

# Estimation des valeurs extrêmes de niveaux d'eau à la côte

Littoral métropolitain - Produit Cerema / Shom 2022

X. Kergadallan (Cerema)

G. André (Shom)

Data Science pour les risques côtiers

13-15 nov. 2023 Station Biologique de Roscoff



# Contexte et objectifs

# SOMMAIRE

- Contexte et objectifs
- Méthodologie d'analyse
- Incertitudes et limites
- Résultats

- Dépendance marée surcote
- Test de sensibilité sur la durée d'observation
- Estimation des variations pluriannuelles
- Conseils d'utilisation et perspectives

# Contexte et objectifs

Ministère de l'écologie : besoin de niveaux de référence (T10ans, T100ans et T1000ans)

## Des partenariats

- Partenariat Shom / Cerema
- GT TSH / Statistiques des Extrêmes (IRSN, EDF, Shom, BRGM, Artelia, INRS, Cerema)

## Mise à jour des documents de référence

- Shom-Cetmef (2010 et 2012), *Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique)*, édition Shom
- Cetmef (2013), *Analyse des surcotes extrêmes le long des côtes métropolitaines*, édition Cetmef
- Cerema (2018), *Les niveaux marins extrêmes – Ports de métropole*, édition Cerema

## Révision de la méthodologie de l'étude Shom-Cetmef de 2012

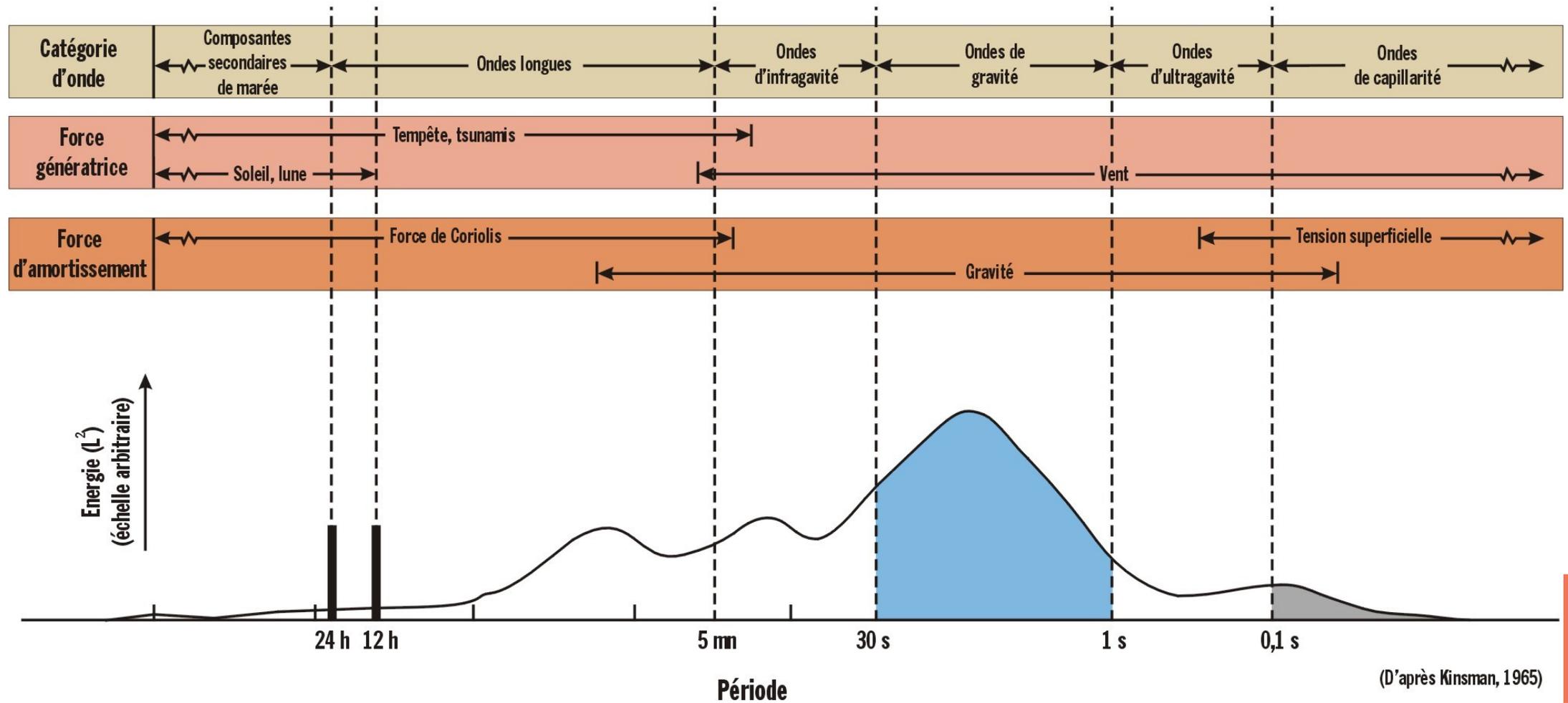
- Plus de données et extension à la Méditerranée
- Revoir la méthode d'interpolation
- Des estimations jusqu'à la période de retour 1000 ans avec le calcul des intervalles de confiance

# Méthodologie d'analyse

# Méthodologie d'analyse

## Rappel sur le niveau marin

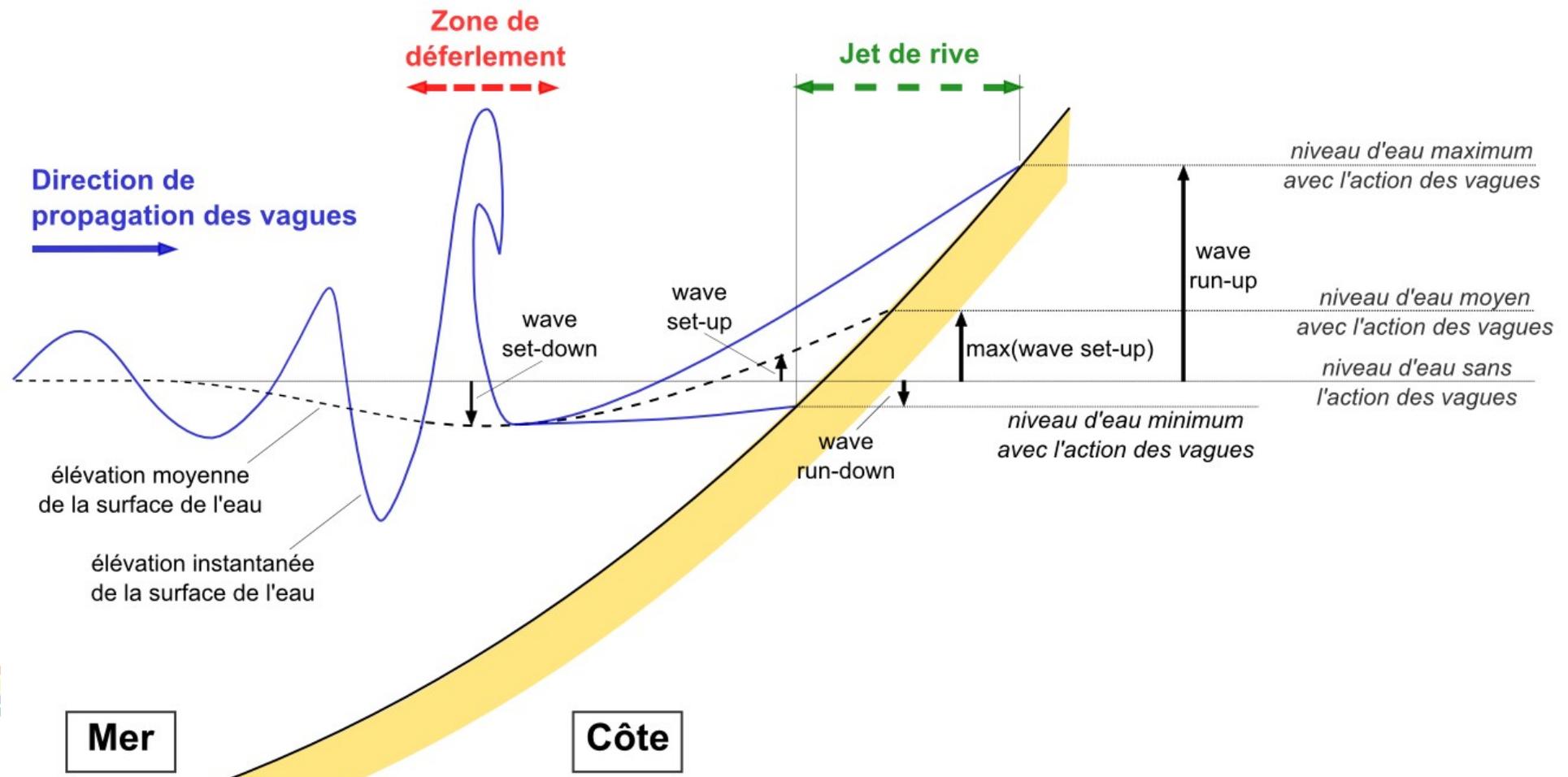
- Distribution de l'énergie des ondes à la surface des océans



# Méthodologie d'analyse

## Rappel sur le niveau marin

- Niveau au repos, niveau statique, niveau dynamique



# Méthodologie d'analyse

## Données utilisées

Observation marégraphiques

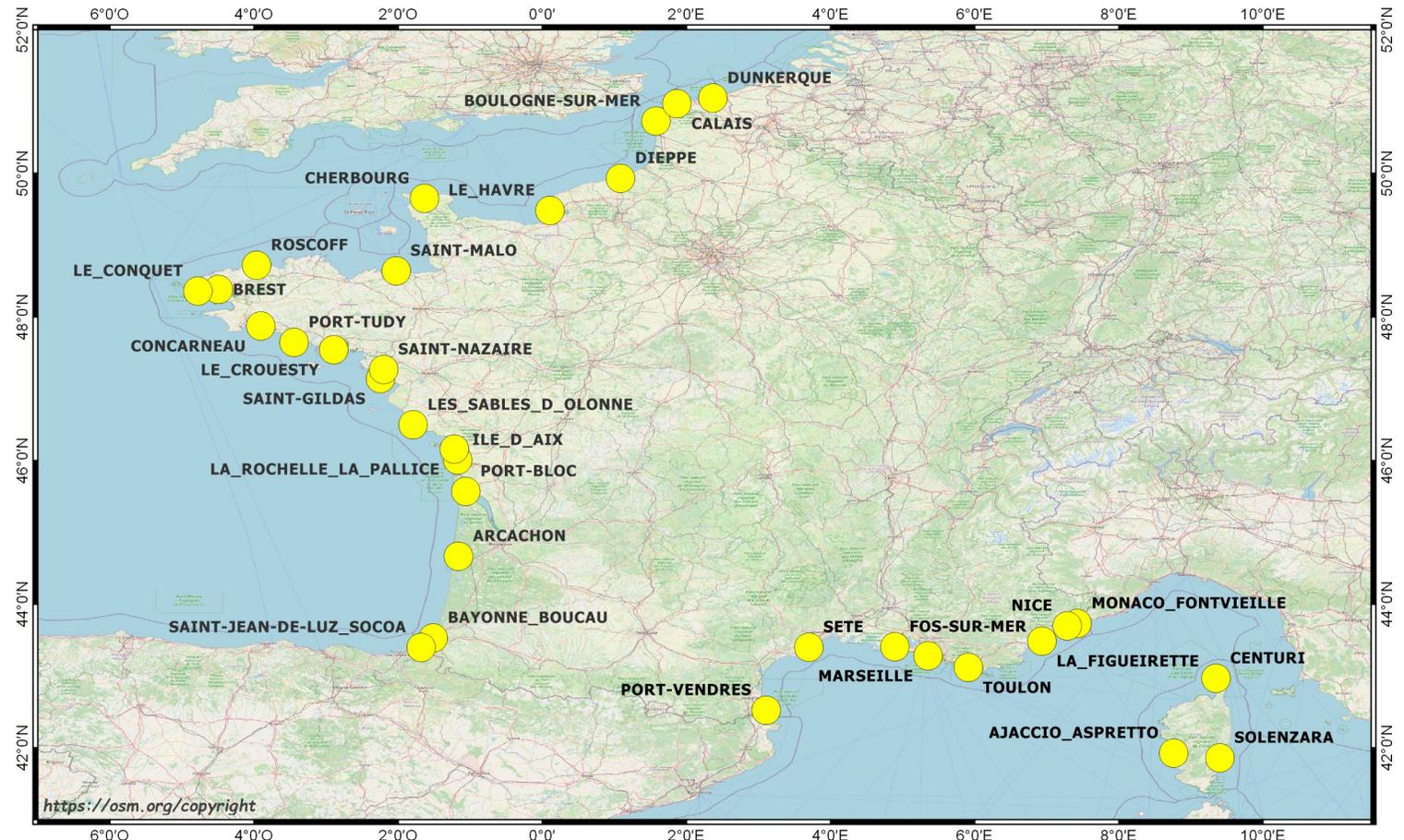
- 33 ports de référence
- Données horaires validées (data.shom.fr)

Prédiction de marée (logiciel MAS du Shom)

Ref ZH/IGN :

- RAM 2020 (Shom)
- BathyElli V2/0 (Shom)

Simulation de surcote HOMINIM (Shom et Météo-France)



# Méthodologie d'analyse

## Méditerranée

- Aux ports de référence : faible marnage => approche directe

Ajustement statistique des valeurs extrêmes

Sélection des pics de tempête (POT avec critère de séparation  $\pm 24h$ )

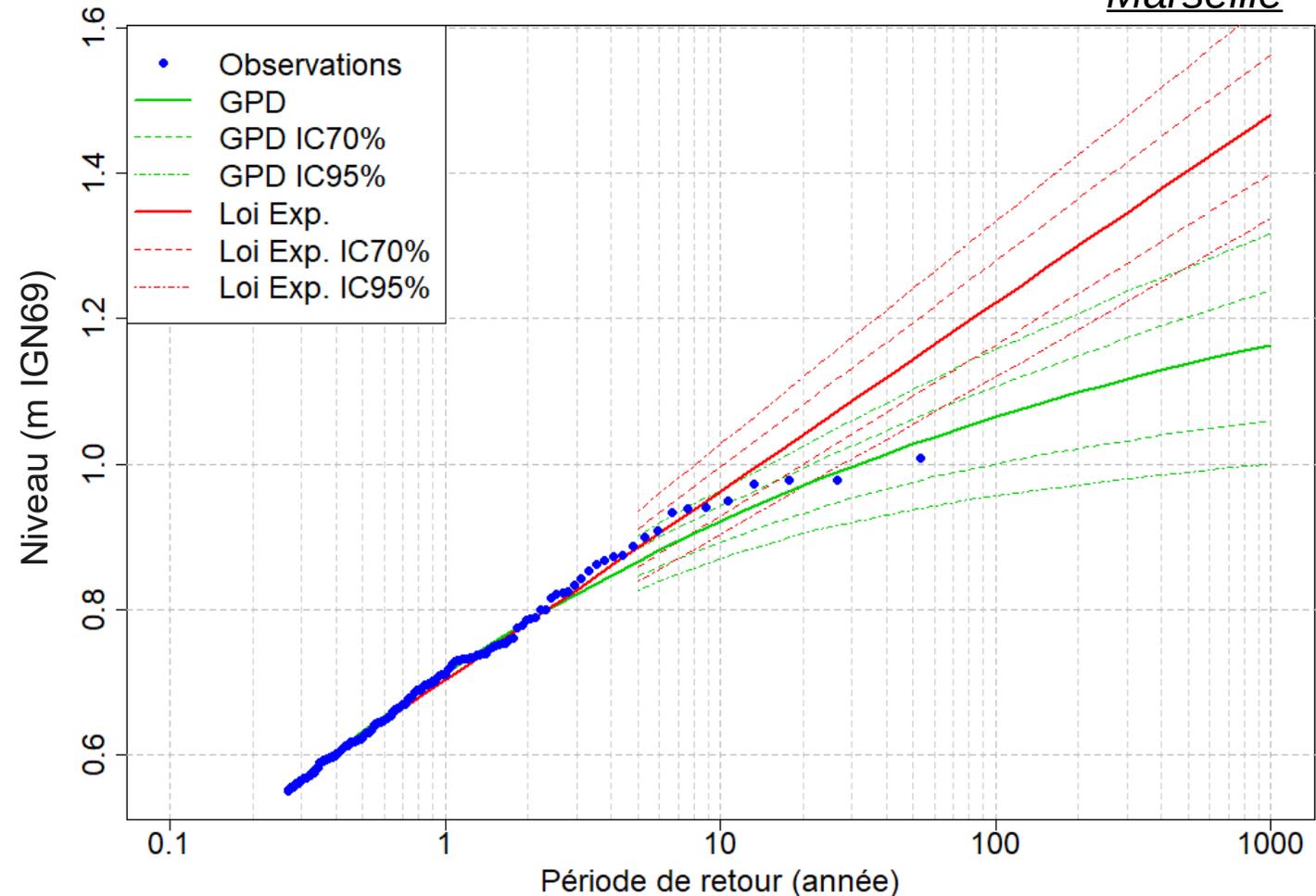
2 lois d'ajustement :

- GPD  $Pr\{Z > z | z > s_0\} = \left(1 + \xi \frac{z - s_0}{\sigma}\right)^{-1/\xi}$

- Exponentielle

$$Pr\{Z > z | z > s_0\} = \exp[-\rho(z - z_0)]$$

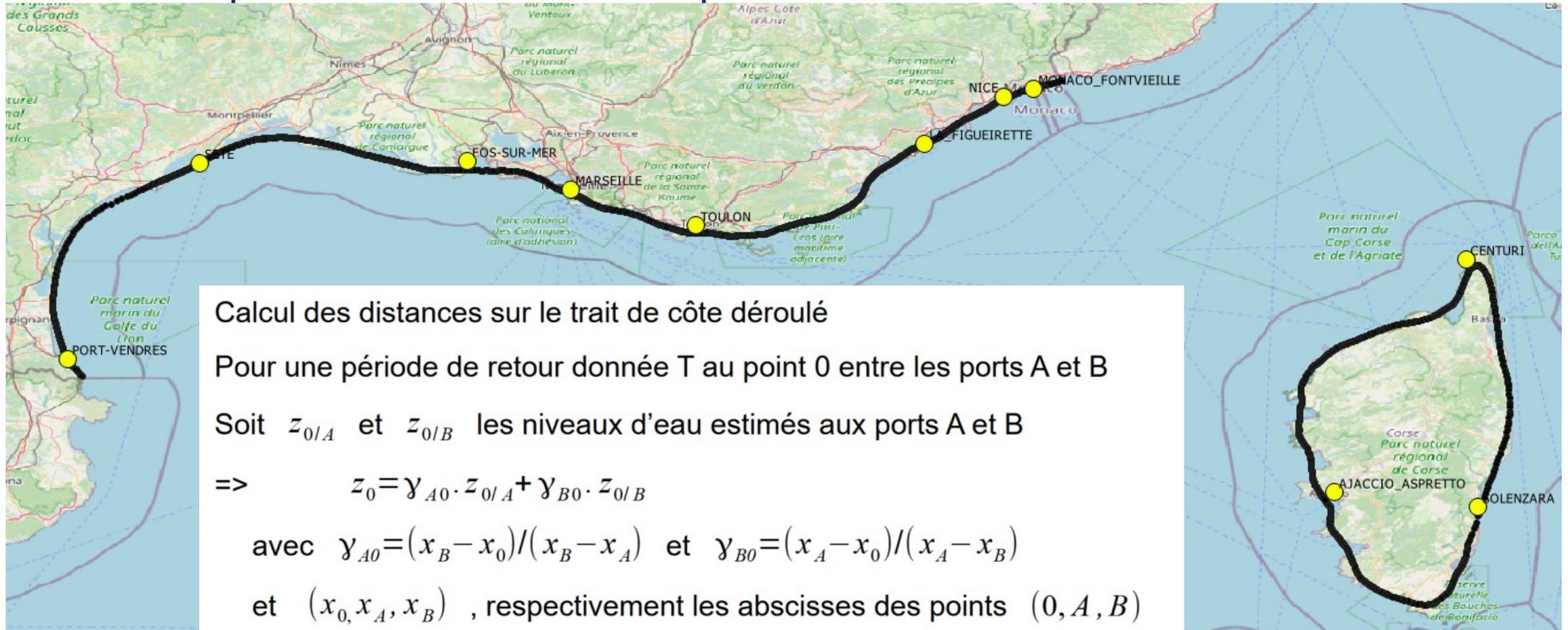
*Marseille*



# Méthodologie d'analyse

## Méditerranée

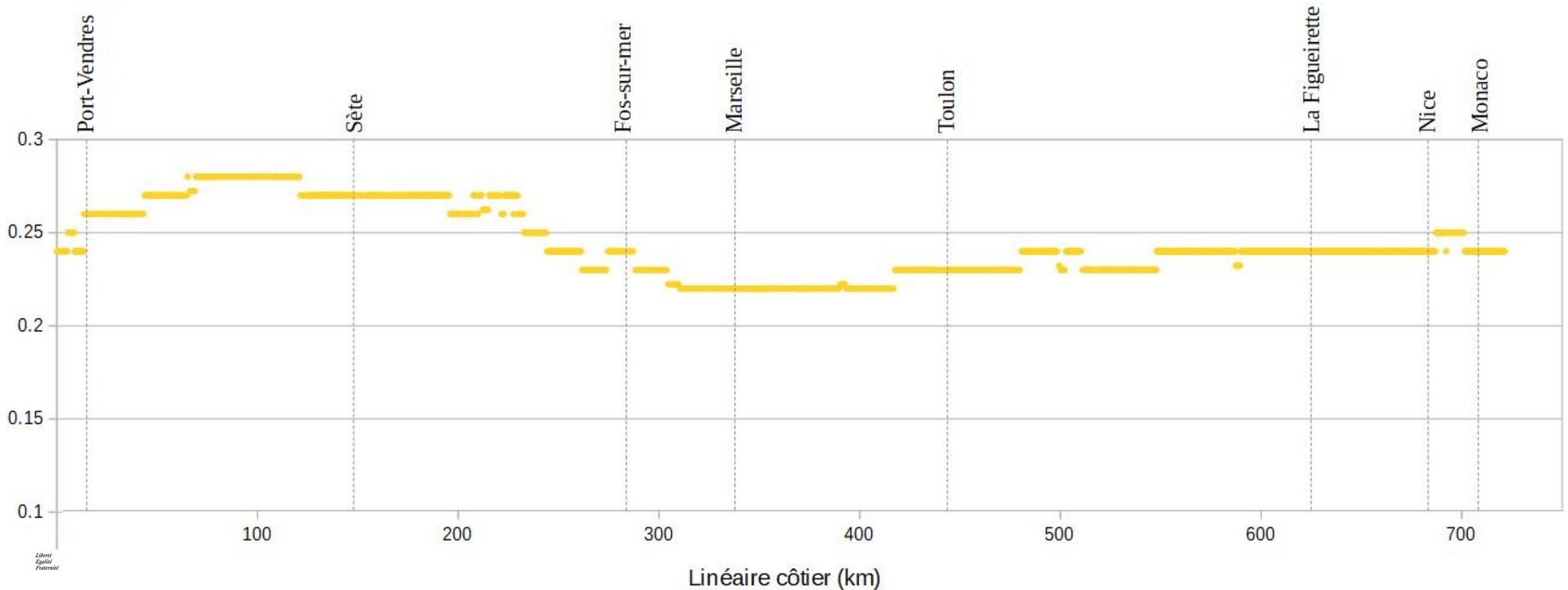
- Entre les ports de référence : Interpolation linéaire sur le trait de côte lissée



# Méthodologie d'analyse

## Méditerranée : validité de l'interpolation entre les ports ?

- Variation des surcotes entre les ports (Centile99 % HOMONIM Shom Météo-France)



# Méthodologie d'analyse

## Manche et Atlantique

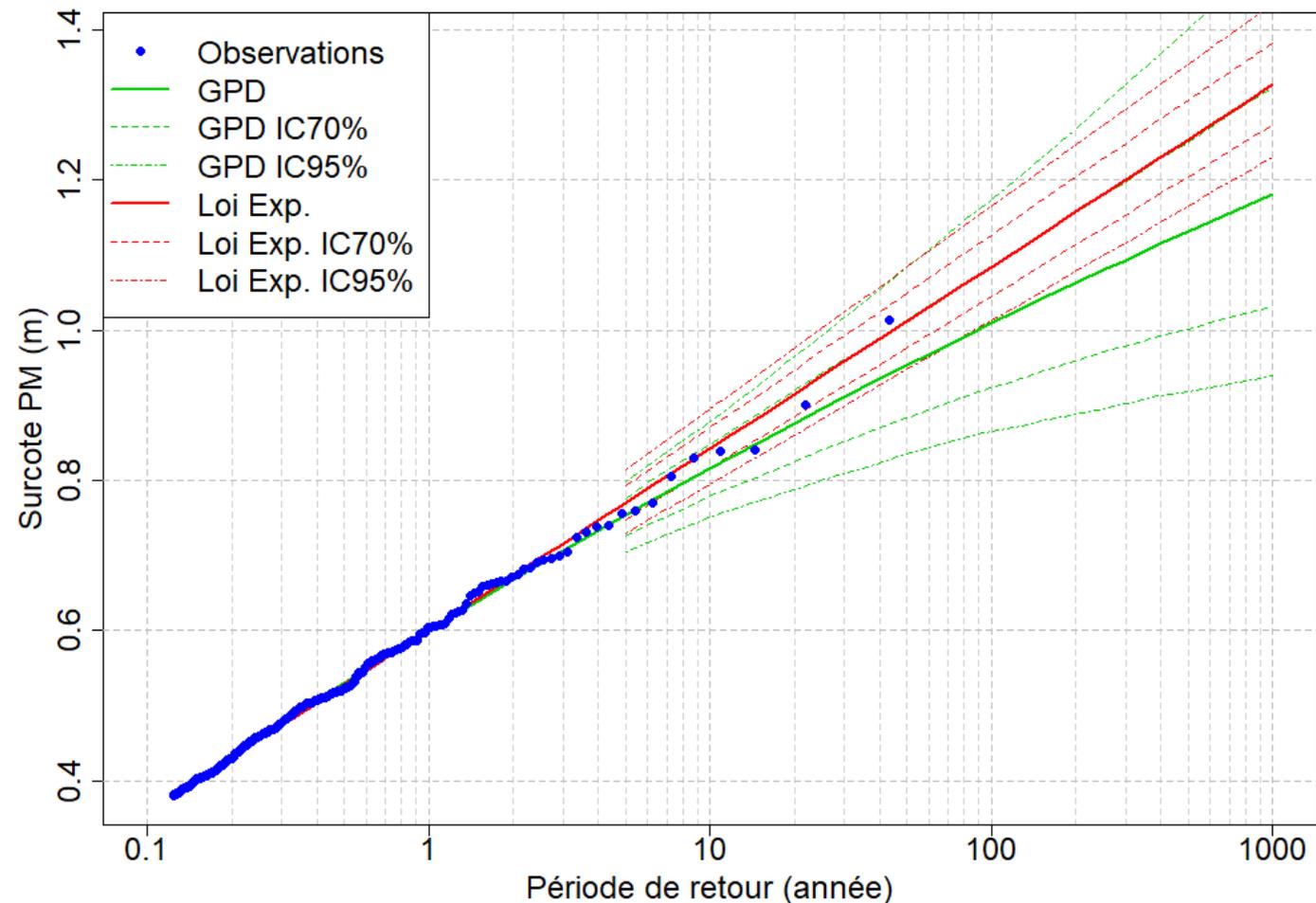
- Aux ports de référence : fort marnage => convolution marée surcote PM

### Distribution des surcote PM

Distribution paramétrique au-dessus du seuil de tempête : Sélection par POT et ajustement par GPD ou Exponentielle

Distribution empirique sous le seuil de tempête

*Calais*



# Méthodologie d'analyse

## Manche et Atlantique

- Aux ports de référence : fort marnage => convolution marée surcote

*Calais*

### Distribution des surcote PM

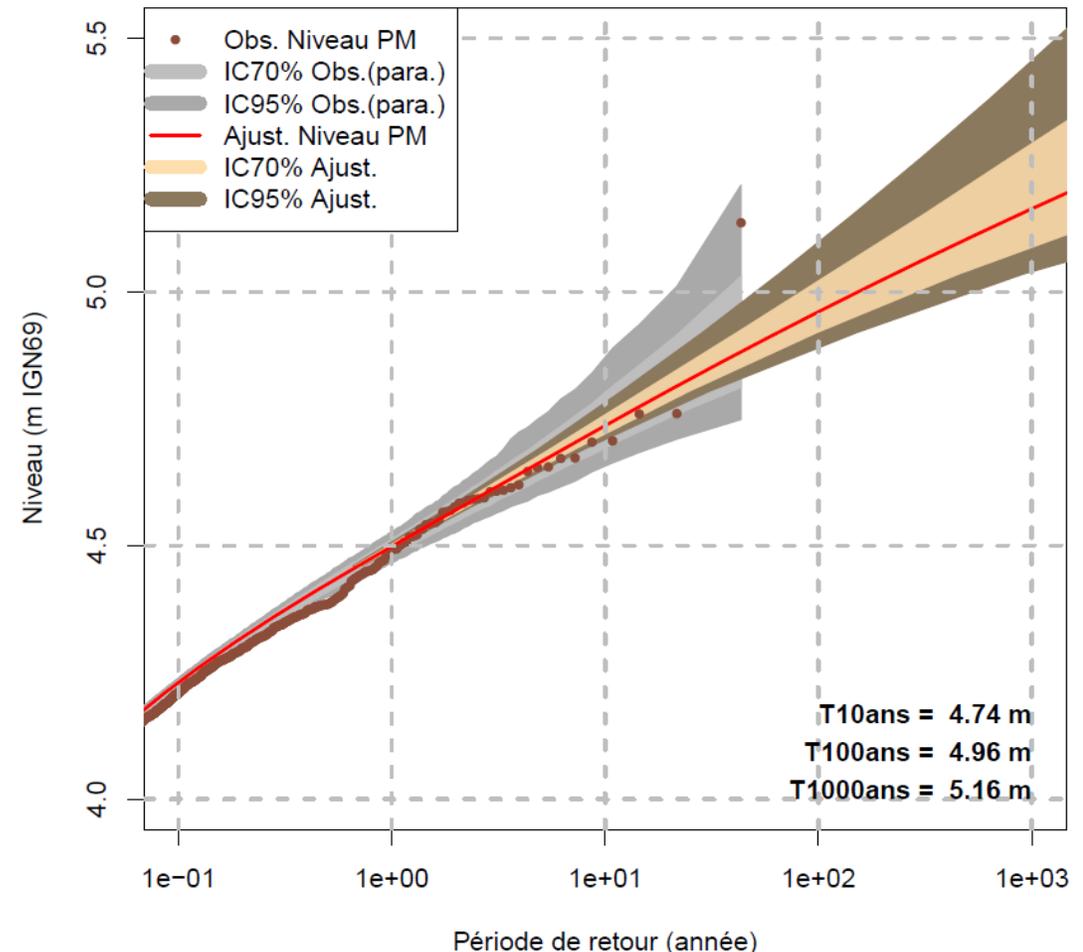
Distribution paramétrique au-dessus du seuil de tempête : Sélection par POT et ajustement par GPD ou Exponentielle

Distribution empirique sous le seuil de tempête

### Convolution marée surcote PM

$$Pr\{Z_{PM} > z\} = \int_{PBMA}^{PHMA} p(m) \cdot (1 - F_s(z - m)) \cdot dm$$

- « p(m) » la densité de probabilité d'avoir une marée PM égale à « m » (Saros)
- « Fs(s) » la fonction de répartition des surcotes PM →





# Méthodologie d'analyse

## Manche et Atlantique

- Entre les ports de référence : Interpolation linéaire sur le trait de côte lissée

Pour une période de retour donnée T au point 0 entre les ports A et B

Soit  $z_{0/A}$  et  $z_{0/B}$  les niveaux d'eau estimés aux ports A et B

$$\Rightarrow z_0 = \gamma_{A0} \cdot z_{0/A} + \gamma_{B0} \cdot z_{0/B} \quad (\text{idem Méditerranée})$$

Avec  $z_{0/A}$  (et  $z_{0/B}$ ) calculé par convolution marée surcote :

$$Pr\{Z_{0/A}^{PM} > z\} = \int_{PBMA}^{PHMA} p(m) \cdot \left[ 1 - F_s\left(\frac{z-m}{\theta_{0/A}}\right) \right] \cdot dm$$

avec la  $p(m)$  la distribution de marée PM au point de calcul

$F_s(s)$  la fonction de répartition de surcote PM au port A

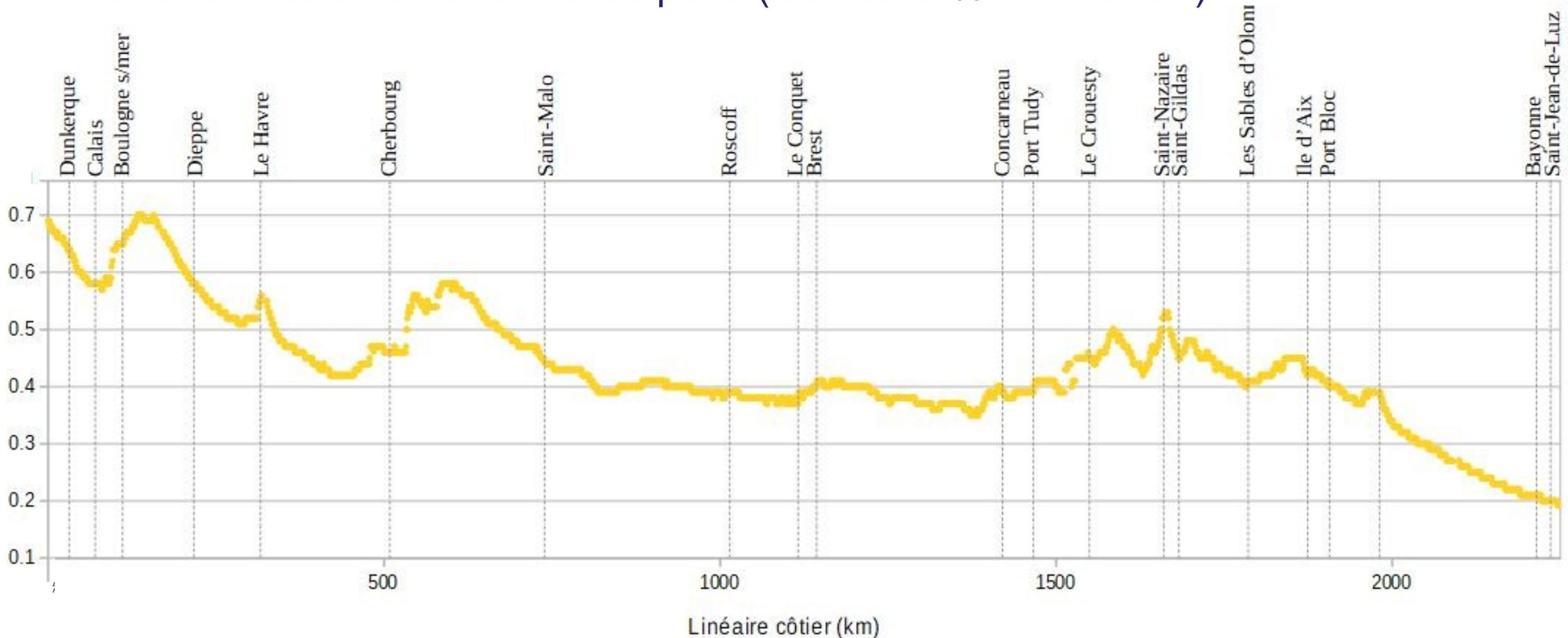
et  $\theta_{0/A}$  le rapport des centiles 99 % entre les points 0 et A  
des surcotes horaires HOMONIM (Shom et Météo-France)



# Méthodologie d'analyse

## Manche et Atlantique : entre les ports de référence

- Variation des surcotes entre les ports (Centile99 % HOMONIM)



# Incertitudes et limites

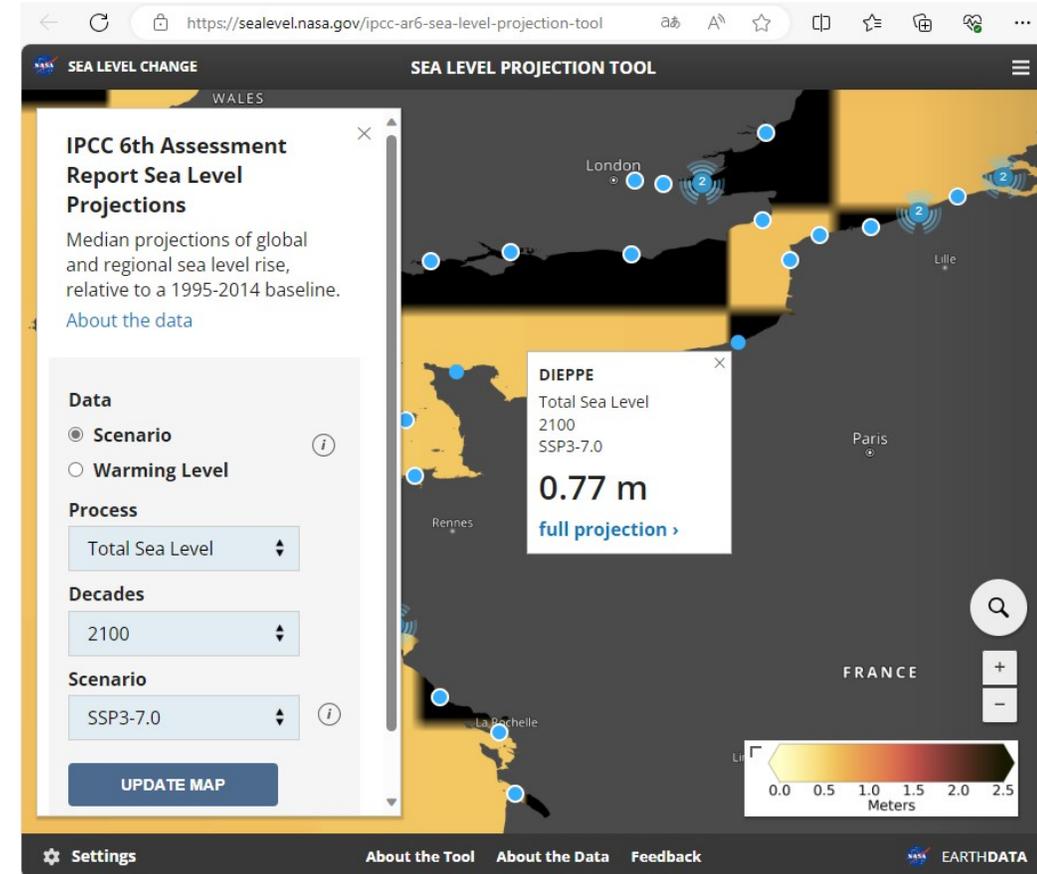
# Incertitudes et limites

## Incertitudes (2 sigma)

- Prédiction de marée :  $\pm 15$  cm aux ports de référence et  $\pm 25$  cm entre les ports
- HOMONIM :  $\pm 8$  cm aux ports

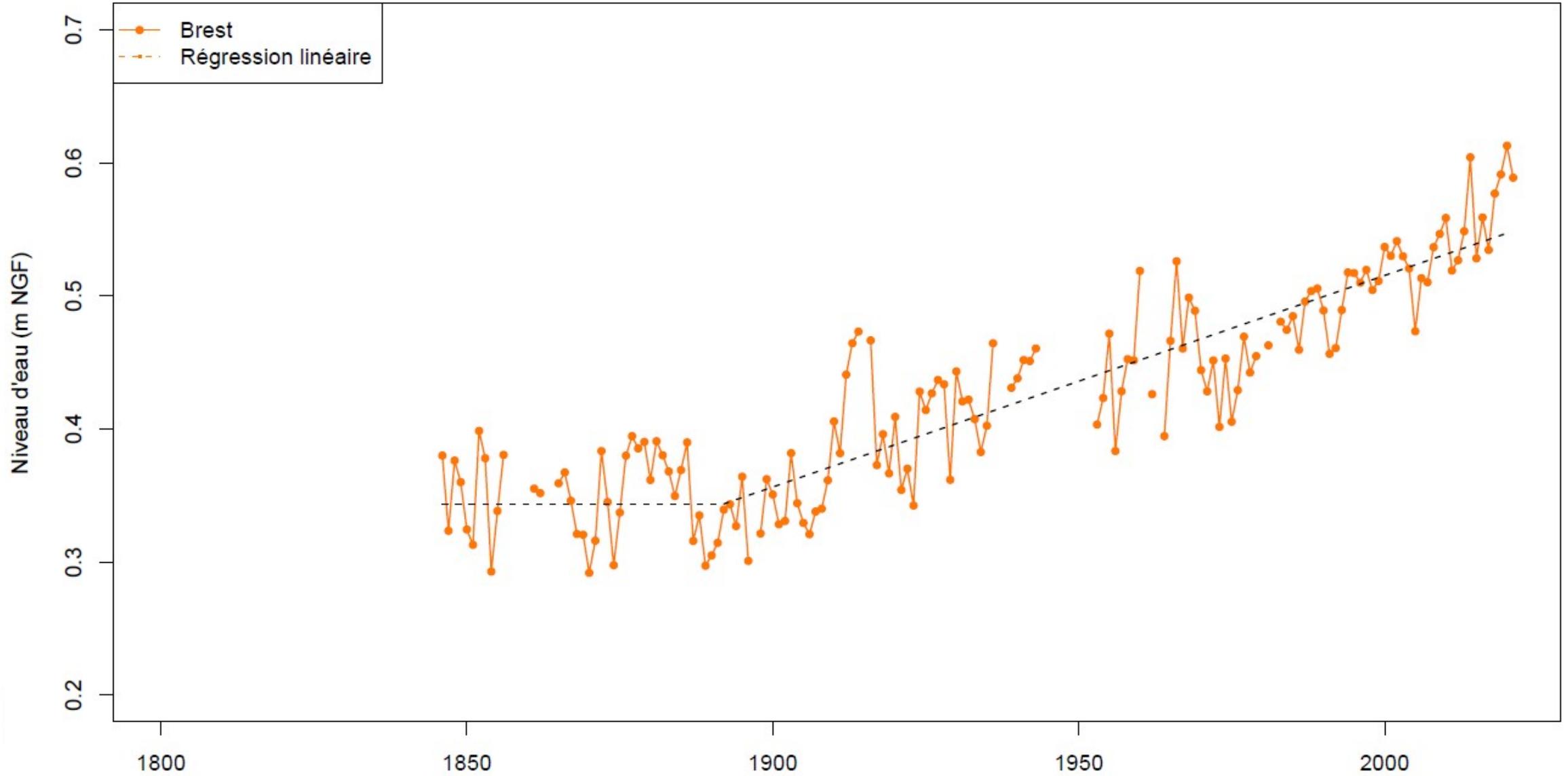
## Niveau moyen

- Aux ports de référence, estimation 2022 par régression linéaire sur les moyennes annuelles



<https://sealevel.nasa.gov/>

# Incertitudes et limites



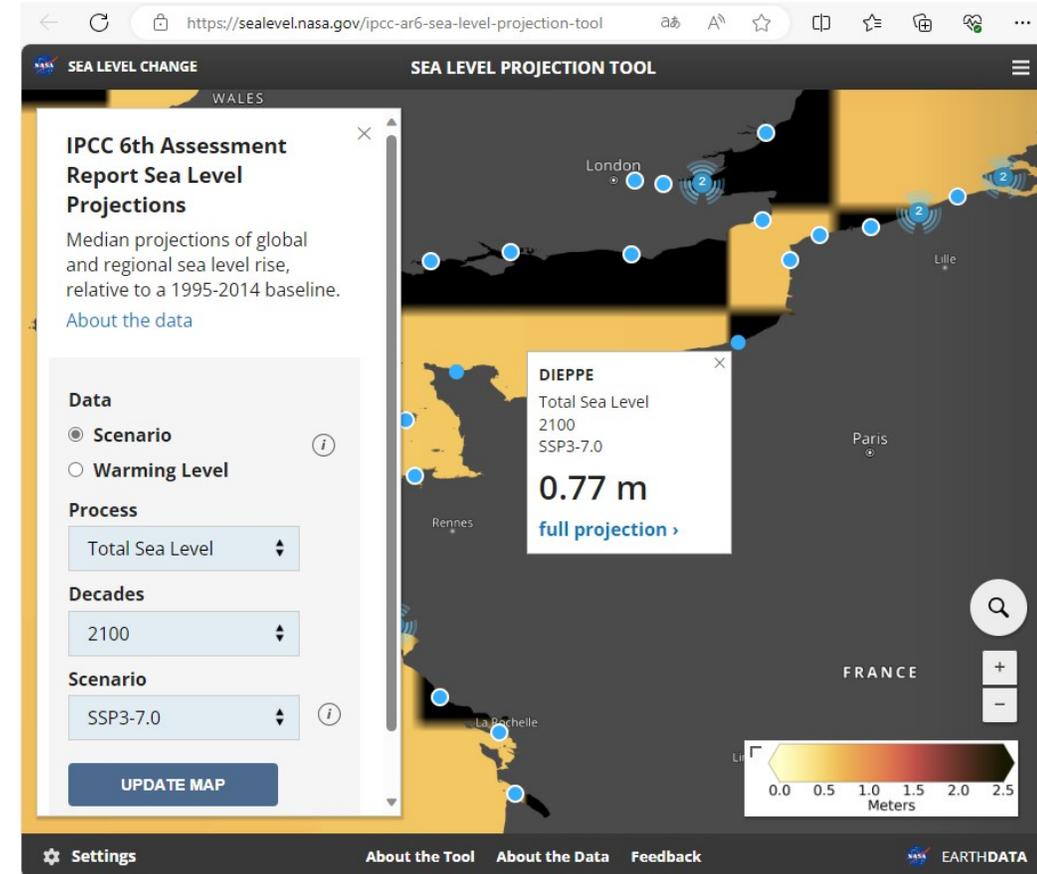
# Incertitudes et limites

## Incertitudes (2 sigma)

- Prédiction de marée :  $\pm 15$  cm aux ports de référence et  $\pm 25$  cm entre les ports
- HOMONIM :  $\pm 8$  cm aux ports

## Niveau moyen

- Aux ports de référence, estimation 2022 par régression linéaire sur les moyennes annuelles
  - Entre les ports, niveau moyen au 01/01/2000 (modèle Shom cstFRANCE et référencement à l'IGN69 via BathyElli v2.0)
- => ajout d'une composante liée au changement climatique



# Incertitudes et limites

## Stationnarité

- Stationnarité des tempêtes et de la dépendance surcote marée PM ?

## Modèle d'analyse statistique

- Échantillonnage, lois paramétriques ?
- Méthodes régionales, informations historiques ?

## Interpolation surcotes/Niveau

- Voisinage du Havre, Bayonne, Marseille ?
- Port-Vendre à Sète, Nice à Monaco, Cap de Pertusato

## Wave set-up et des seiches

- Wave set-up portuaire : local ou régional ?
- Influence des seiches ?



# Incertitudes et limites

		Période de retour	
		100 ans	Int. conf. 70 %
CALAIS	Niveau interpolé (m IGN69)	4.99	4.92 à 5.12
	Niveau port (m IGN 69)	4.96	4.92 à 5.02
	Différence (m)	0.03	
BOULOGNE-SUR-MER	Niveau interpolé (m IGN69)	5.90	5.84 à 6.01
	Niveau port (m IGN 69)	5.82	5.75 à 6.02
	Différence (m)	0.07	
DIEPPE	Niveau interpolé (m IGN69)	6.38	6.26 à 6.61
	Niveau port (m IGN 69)	6.26	6.17 à 6.48
	Différence (m)	0.12	
LE HAVRE	Niveau interpolé (m IGN69)	4.69	4.63 à 4.81
	Niveau port (m IGN 69)	4.96	4.84 à 5.14
	Différence (m)	-0.28	
CHERBOURG	Niveau interpolé (m IGN69)	4.39	4.32 à 4.48
	Niveau port (m IGN 69)	4.19	4.17 à 4.23
	Différence (m)	0.19	
SAINT-MALO	Niveau interpolé (m IGN69)	7.58	7.55 à 7.62
	Niveau port (m IGN 69)	7.62	7.60 à 7.66
	Différence (m)	-0.04	
ROSCOFF	Niveau interpolé (m IGN69)	5.41	5.39 à 5.45
	Niveau port (m IGN 69)	5.38	5.37 à 5.40
	Différence (m)	0.03	
LE CONQUET	Niveau interpolé (m IGN69)	4.62	4.61 à 4.64
	Niveau port (m IGN 69)	4.61	4.59 à 4.65
	Différence (m)	0.01	
BREST	Niveau interpolé (m IGN69)	4.74	4.71 à 4.79
	Niveau port (m IGN 69)	4.76	4.74 à 4.78
	Différence (m)	-0.03	
CONCARNEAU	Niveau interpolé (m IGN69)	3.63	3.60 à 3.66
	Niveau port (m IGN 69)	3.61	3.57 à 3.73
	Différence (m)	0.02	

## Test de sensibilité :

Si nous n'avons qu'un port sur deux ?

		Période de retour	
		100 ans	Int. conf. 70 %
PORT-TUDY	Niveau interpolé (m IGN69)	3.52	3.48 à 3.62
	Niveau port (m IGN 69)	3.55	3.53 à 3.59
	Différence (m)	-0.04	
LE CROUESTY	Niveau interpolé (m IGN69)	3.87	3.84 à 3.92
	Niveau port (m IGN 69)	3.77	3.72 à 3.85
	Différence (m)	0.11	
SAINT-NAZAIRE	Niveau interpolé (m IGN69)	4.04	3.99 à 4.10
	Niveau port (m IGN 69)	4.14	4.09 à 4.21
	Différence (m)	-0.10	
SAINT-GILDAS	Niveau interpolé (m IGN69)	3.85	3.81 à 3.91
	Niveau port (m IGN 69)	3.78	3.75 à 3.84
	Différence (m)	0.07	
LES SABLES D'OLONNE	Niveau interpolé (m IGN69)	3.67	3.62 à 3.74
	Niveau port (m IGN 69)	3.62	3.60 à 3.67
	Différence (m)	0.05	
LA ROCHELLE LAPALLICE	Niveau interpolé (m IGN69)	3.80	3.75 à 3.89
	Niveau port (m IGN 69)	3.92	3.86 à 4.01
	Différence (m)	-0.12	
ILE D'AIX	Niveau interpolé (m IGN69)	3.99	3.93 à 4.08
	Niveau port (m IGN 69)	3.84	3.79 à 3.94
	Différence (m)	0.15	
PORT-BLOC	Niveau interpolé (m IGN69)	3.61	3.56 à 3.69
	Niveau port (m IGN 69)	3.69	3.63 à 3.78
	Différence (m)	-0.08	
BAYONNE BOUCAU	Niveau interpolé (m IGN69)	3.03	3.02 à 3.04
	Niveau port (m IGN 69)	3.20	3.17 à 3.24
	Différence (m)	-0.18	

Différence (m)	< 0.05
	< 0.1
	> 0.1

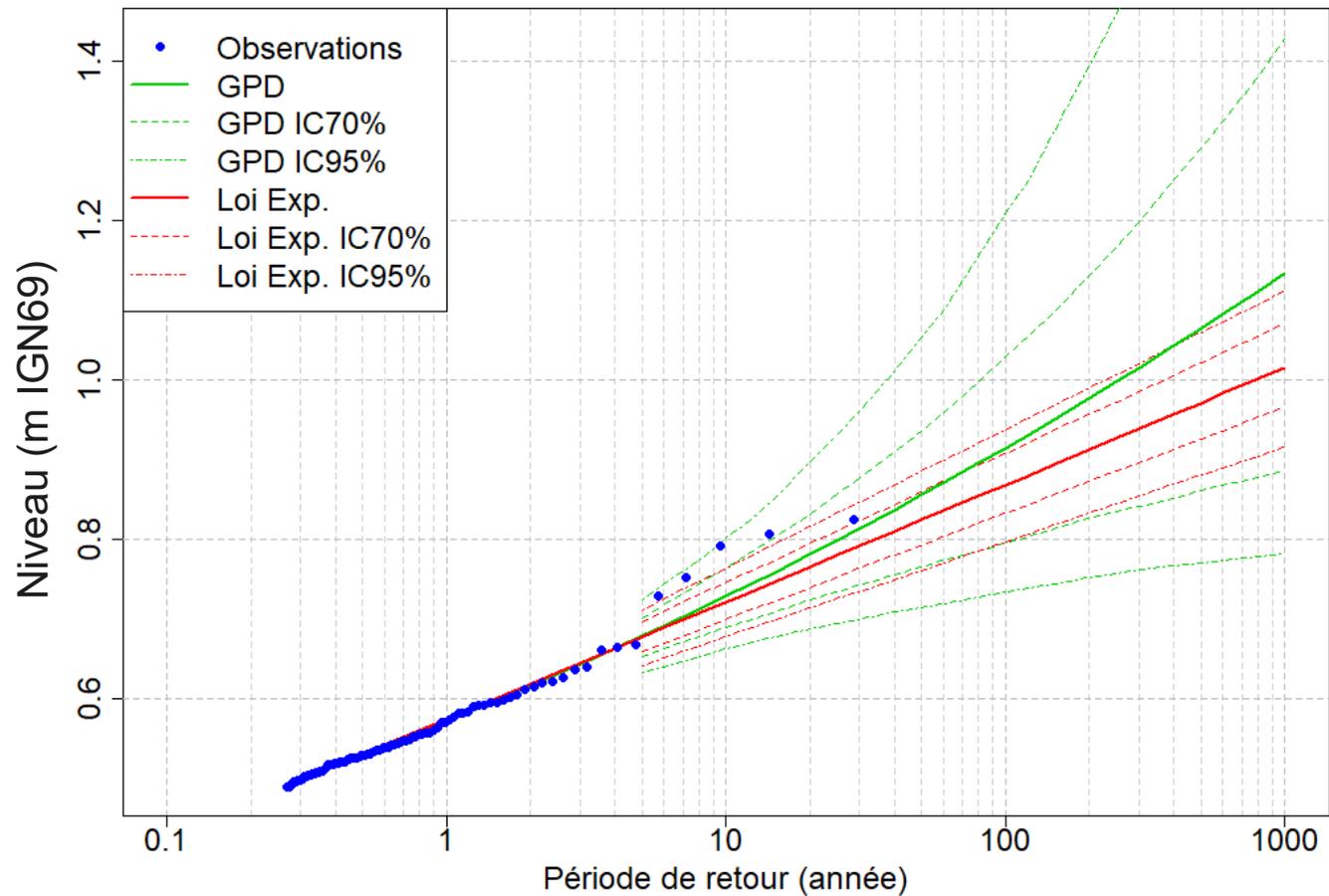
# Résultats

# Résultats

## Aux ports de référence

- Méditerranée : ajustement des niveaux d'eau

Port de Port-Vendres

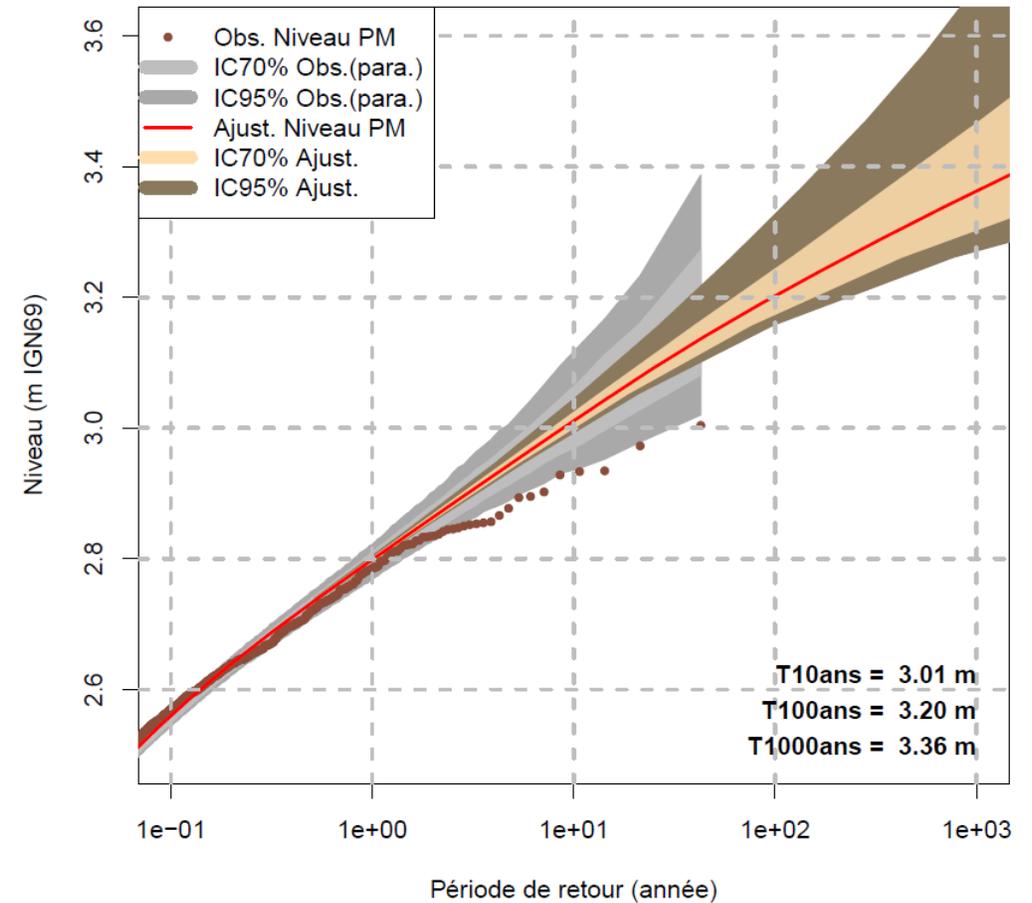
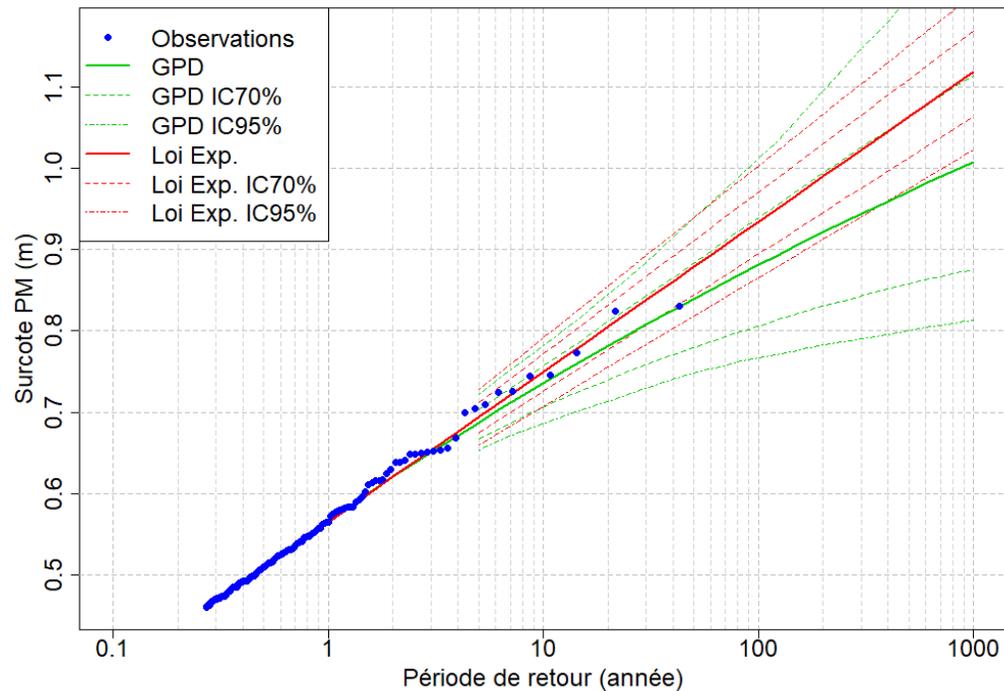


# Résultats

## Aux ports de référence

- Manche et atlantique : ajustement des surcotes et calcul des niveaux par convolution

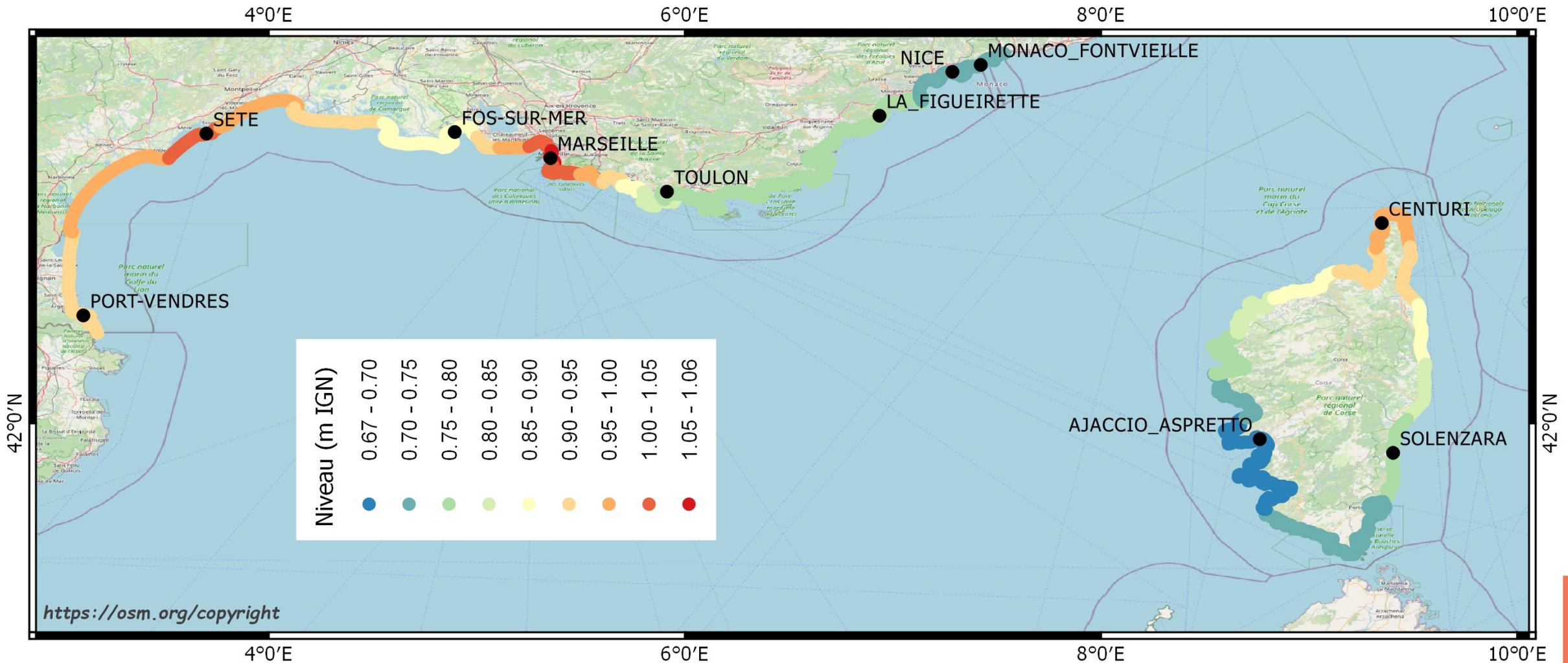
Port de Bayonne



# Résultats

## Le long du trait de côte

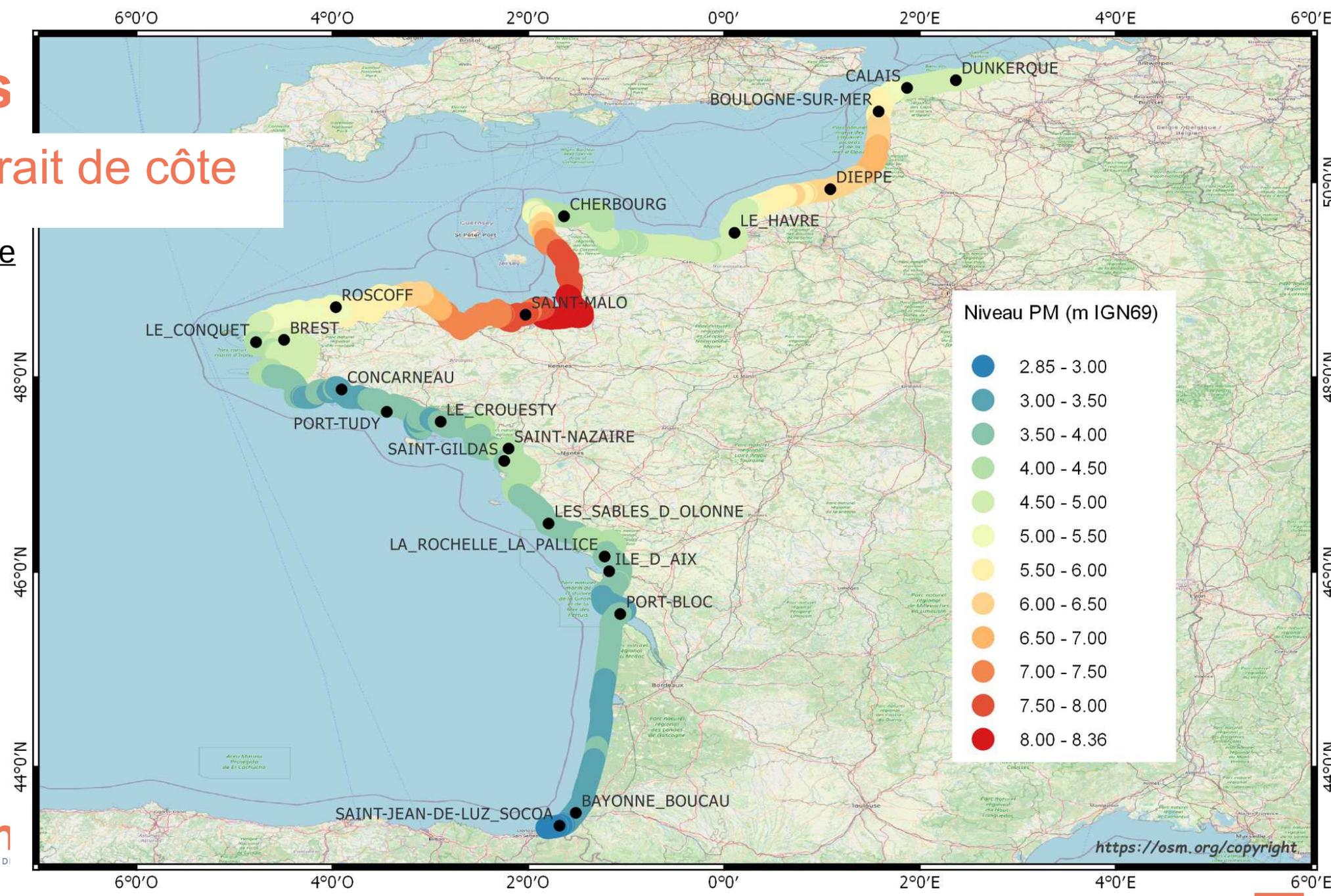
Niveaux de période de retour 100 ans



# Résultats

## Le long du trait de côte

Niveaux de période de retour 100 ans



# Résultats

## Comparaisons 2012 / 2022

Différences					
Port de référence	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Arcachon	0.05	0.04	0.03	0.04	0.04
Boucau-Bayonne	0.04	3.01	0.04	0.05	0.04
Boulogne-sur-mer	0.06	0.06	0.06	0.08	0.08
Brest	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Calais	-0.03	-0.03	-0.04	-0.06	-0.08
Cherbourg	0.02	0.01	0.01	0.00	-0.01
Concarneau	0.03	0.02	0.00	-0.01	-0.02
Dieppe	-0.03	-0.03	-0.03	-0.01	0.03
Dunkerque	0.02	0.02	0.02	0.00	-0.01
La Rochelle	0.05	0.05	0.04	0.06	0.07
Le Conquet	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03
Le Havre	0.03	0.05	0.08	0.12	0.15
Les Sables d'Olonne	0.03	0.03	0.02	0.00	-0.02
Pointe de Saint-Gildas	0.07	0.07	0.07	0.06	0.05
Port-Bloc	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03
Port-Tudy	0.01	0.01	0.00	-0.02	-0.03
Roscoff	0.02	0.02	0.01	0.00	-0.01
Saint-Malo	0.04	0.02	0.01	-0.01	0.00
Saint-Nazaire	0.06	0.06	0.06	0.08	0.08
Socoa St-Jean-de-Luz	0.03	0.04	0.03	0.02	0.01

Valeur absolue

< 5cm

< 10 cm

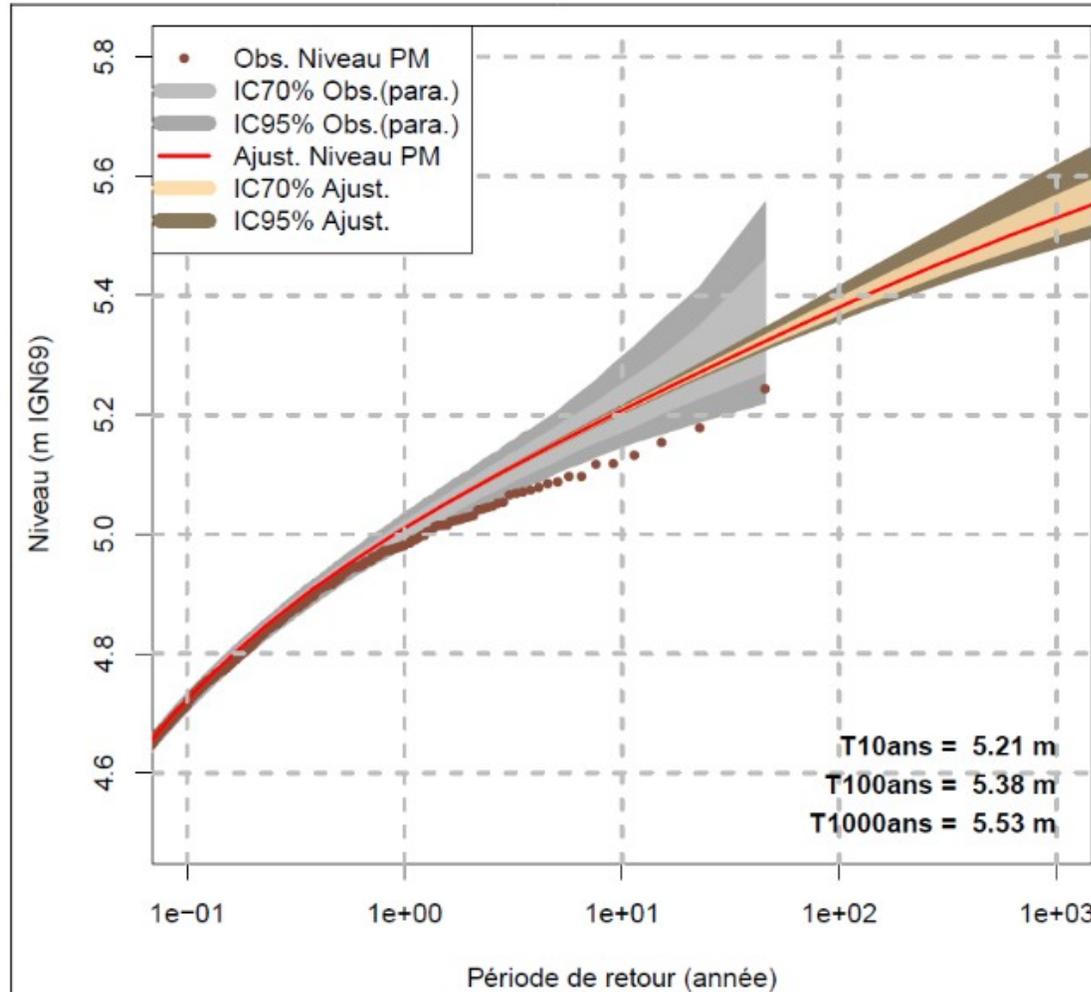
< 15 cm



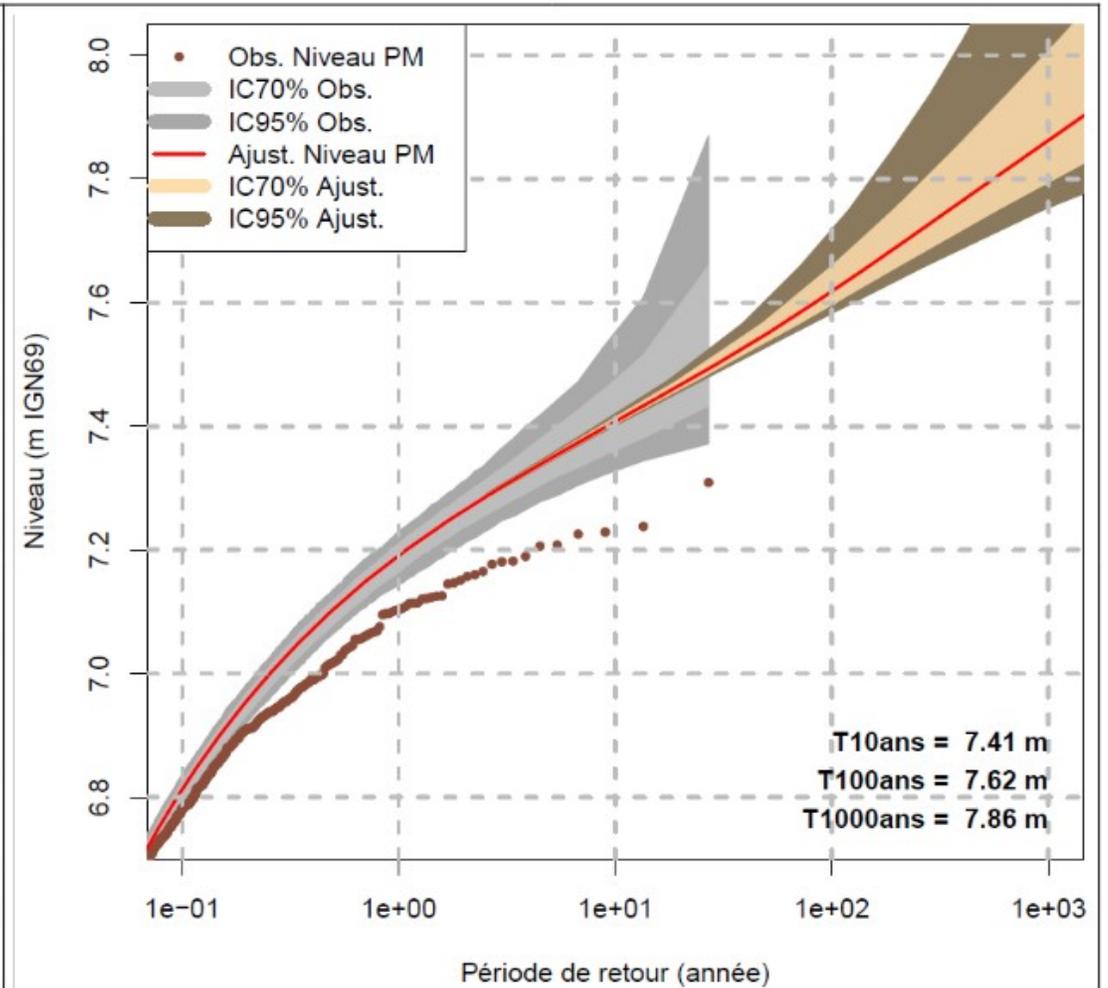
# Dépendance marée surcote

# Dépendance marée surcote PM

Indépendance  
Exemple de Roscoff et Saint-Malo



a) Roscoff



b) Saint-Malo

# Dépendance marée surcote PM

## Distribution de marée par bandes de surcotes

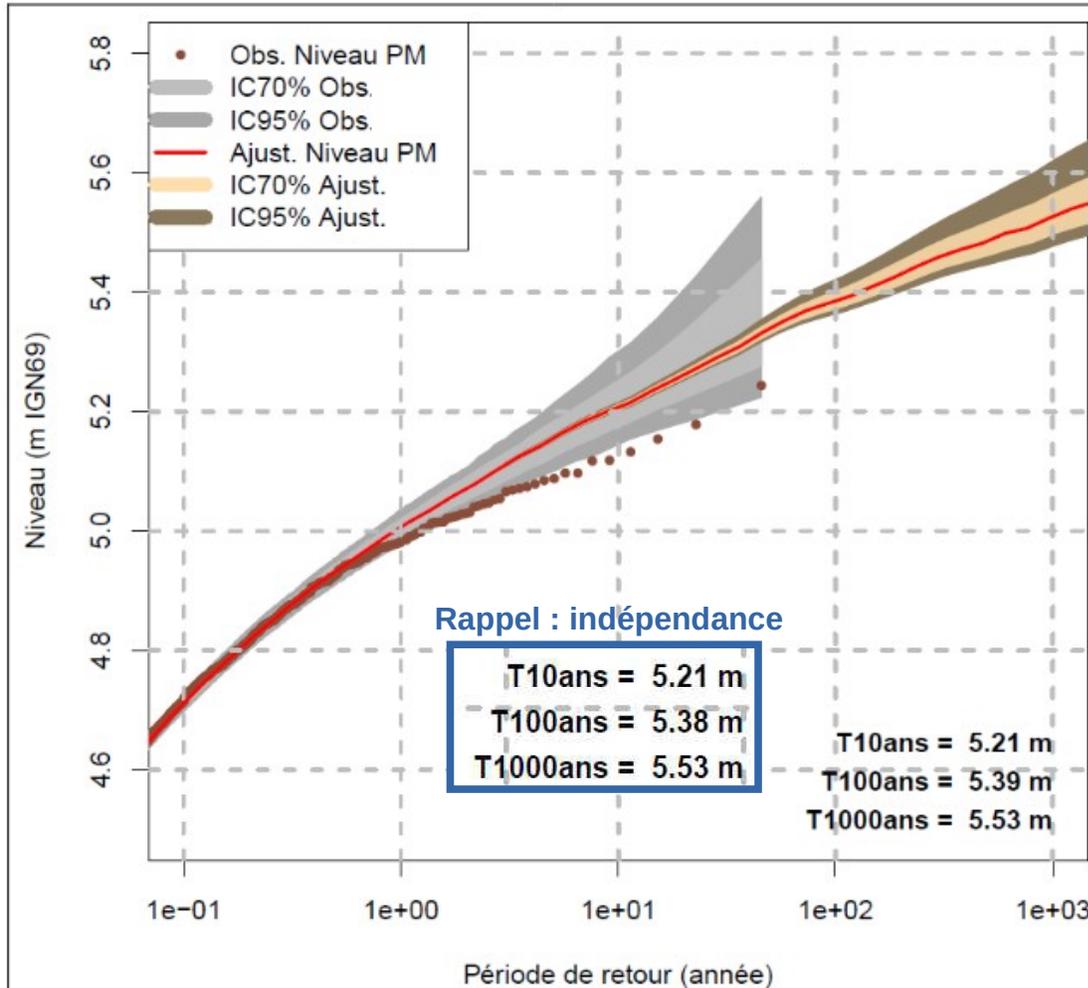
- Sélection de bandes équiprobables de surcote
- Calcul de la distribution empirique de marée par bandes de surcotes

## Calcul des périodes de retour de niveaux d'eau

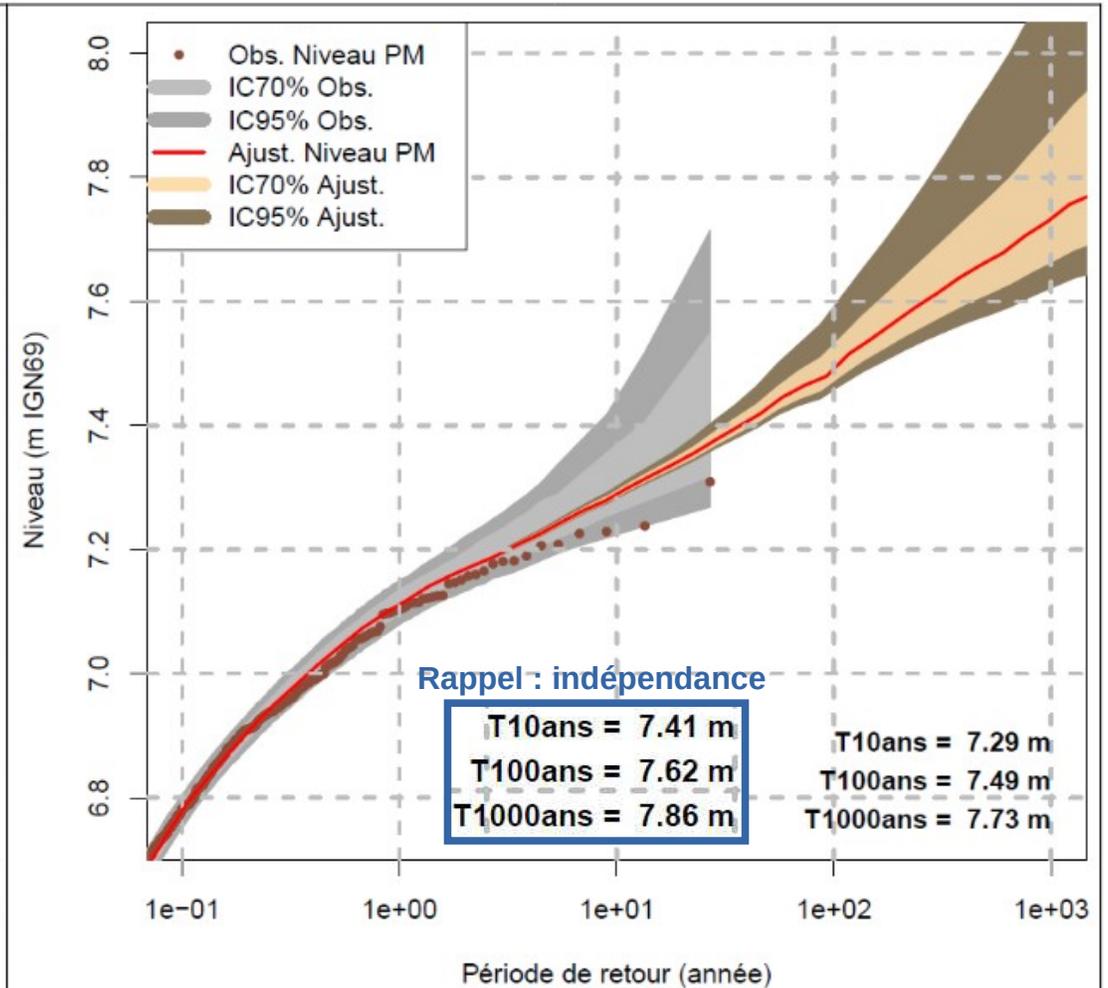
- Simulation de  $10^5$  années de surcote PM
- Surcote => bande de surcote => distribution de marée
- Tirages aléatoire de  $10^5$  années de marée PM
- Calcul des niveaux d'eau et analyse empirique des périodes de retour

# Dépendance marée surcote PM

2 bandes de surcotes  
Exemple de Roscoff et Saint-Malo



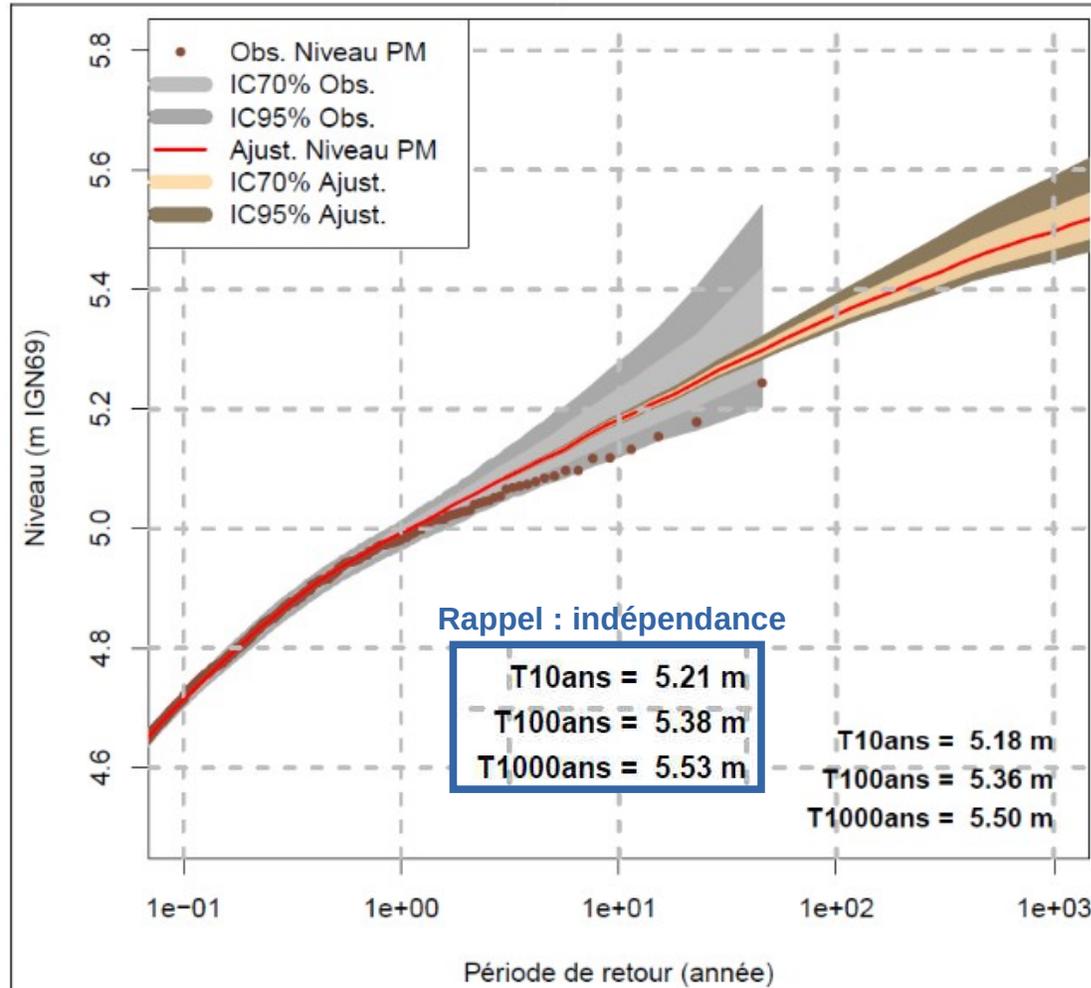
a) Roscoff



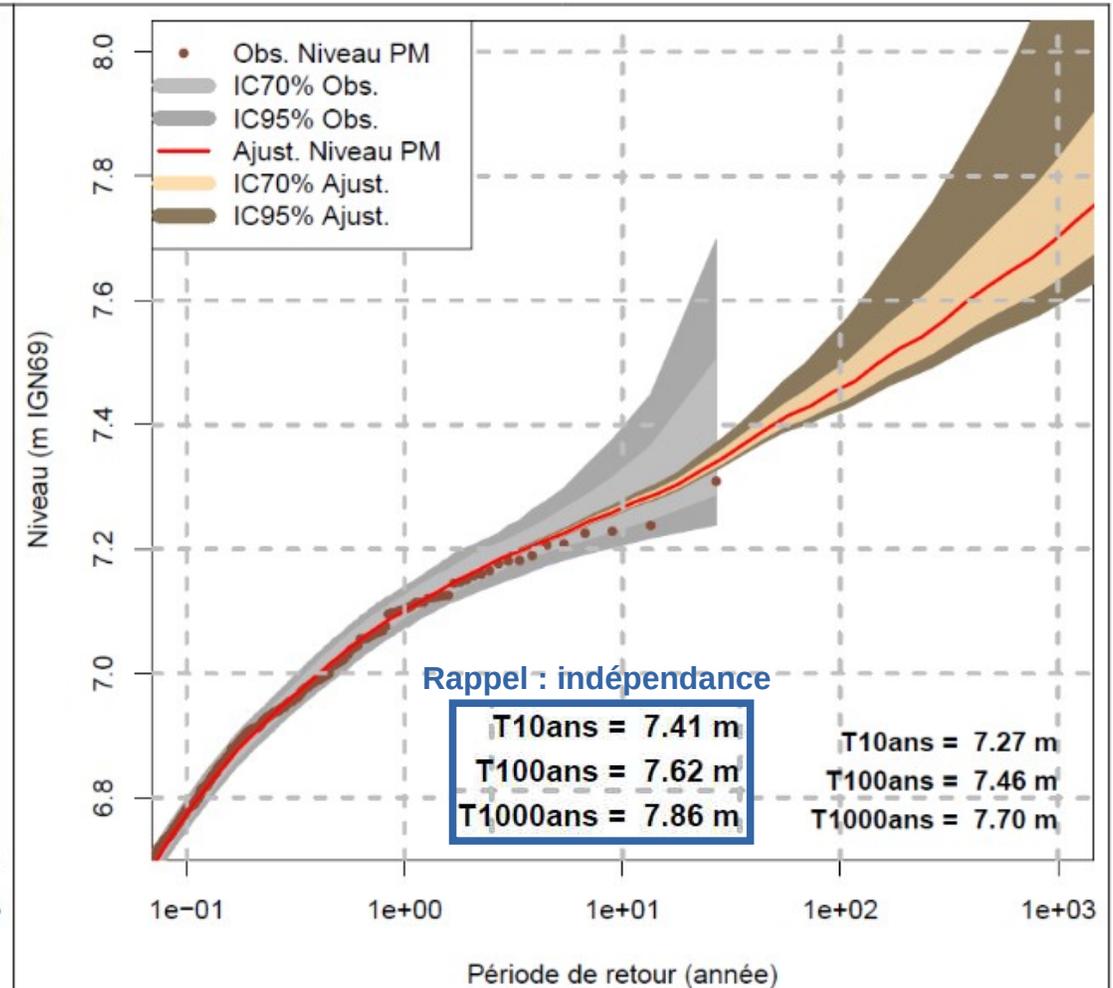
b) Saint-Malo

# Dépendance marée surcote PM

3 bandes de surcotes  
Exemple de Roscoff et Saint-Malo



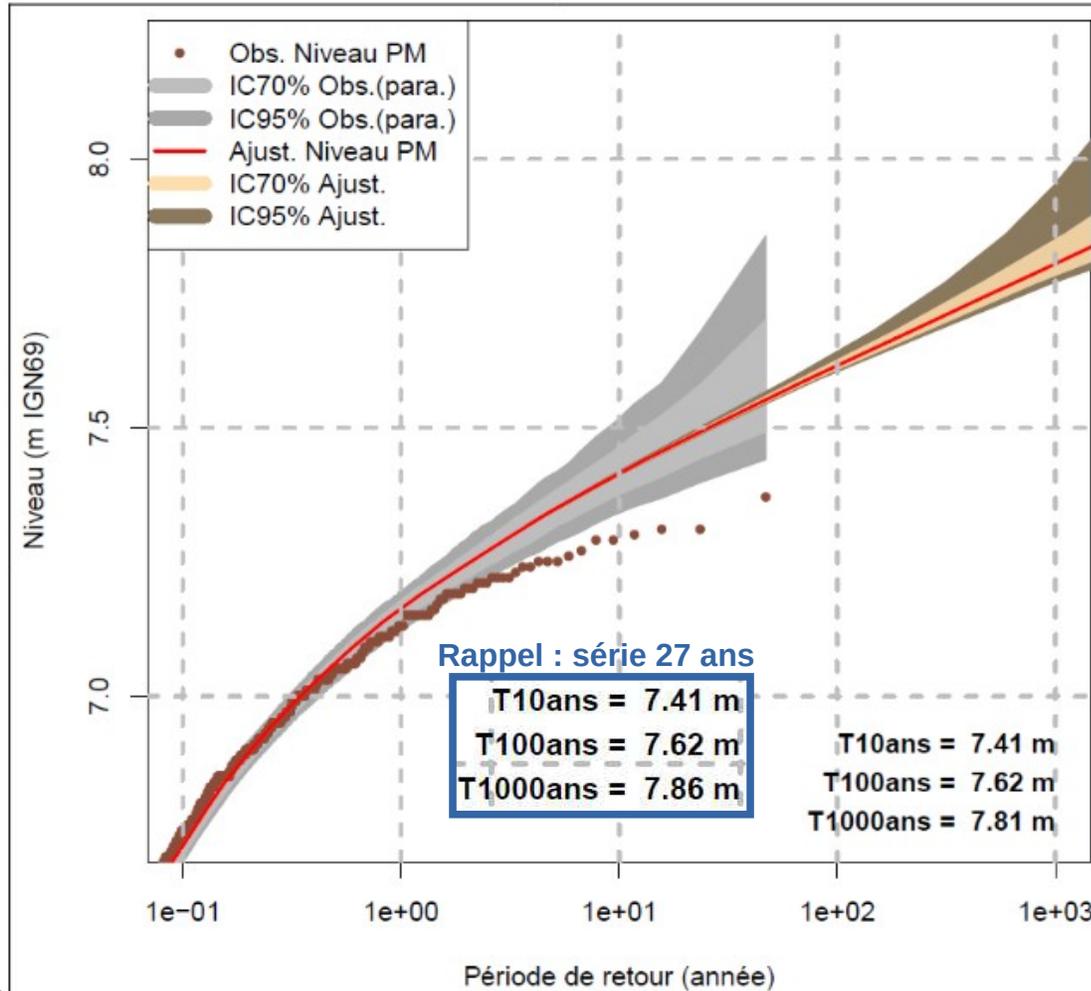
a) Roscoff



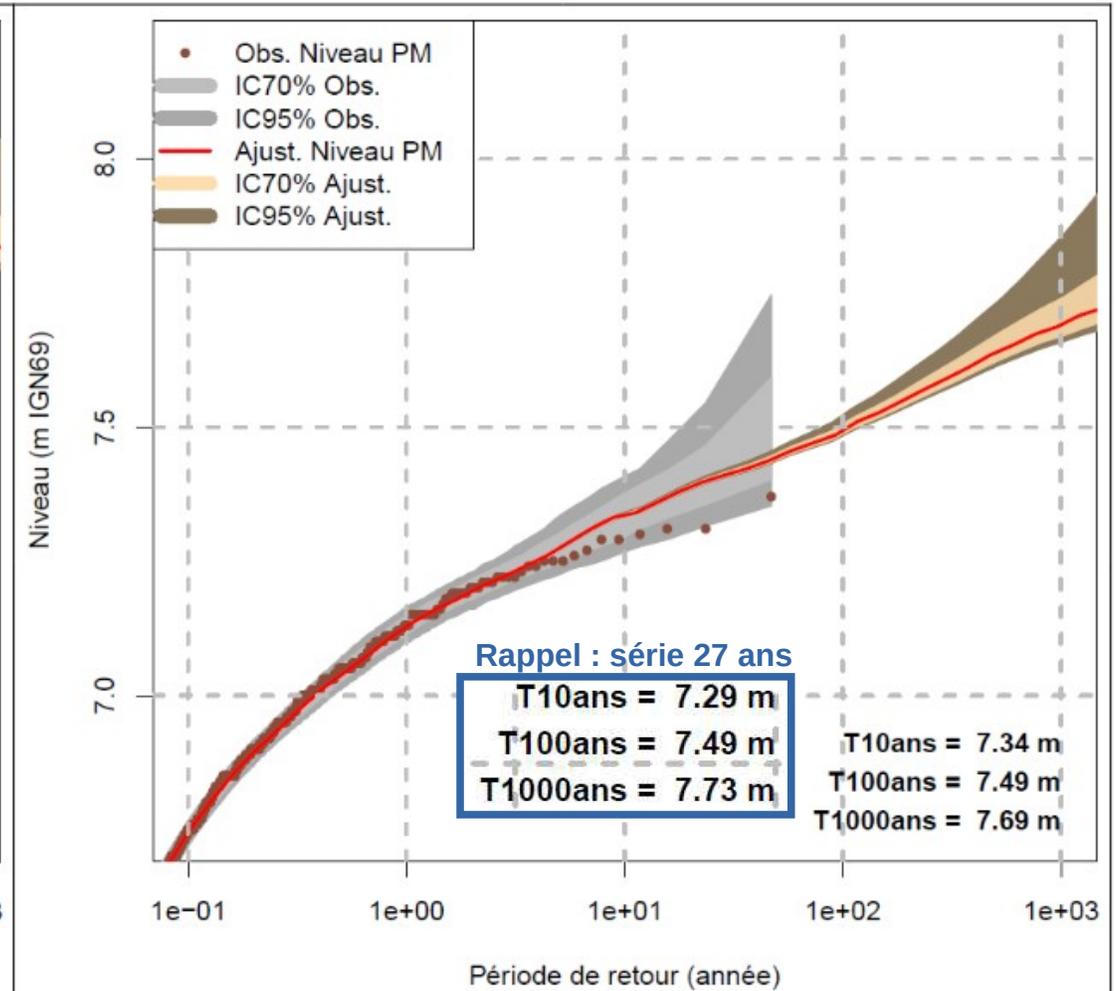
b) Saint-Malo

# Dépendance marée surcote PM

Reconstruction de la série de Saint-Malo  
27 ans → 47 ans de données



a) Indépendance marée / surcote



b) Modèle de dépendance marée/surcote à 2 bandes

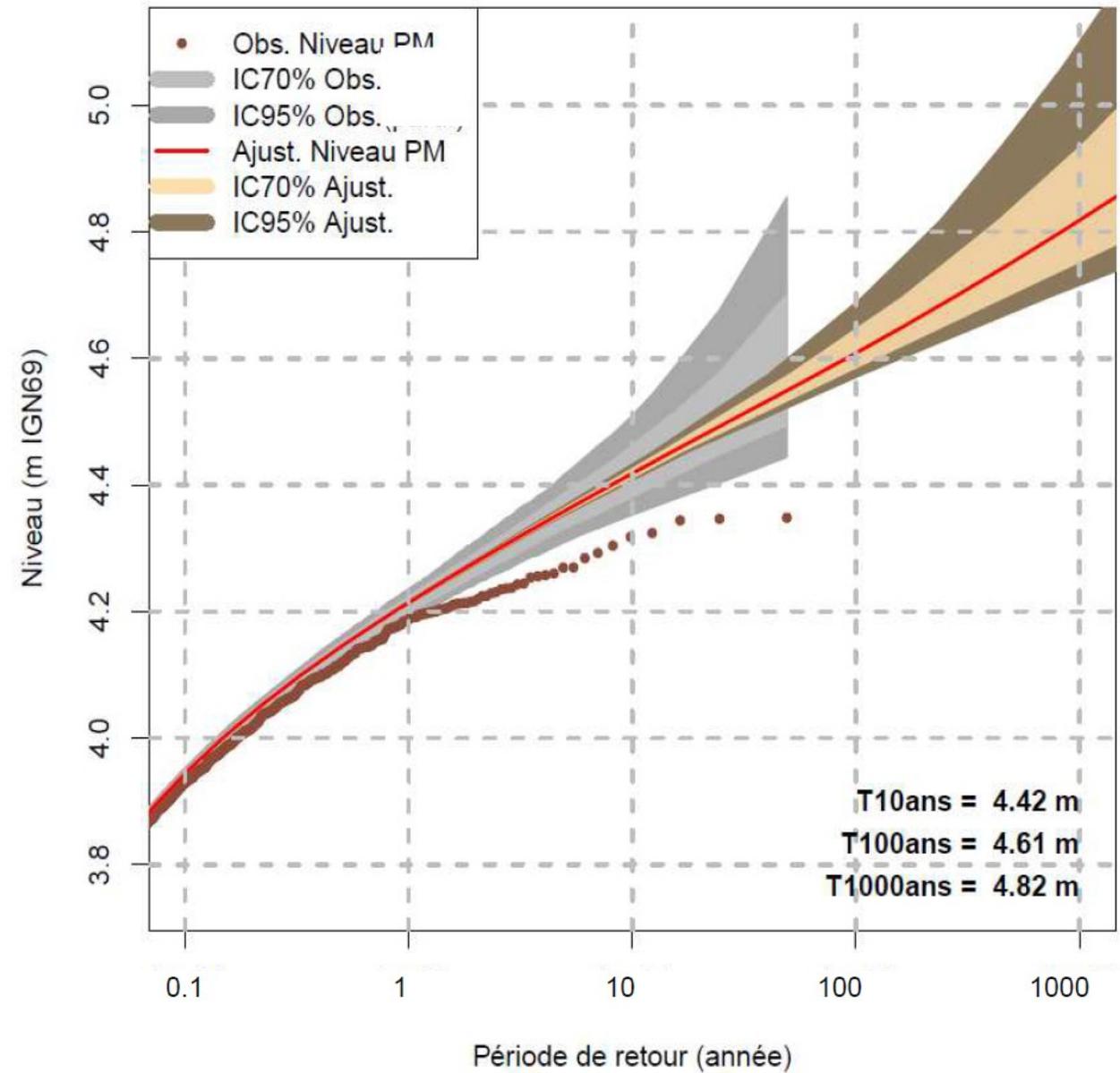
# Dépendance marée surcote PM

Le Conquet

Cherbourg, Roscoff, Le Conquet, Bayonne ...

Si pas de dépendance marée / surcote

=> durée d'observation trop courte ?

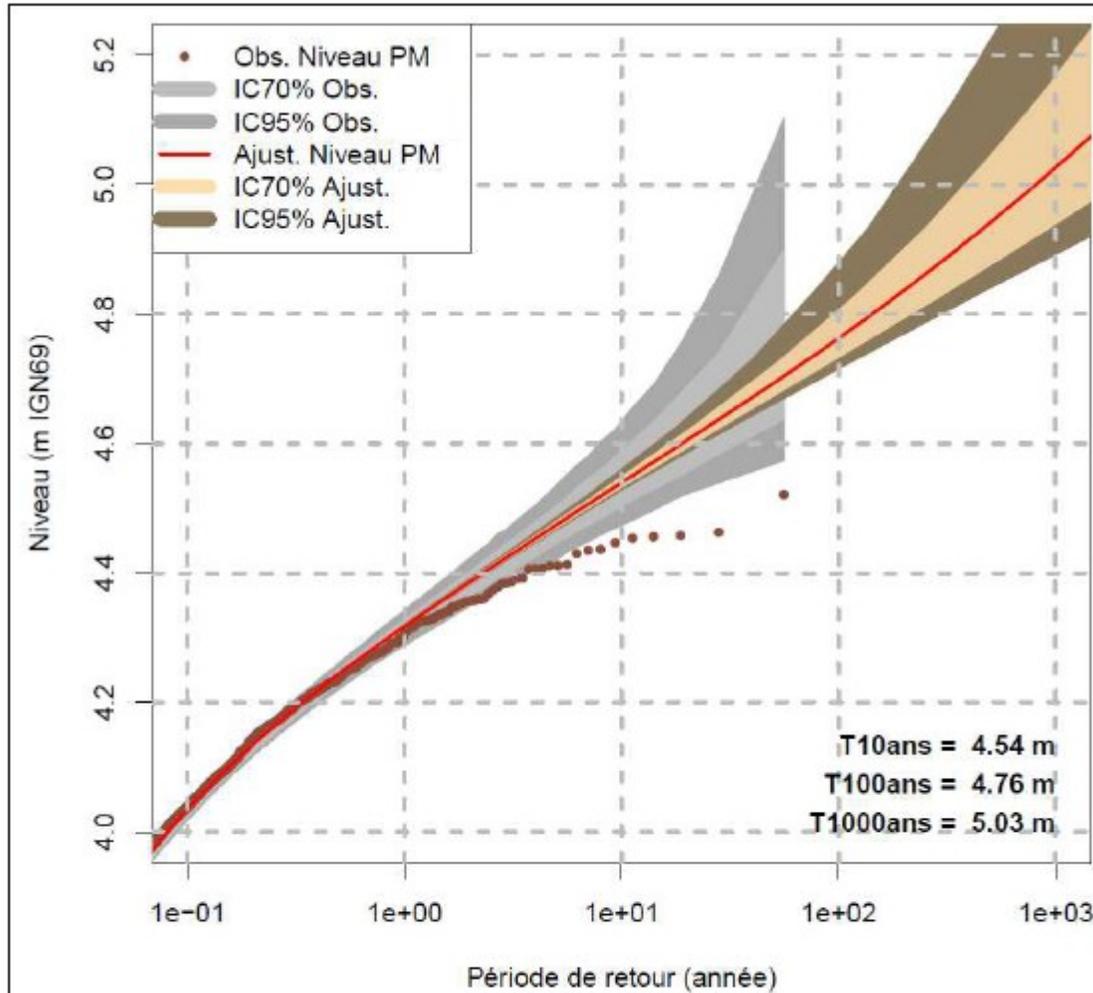




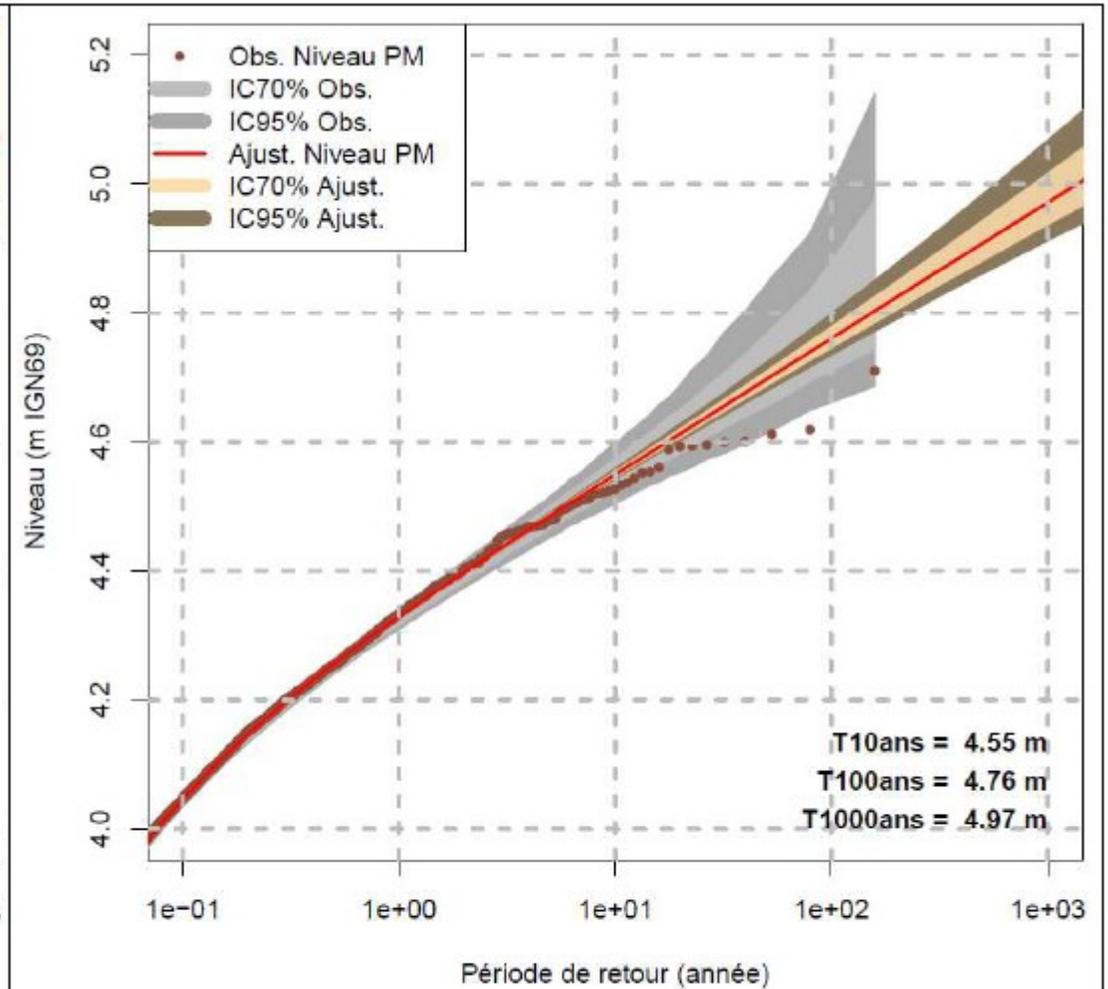
# Test de sensibilité sur la durée d'observation

# Test de sensibilité sur la durée d'observation

Marégraphe de Brest



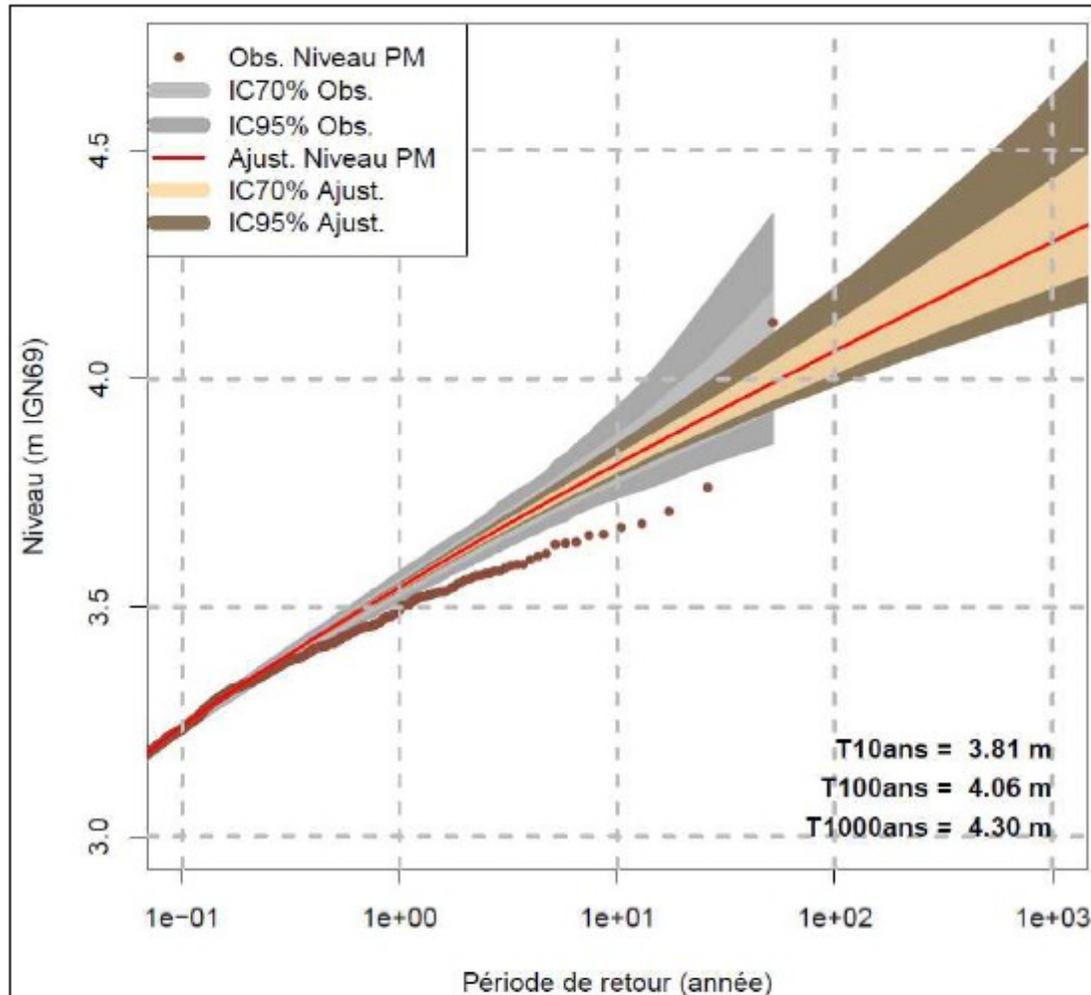
a) 56 ans de données (1965 à 2021)



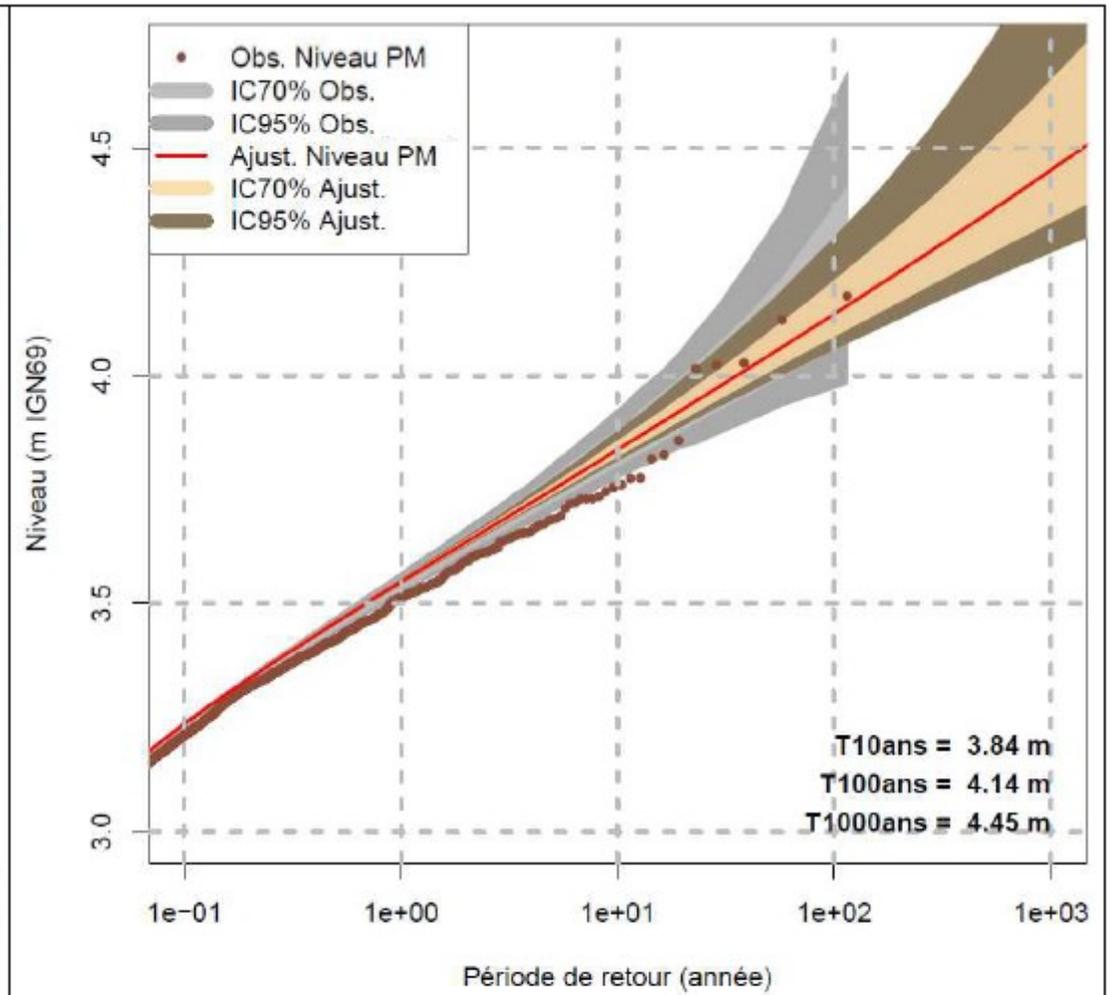
b) 159 ans de données (1846 à 2021)

# Test de sensibilité sur la durée d'observation

Marégraphe de Saint-Nazaire



a) 52 ans de données (1965 à 2021)

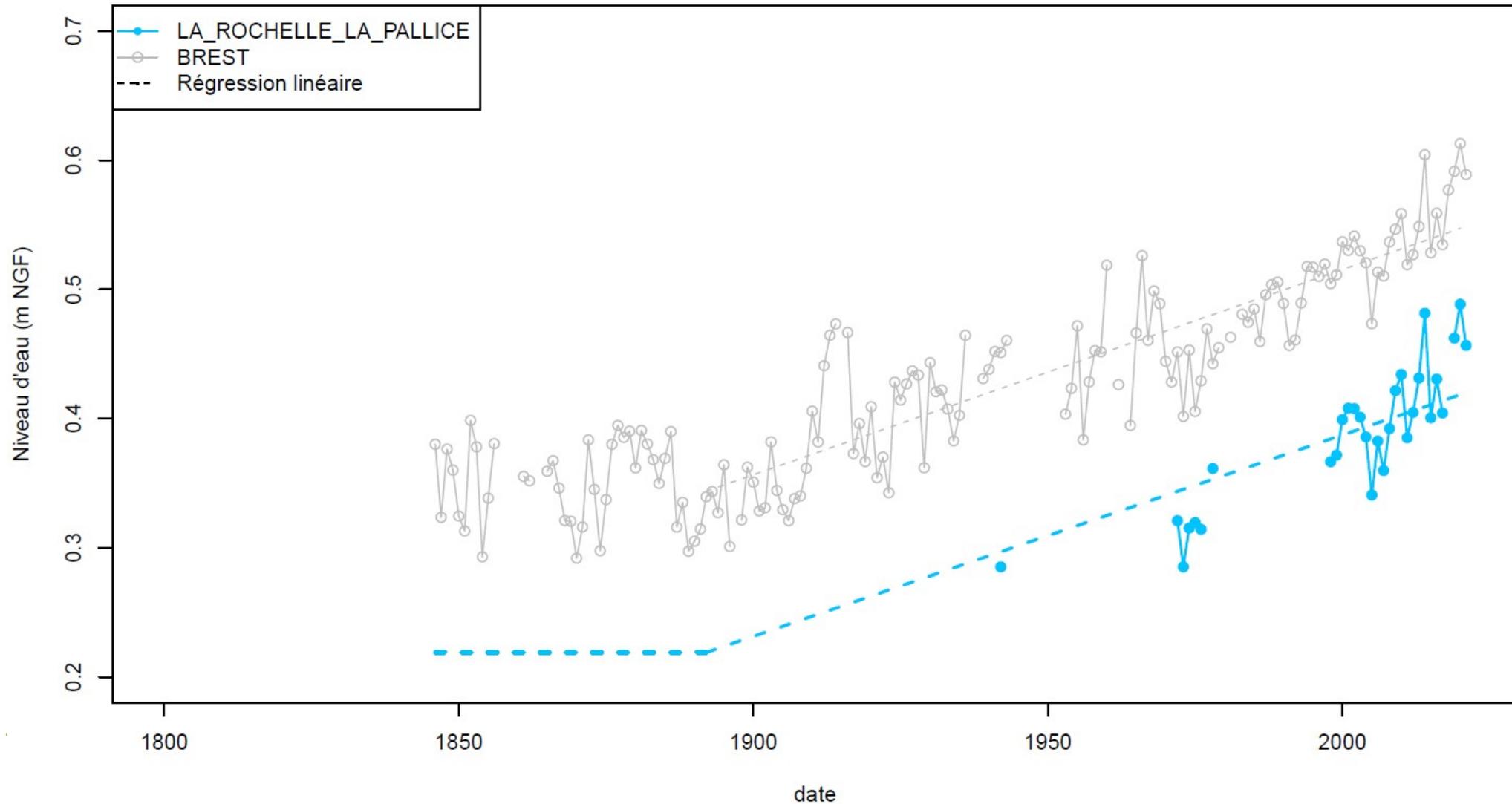


b) 155 ans de données (1863 à 2021)

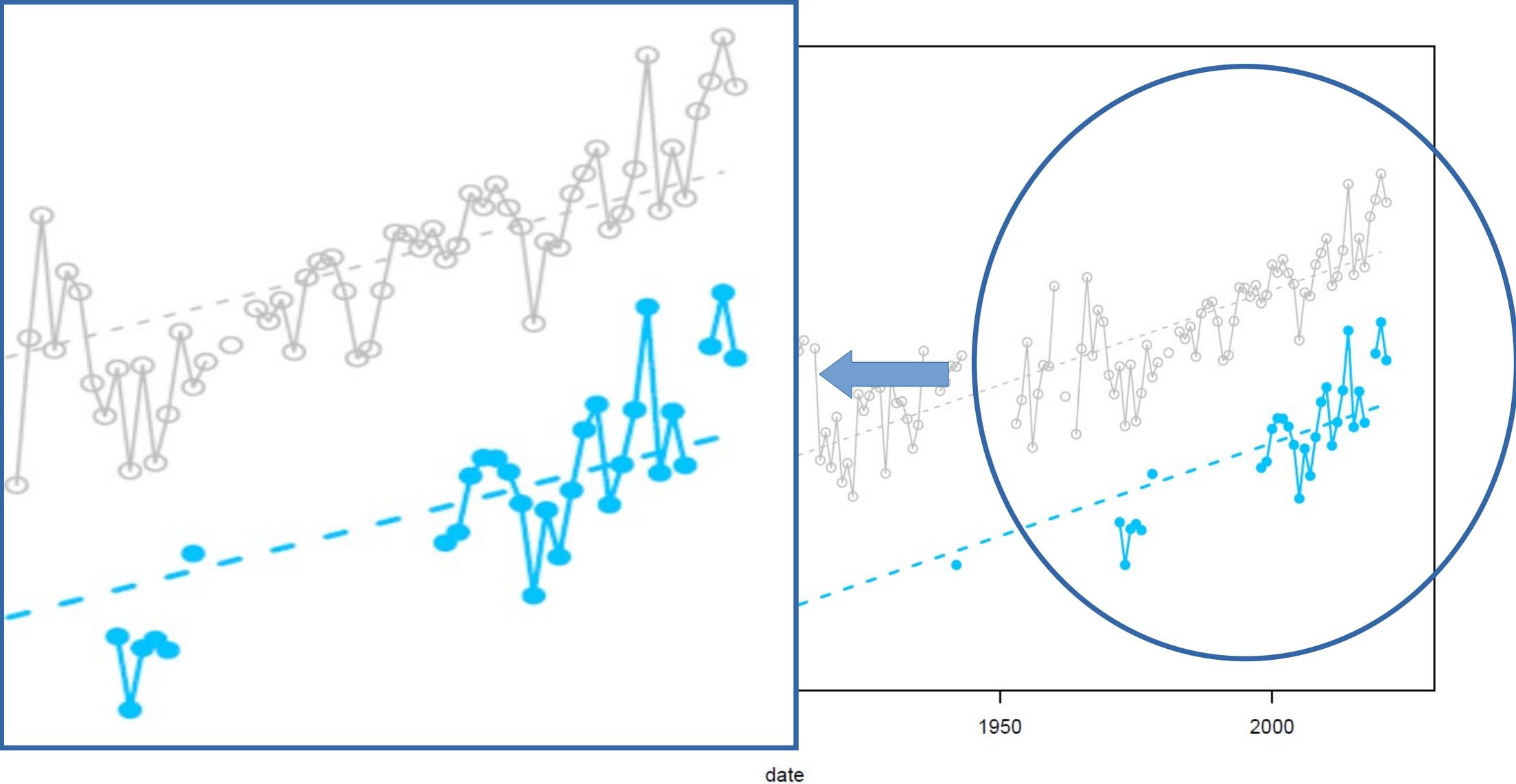


# Estimation des variations pluriannuelles

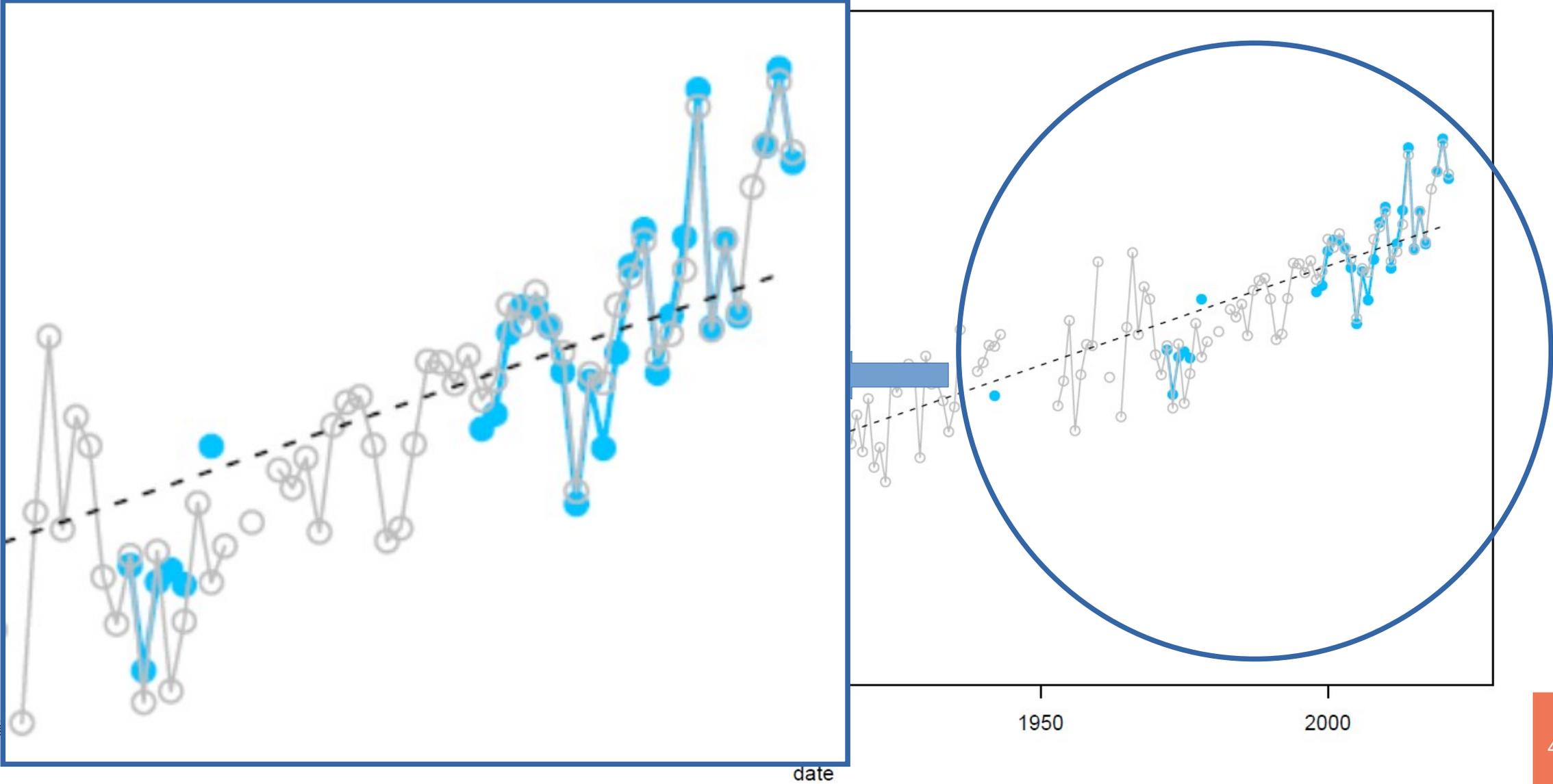
# Estimation des variations pluriannuelles



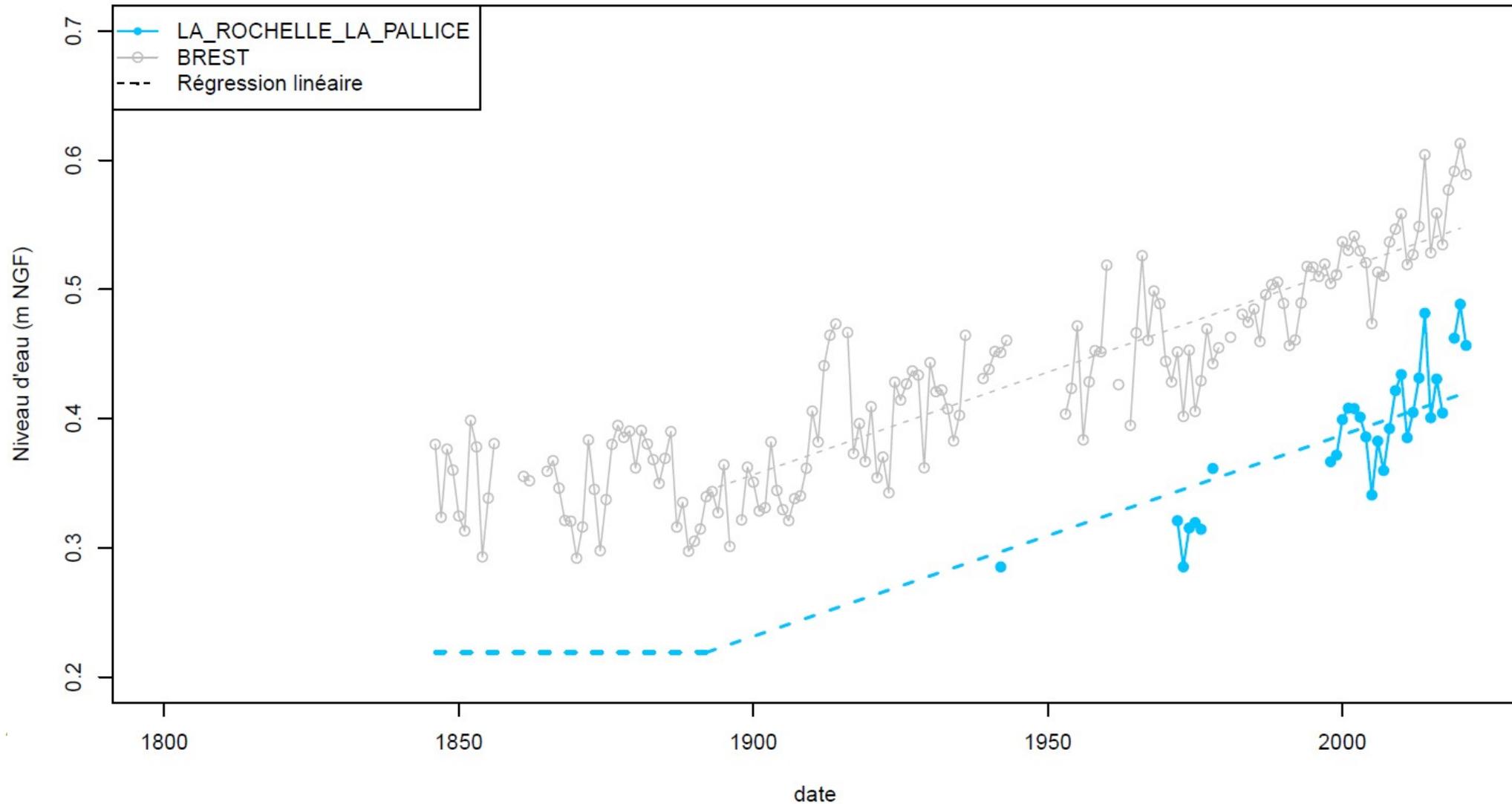
# Estimation des variations pluriannuelles



# Estimation des variations pluriannuelles

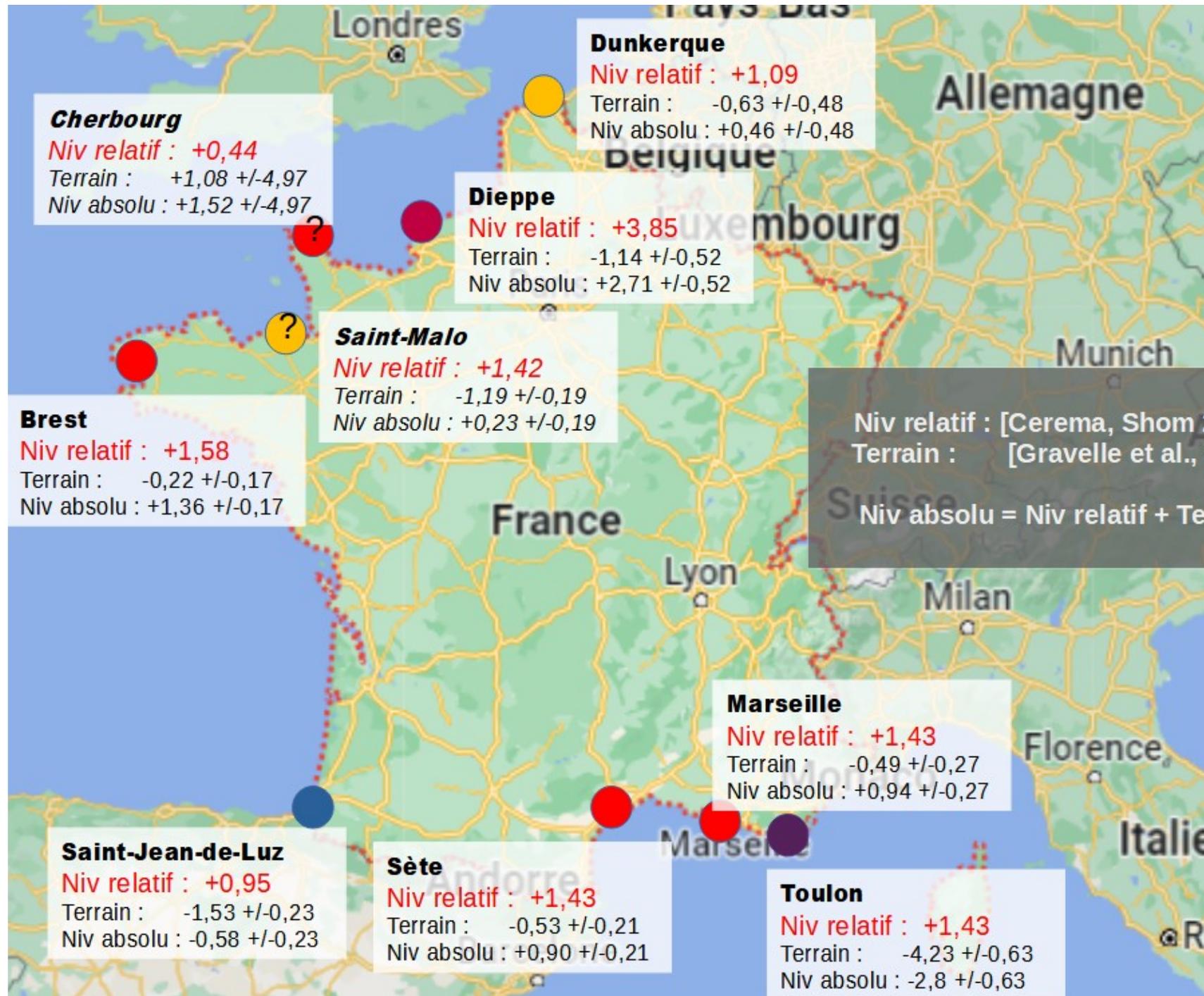


# Estimation des variations pluriannuelles



# Estimation des variations pluriannuelles

Mouvements de terrain :





# Conseils d'utilisation et perspectives

# Conseils d'utilisation

## Période de retour maximale exploitable

- Fonction de la marge d'erreur admissible
- De manière générale, jusqu'à 50 ans (Médi) ou 100 ans (Manche Atl.)

## Ajustement par GPD ou loi exponentielle

- Loi exponentielle souvent plus sécuritaire
- GPD plus représentative des intervalles de confiance

## Incertitude sur les prédictions de marée

- Pour rappel  $\pm 15$  cm (Ports) ou  $\pm 25$  cm (entre les ports)

## Prise en compte du changement climatique

- Pour rappel, année de référence 2022 (Ports) ou 2000 (entre les ports)
- Prendre en compte les dernières estimations du GIEC

## Caractérisation de l'aléa submersion marine

- Complémentaire et nécessaire : analyse des événements tempétueux historiques

# Perspectives

## Application à l'outre-mer

## Apport des données historiques et régionales

- Meilleures caractérisation des horsains (type Martin et Xynthia)
- Diminution des intervalles de confiance

## Apport des nouvelles bases de données de simulations numériques de niveau d'eau

- Marc (Ifremer), HYWAT (Shom) ...

**Merci de votre attention**

