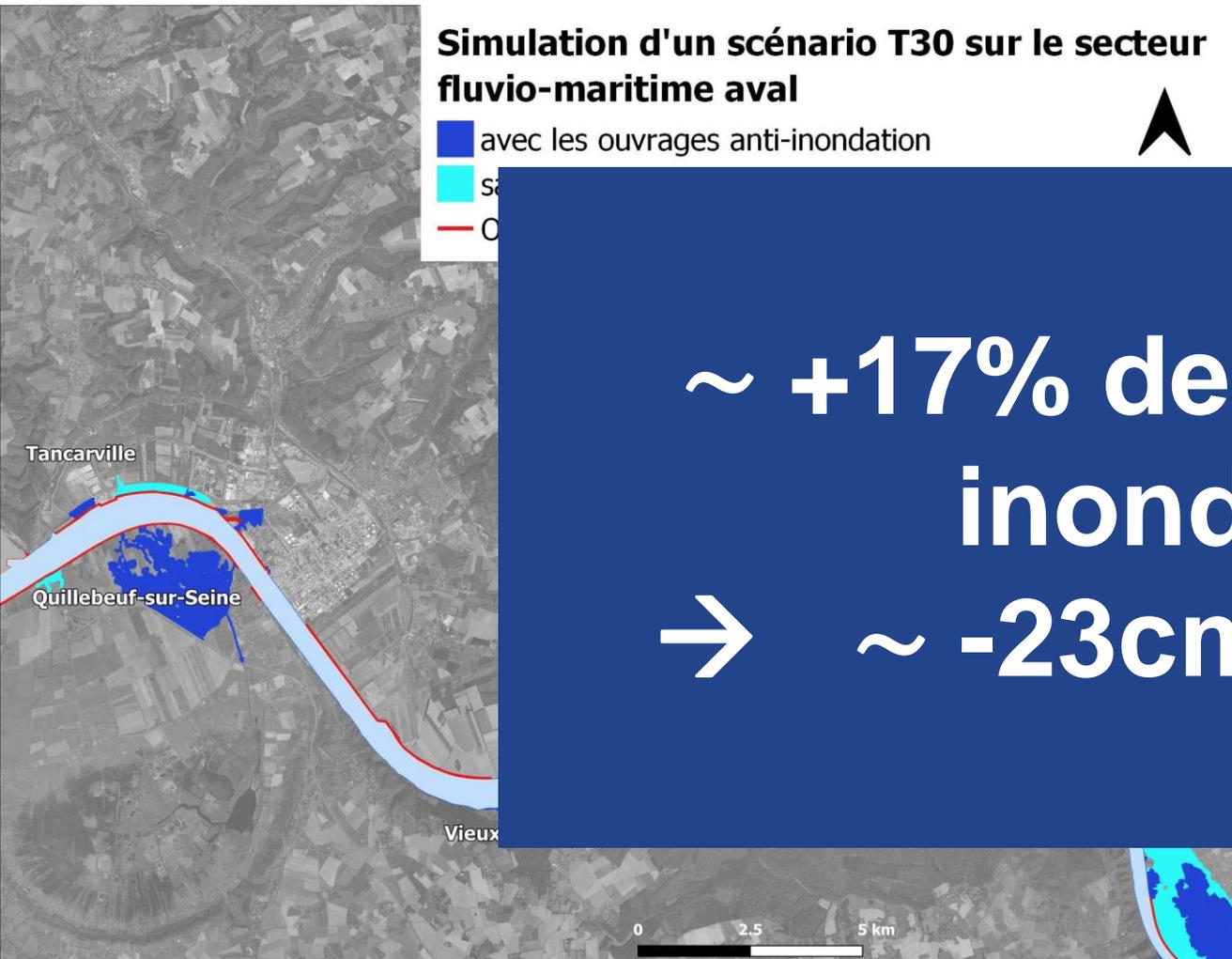
■ sans

— 0



T30 - Heurteauville

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



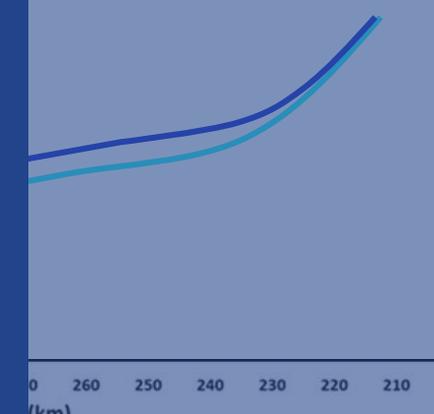
Rôle des murets



La création de zones d'expansion des eaux diminuerait l'aléa...
**quelles caractéristiques de ZEE
seraient optimales ?**



auville





GIP Seine-Aval
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC

En résumé...

l'estuaire est soumis au risque inondation / submersion ...
le changement climatique va augmenter ce risque



Le programme de recherche Seine-Aval investit cette problématique ...
avec 2 AAP en 2024!

1/

Caractérisation des inondations - pilotage en partenariat avec le SPC SACN
DILUVIO (INRAE, BRGM, SHOM, CEREMA)

- *relations forçages / niveau d'eau inter/intra évènements*
- *Caractérisation des variabilités temporelles*





GIP Seine-Aval
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC

En résumé...

l'estuaire est soumis au risque inondation / submersion ...
le changement climatique va augmenter ce risque



Le programme de recherche Seine-Aval investit cette problématique ...
avec 2 AAP en 2024!

- 1/ **Caractérisation des inondations** - pilotage en partenariat avec le SPC SACN
DILUVIO (INRAE, BRGM, SHOM, CEREMA)
 - *relations forçages / niveau d'eau inter/intra évènements*
 - *Caractérisation des variabilités temporelles*

- 2/ **Effets des évolutions bathy-topographiques**
ATLANTIS (CEREMA - coord. V. Laborie)
 - *lit majeur : zone d'expansion des eaux*
 - *lit mineur : évolution morphologiques*





GIP Seine-Aval
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC

En résumé...

l'estuaire est soumis au risque inondation / submersion ...
le changement climatique va augmenter ce risque



Le programme de recherche Seine-Aval investit cette problématique ...
avec 2 AAP en 2024!

- 1/ **Caractérisation des inondations** - pilotage en partenariat avec le SPC SACN
DILUVIO (INRAE, BRGM, SHOM, CEREMA)
 - *relations forçages / niveau d'eau inter/intra évènements*
 - *Caractérisation des variabilités temporelles*

- 2/ **Effets des évolutions bathy-topographiques**
ATLANTIS (CEREMA - coord. V. Laborie)
 - *lit majeur : zone d'expansion des eaux*
 - *lit mineur : évolution morphologiques*

- + **Acquisition de données sur les dynamiques des inondations**





GIP Seine-Aval
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC

Complémentarité

Observations / Analyses

&

Modèles numériques

Surfaces inondables sous une cote de
période de retour

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



calculé à partir du MNT 1m



Tableau 18- Synthèse des principales caractéristiques des scénarios modélisés et cotes maximales atteintes en quatre secteurs de l'estuaire

Définition du scénario ⁽¹⁾		Principales caractéristiques du scénario							Cote maximale atteinte (m CMH)			
		Prise en compte de l'élévation du niveau marin	Absence des murets anti-inondations	Valeurs maximales sur la période, sans notion de concomitance					Secteur maritime	Secteur fluvio-maritime aval	Secteur fluvio-maritime amont	Secteur fluvial
				Débit de la Seine (m ³ /s)	Vent moyen sur 3 heures (m/s)	Variation négative de pression ⁽²⁾ (hPa)	Coefficient de marée (-)	Surcote marine ⁽³⁾ (cm)				
Crue « type janvier 1910 »	Réaliste 1A			3 000 (T500)	9.1 ⁽⁴⁾ (<T1)	3.9 ⁽⁴⁾ (<T1)	78	20 ⁽⁴⁾ (<T1)	8.17 (<T1)	8.63 (<T1)	9.70 (T6)	12.26 (T470)
	Réaliste 1B	X							9.17 (T4)	9.33 (T25)	10.14 (T55)	12.43 (T700)
Tempête de décembre 1999	Réaliste 2A			1 760 (T2)	23.2 ⁽⁵⁾ (T90)	52.7 (T35)	104	73 (T2)	9.26 (T6)	9.36 (T30)	9.82 (T12)	10.36 (T4)
	Réaliste 2B	X							9.88 (T155)	9.68 (T170)	10.03 (T30)	10.65 (T8)
T30 sur le secteur fluvial	Théorique 3A			2 184 (T7)	9.4 (<T1)	10.4 (<T1)	109	37 (<T1)	8.72 (<T1)	9.05 (T6)	9.79 (T10)	11.17 (T30)
	Théorique 3B		X						8.73 (<T1)	8.92 (T3)	9.68 (T6)	11.14 (T25)
T100 sur le secteur fluvial	Théorique 4A			2 565 (T50)	9.4 (<T1)	10.4 (<T1)	109	37 (<T1)	8.75 (<T1)	9.10 (T7)	10.00 (T30)	11.66 (T100)
	Théorique 4B	X							9.64 (T45)	9.71 (T200)	10.36 (T170)	11.89 (T180)
T30 sur le secteur fluvio-maritime amont	Théorique 5A			2 310 (T13)	18.8 (T12)	27.4 (T2)	107	150 (T55)	9.43 (T15)	9.45 (T50)	10.01 (T30)	11.00 (T19)
	Théorique 5B		X						9.40 (T13)	9.28 (T20)	9.80 (T10)	10.97 (T17)
T100 sur le secteur fluvio-maritime amont	Théorique 6A			2 772 (T150)	22.8 (T75)	33.3 (T3)	107	182 (T130)	9.70 (T60)	9.63 (T130)	10.24 (T100)	11.69 (T110)
	Théorique 6B	X							10.35 (>T1000)	10.63 (>T1000)	11.08 (>T1000)	11.88 (T180)
T30 sur le secteur fluvio-maritime aval	Théorique 7A			1 848 (T3)	17.5 (T7)	25.4 (T1)	107	139 (T40)	9.28 (T7)	9.35 (T30)	9.87 (T15)	10.52 (T5)
	Théorique 7B		X						9.25 (T6)	9.17 (T11)	9.65 (T5)	10.44 (T4)
T100 sur le secteur fluvio-maritime aval	Théorique 8A			2 156 (T6)	22.8 (T75)	33.3 (T3)	107	182 (T130)	9.69 (T60)	9.58 (T100)	10.04 (T35)	10.90 (T14)
	Théorique 8B	X							10.32 (>T1000)	10.53 (>T1000)	10.94 (>T1000)	11.45 (T60)
T30 sur le secteur maritime	Théorique 9A			1 540 (T2)	20.8 (T30)	30.3 (T2)	107	166 (T85)	9.57 (T30)	9.48 (T60)	9.89 (T16)	10.34 (T3)
	Théorique 9B		X						9.52 (T25)	9.30 (T20)	9.72 (T7)	10.22 (T2)
T100 sur le secteur maritime	Théorique 10A			1 540 (T2)	25.5 (T280)	37.2 (T5)	107	204 (T210)	9.79 (T100)	9.67 (T160)	9.99 (T25)	10.40 (T4)
	Théorique 10B	X							10.52 (>T1000)	10.64 (>T1000)	10.98 (>T1000)	11.22 (T30)

⁽¹⁾ : événements de base pour les chroniques de forçages : épisode fluvio-maritime de février 2018 pour les scénarios 3 et 4, tempête Eleanor de janvier 2018 pour les scénarios 5 à 10 (cf. chapitre 1.2)

⁽²⁾ : variation négative de la pression atmosphérique (dépression) à l'embouchure par rapport à la valeur moyenne de 1 013 hPa (cf. chapitre 1.3)

⁽³⁾ : surcote imposée sur la frontière maritime du modèle au droit de Saint-Valéry-en-Caux, et caractérisée en période de retour par rapport à l'analyse statistique disponible au Havre (cf. chapitre 1.3)

⁽⁴⁾ : conditions météo-océaniques relatives à la crue de juin 2016

⁽⁵⁾ : majoration de 50% de l'intensité du vent issu du modèle ERA5