

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

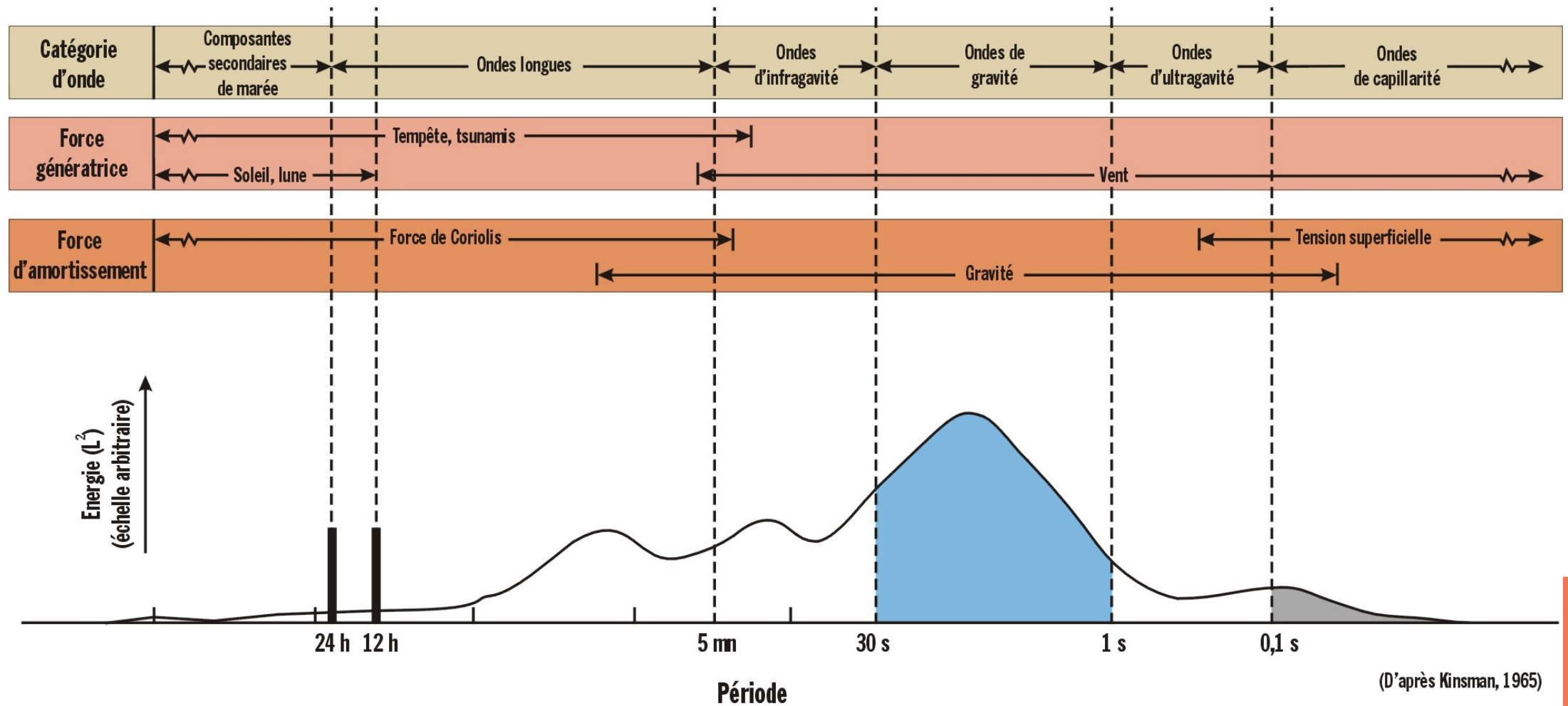
- Plus de données et extension à la Méditerranée
- Revoir la méthode d'interpolation
- Des estimations jusqu'à la période de retour 1000 ans avec le calcul des intervalles de confiance

Méthodologie d'analyse

Méthodologie d'analyse

Rappel sur le niveau marin

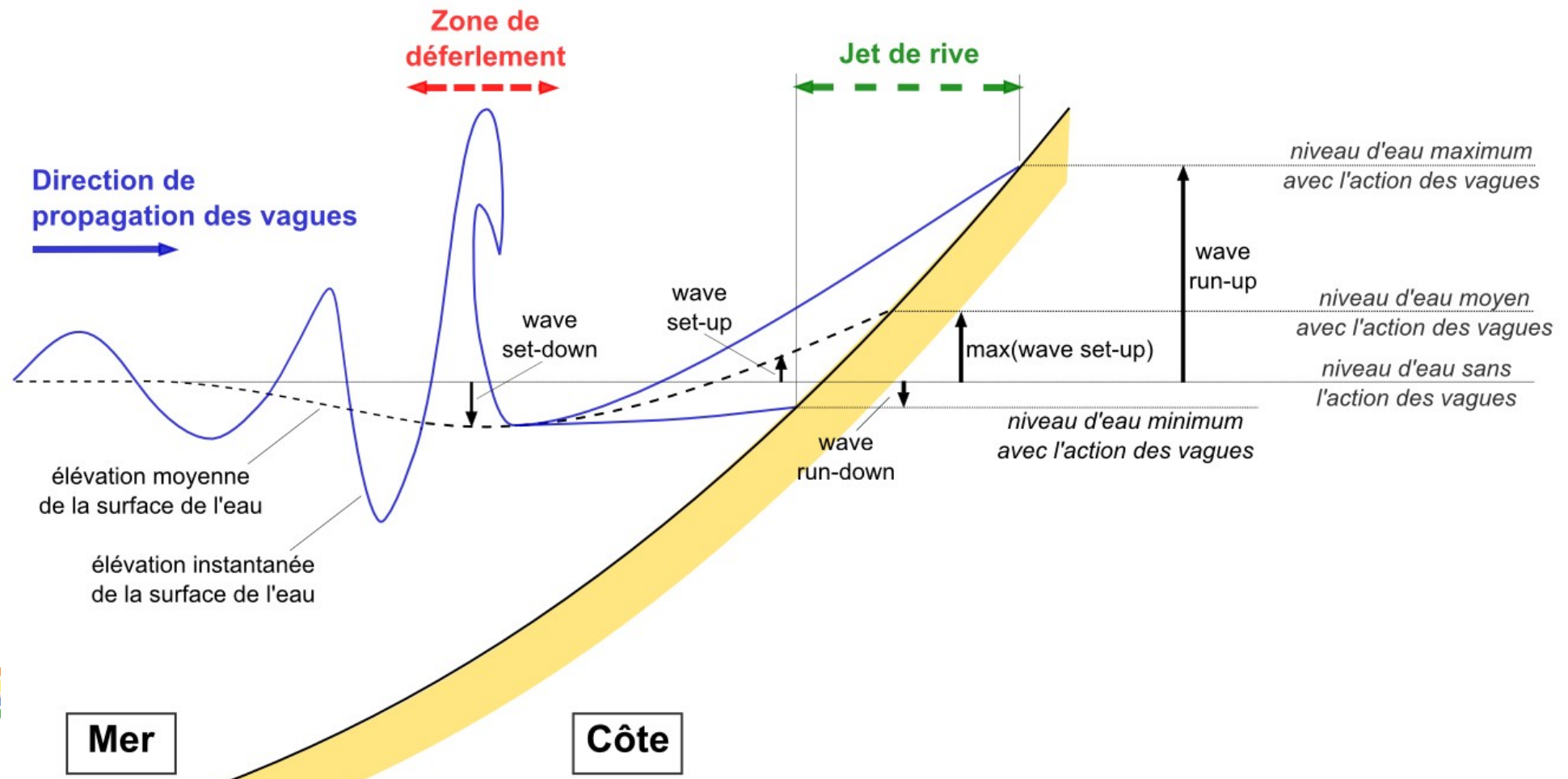
- Distribution de l'énergie des ondes à la surface des océans



Méthodologie d'analyse

Rappel sur le niveau marin

- Niveau au repos, niveau statique, niveau dynamique



Méthodologie d'analyse

Données utilisées

Observation marégraphiques

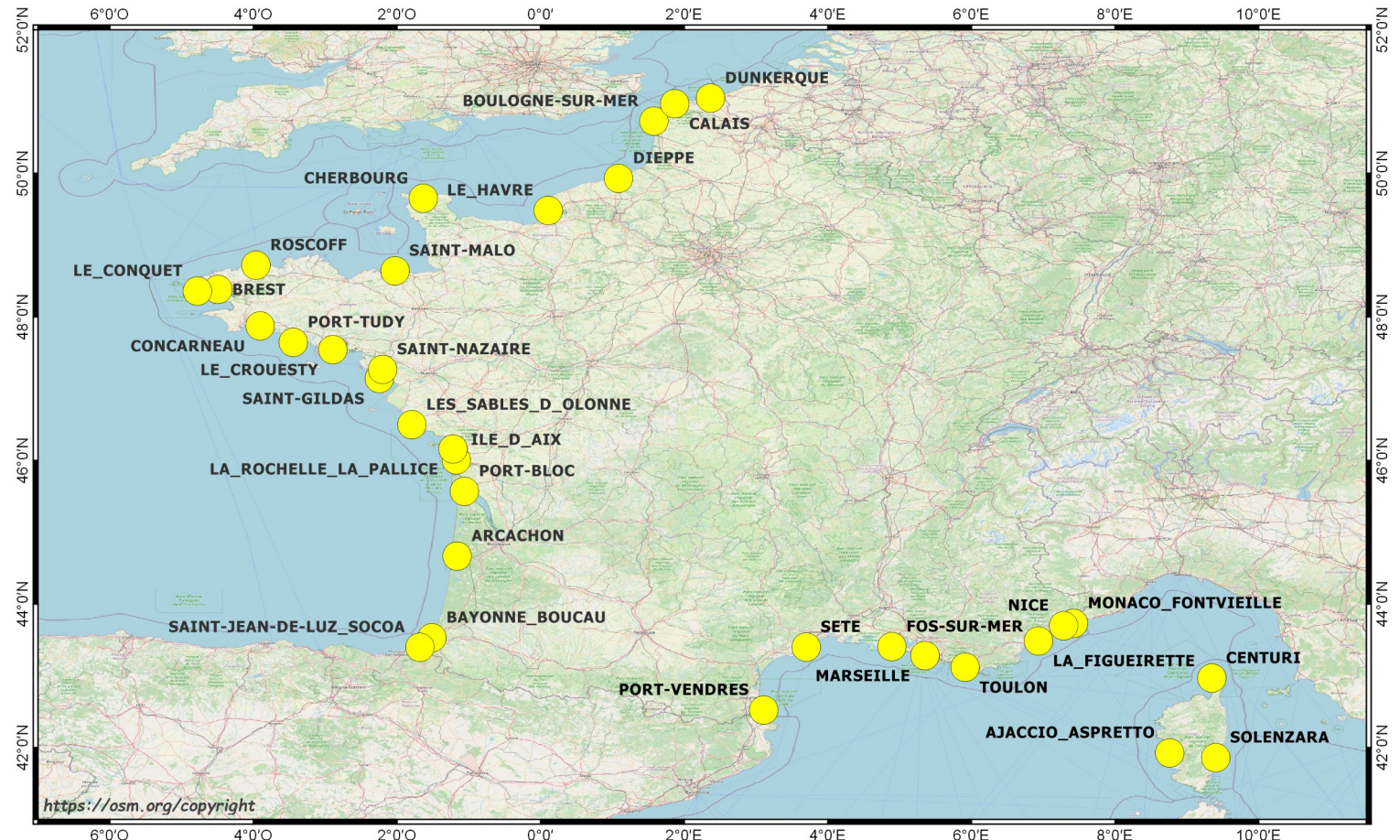
- 33 ports de référence
- Données horaires validées (data.shom.fr)

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 $\pm 24h$)

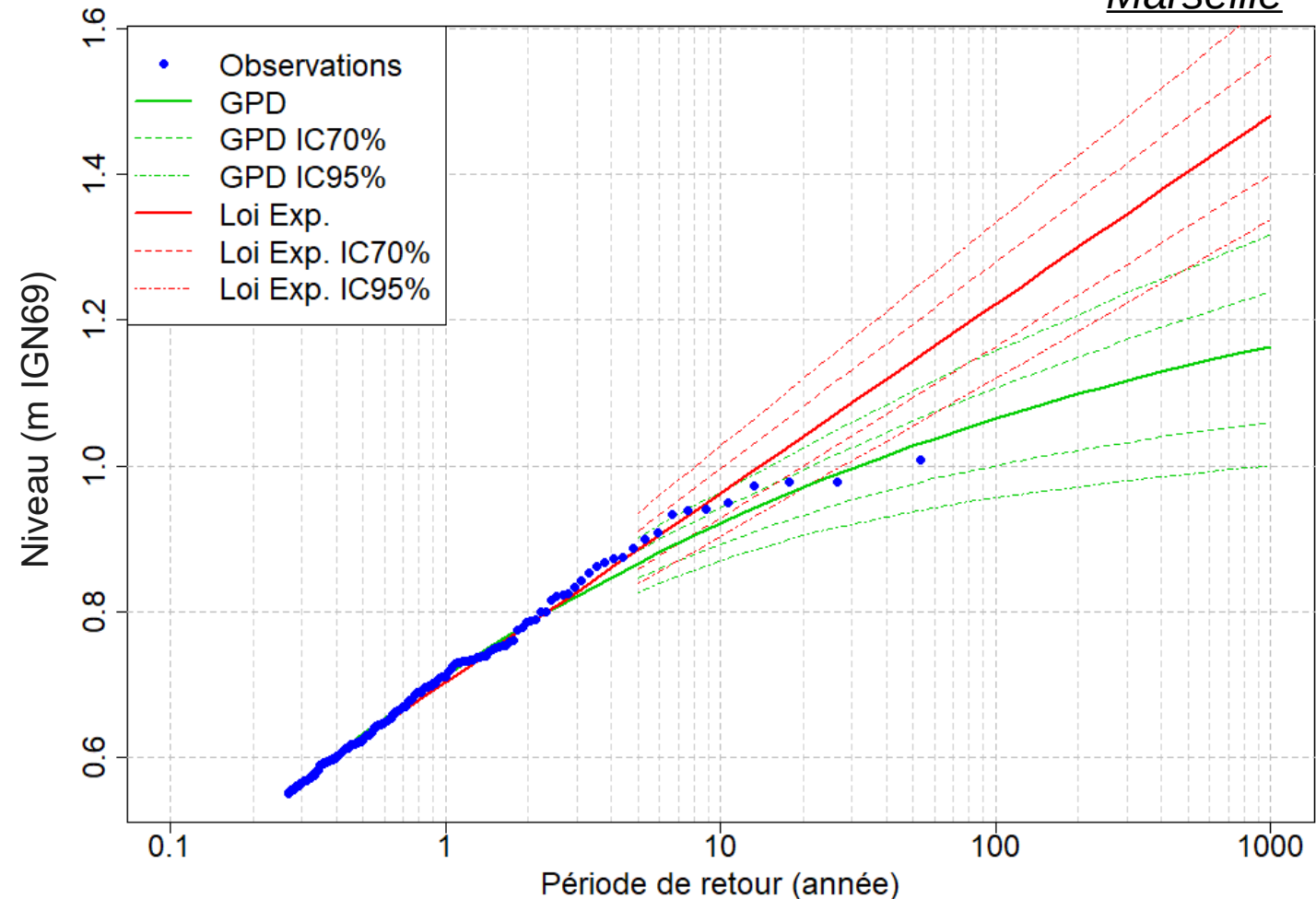
2 lois d'ajustement :

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

- Exponentielle

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

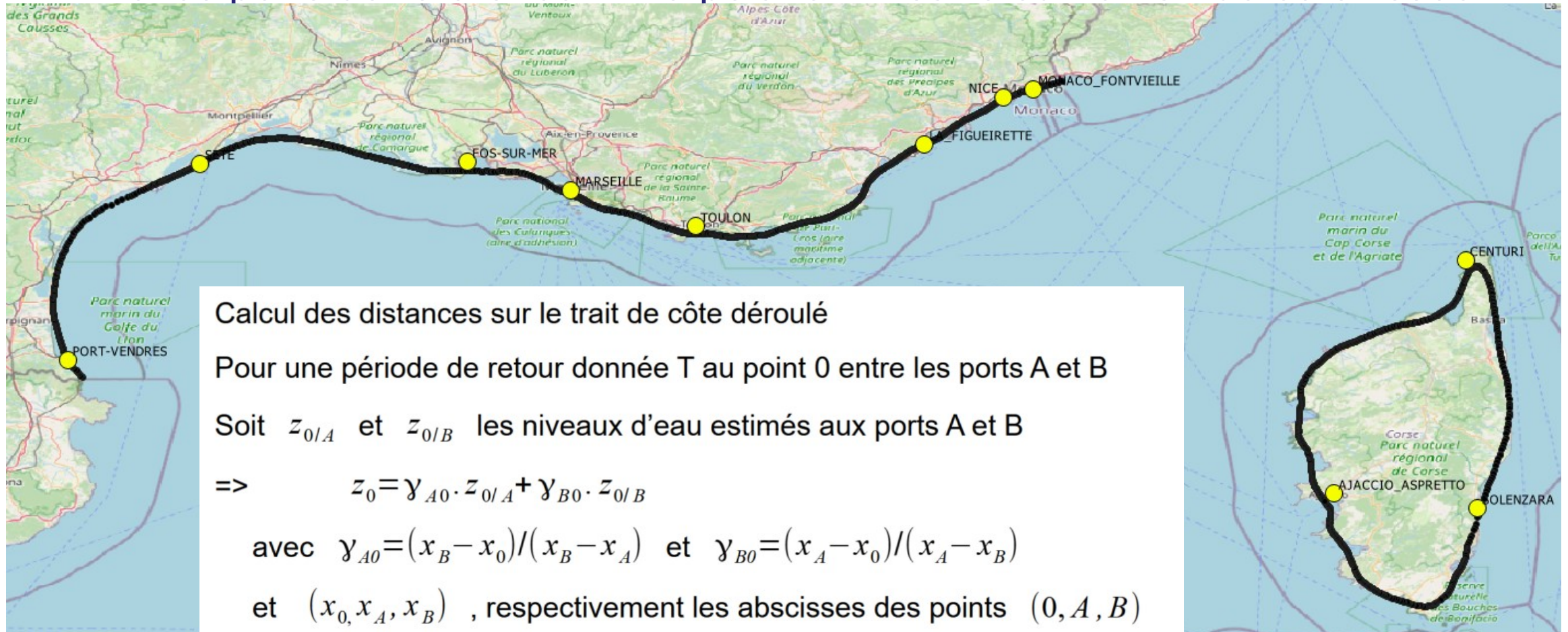
Marseille



Méthodologie d'analyse

Méditerranée

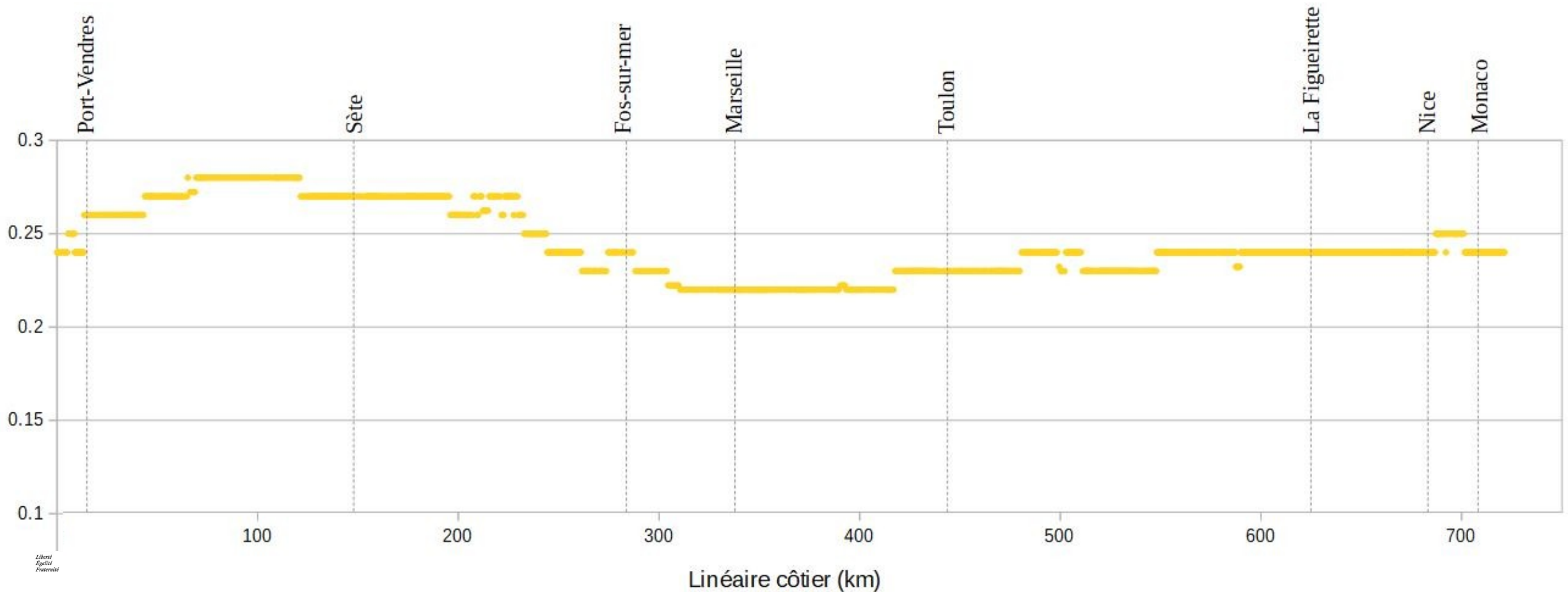
- Entre les ports de référence : Interpolation linéaire sur le trait de côte lissée



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

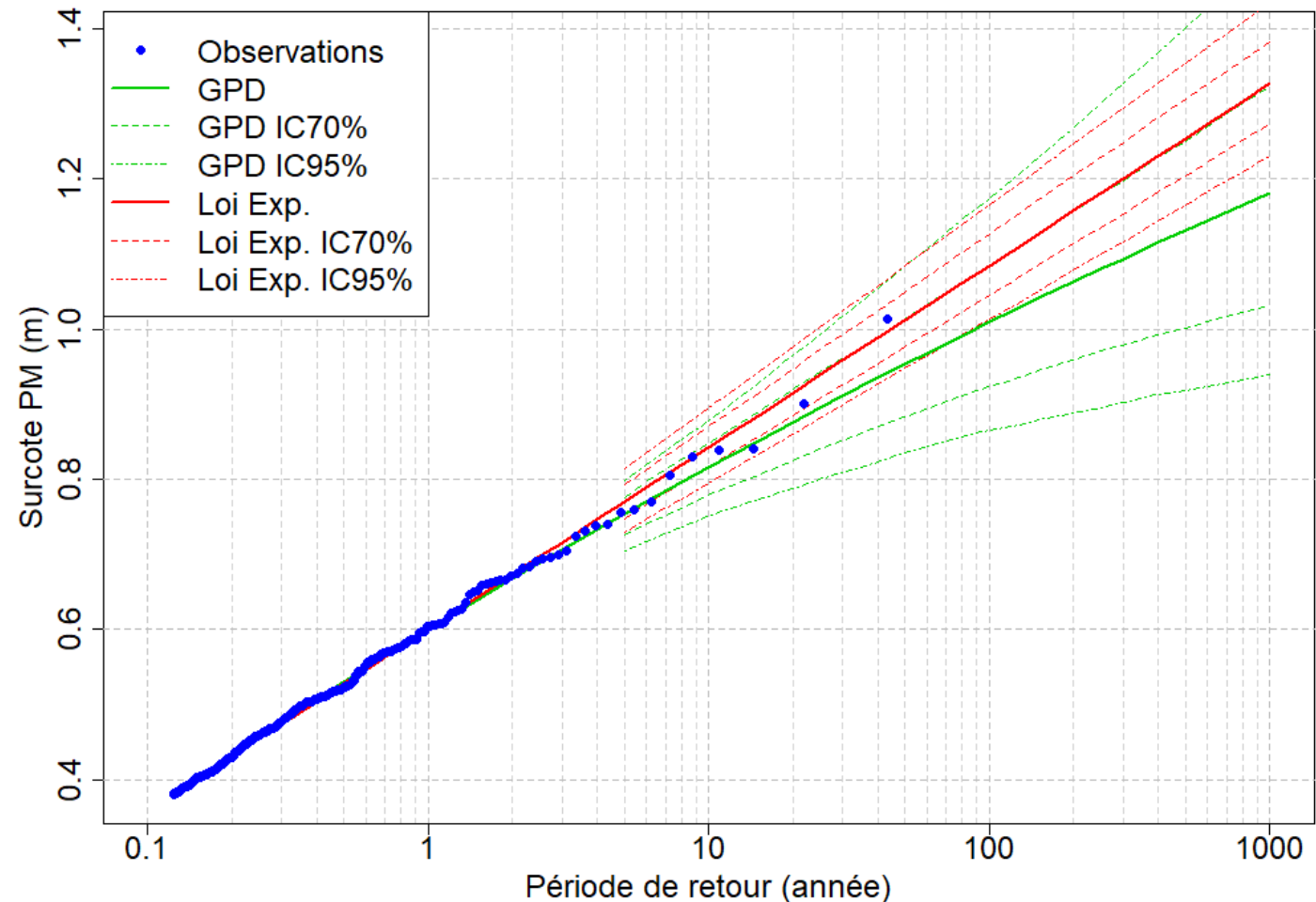
- Aux ports de référence : fort marnage => convolution marée surcote PM

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



Méthodologie d'analyse

Manche et Atlantique

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

Calais

Distribution des surcote PM

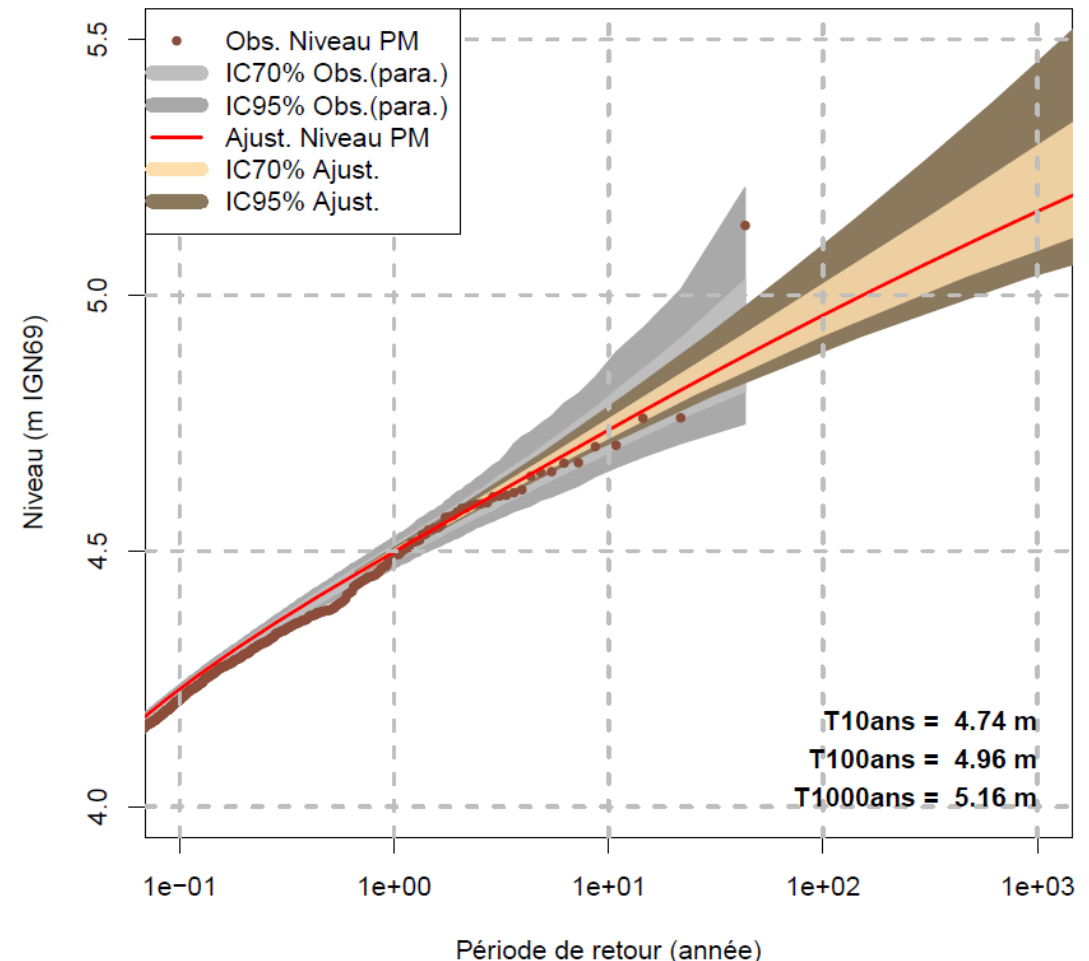
Distribution paramétrique au-dessus du seuil de tempête : Sélection par POT et ajustement par GPD ou Exponentielle

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

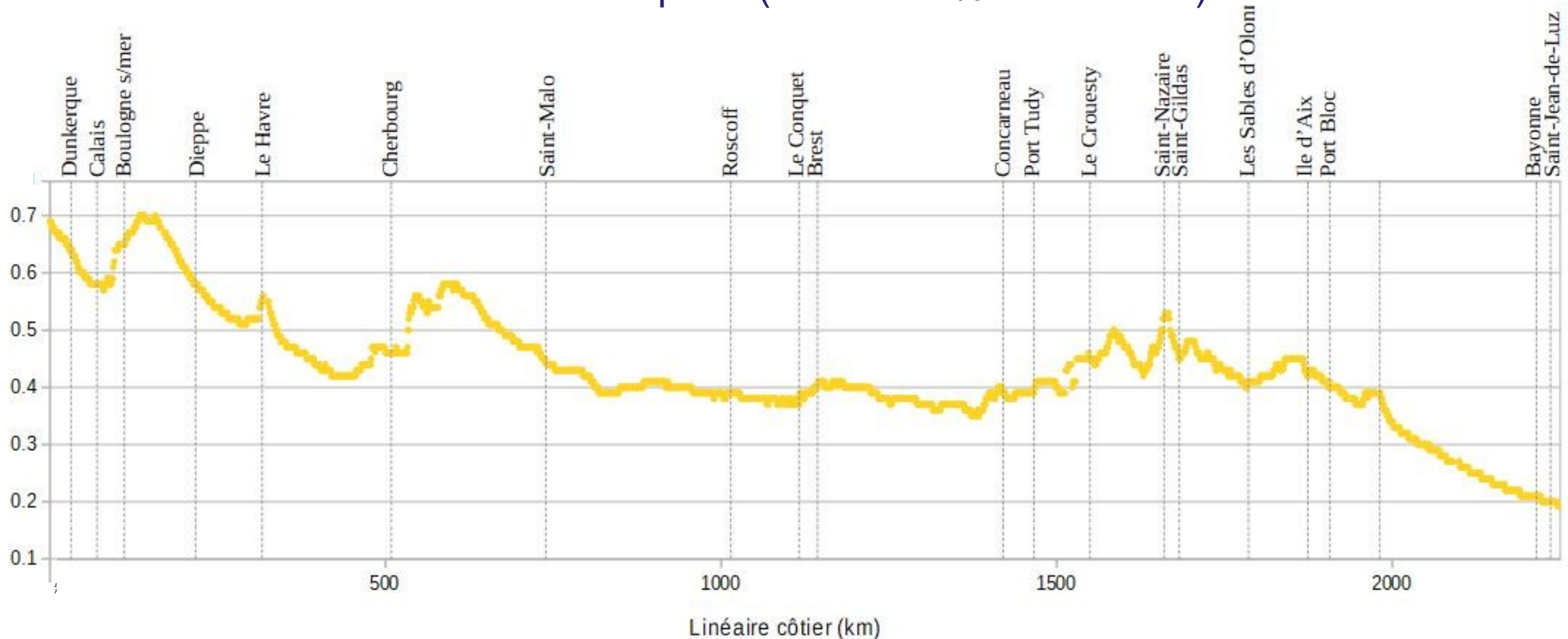
et $\theta_{0/A}$ le rapport des centiles 99 % entre les points 0 et A
des surcotes horaires HOMONIM (Shom et Météo-France)



Méthodologie d'analyse

Manche et Atlantique : entre les ports de référence

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



Incertitudes et limites

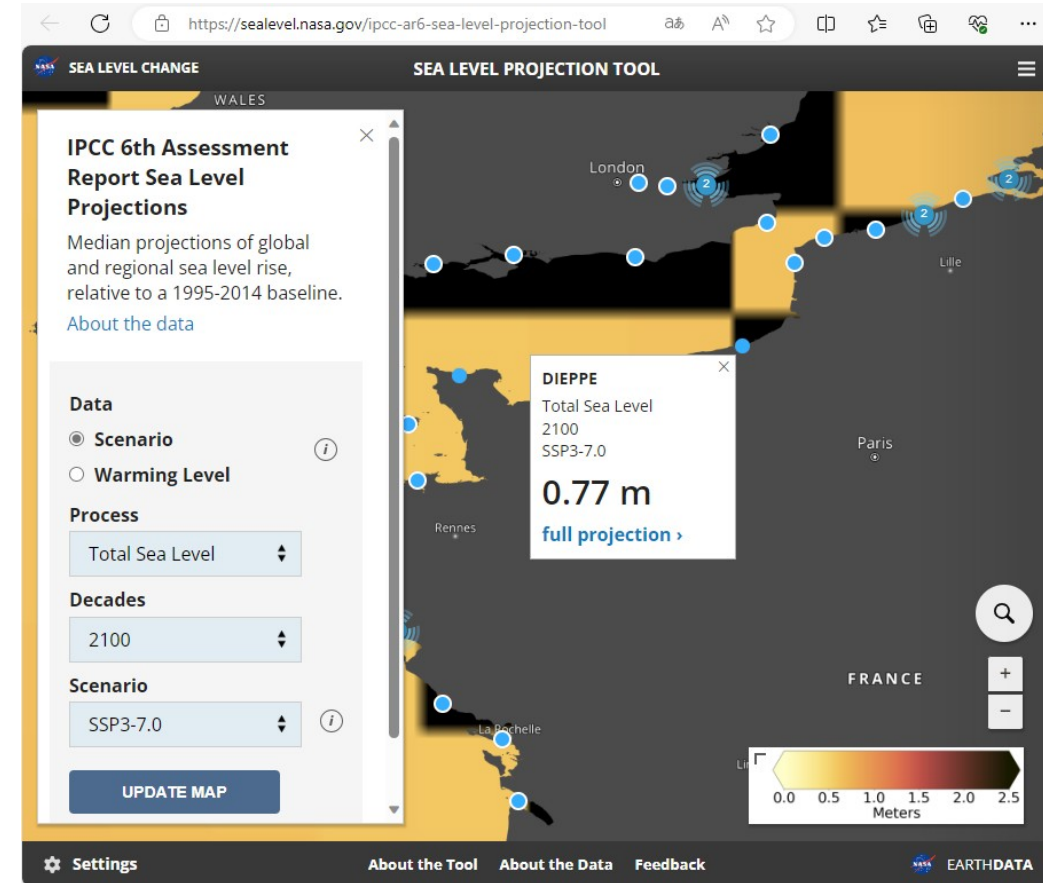
Incertitudes et limites

Incertitudes (2 sigma)

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

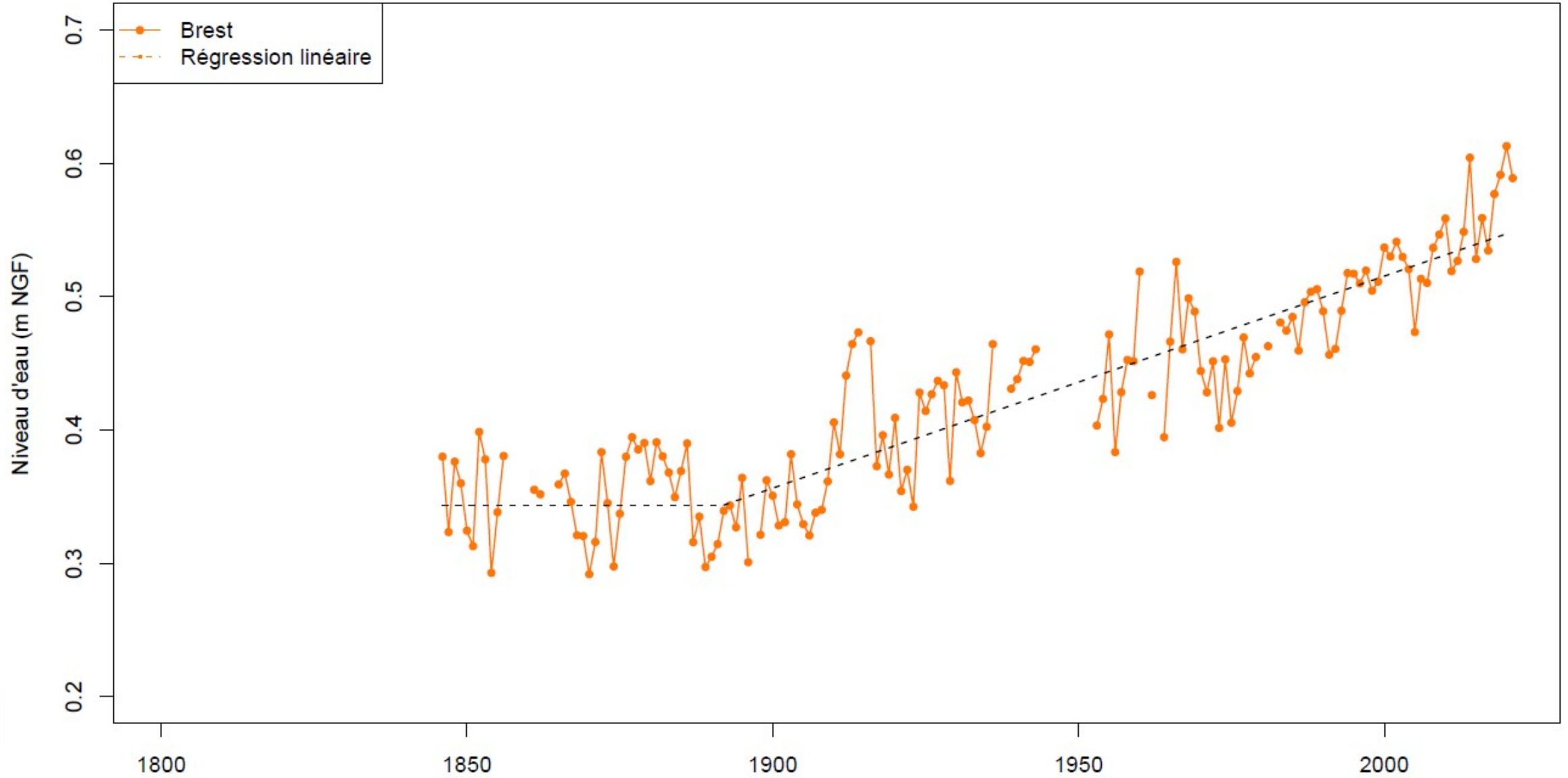
Niveau moyen

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



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

Incertitudes et limites



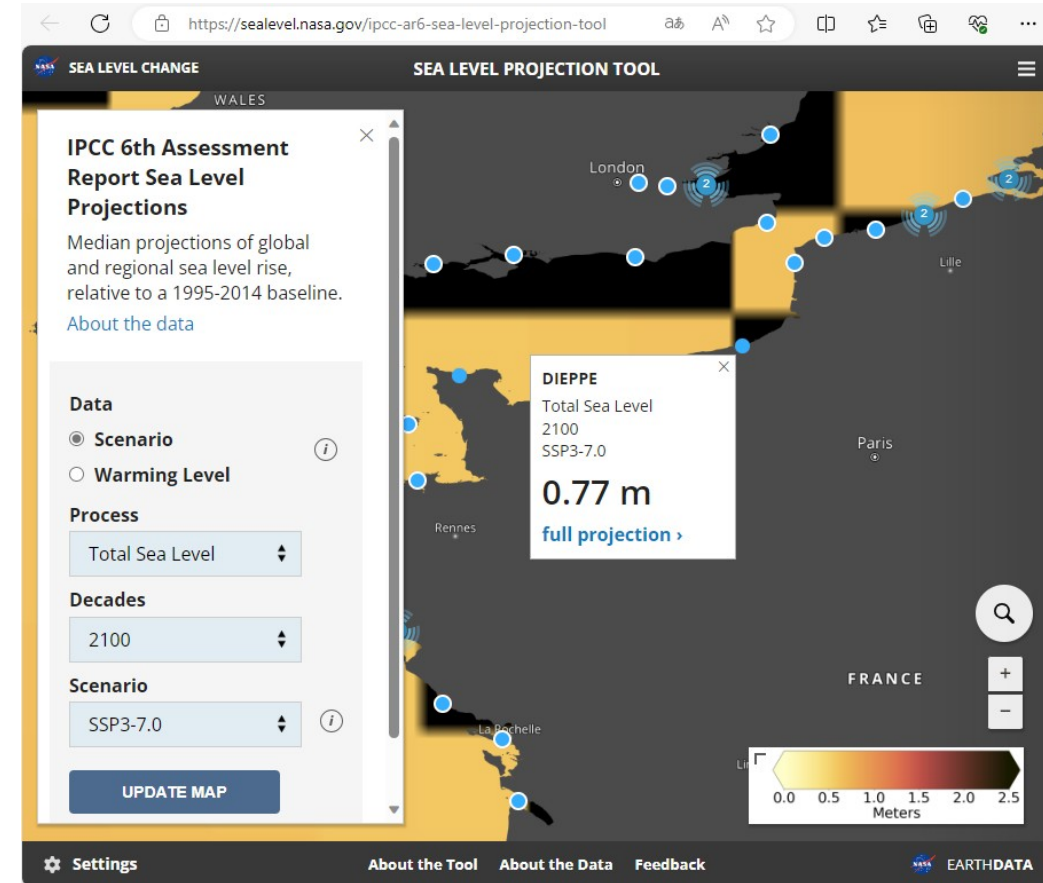
Incertitudes et limites

Incertitudes (2 sigma)

- Prédiction de marée : ± 15 cm aux ports de référence et ± 25 cm entre les ports
- HOMONIM : ± 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



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

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

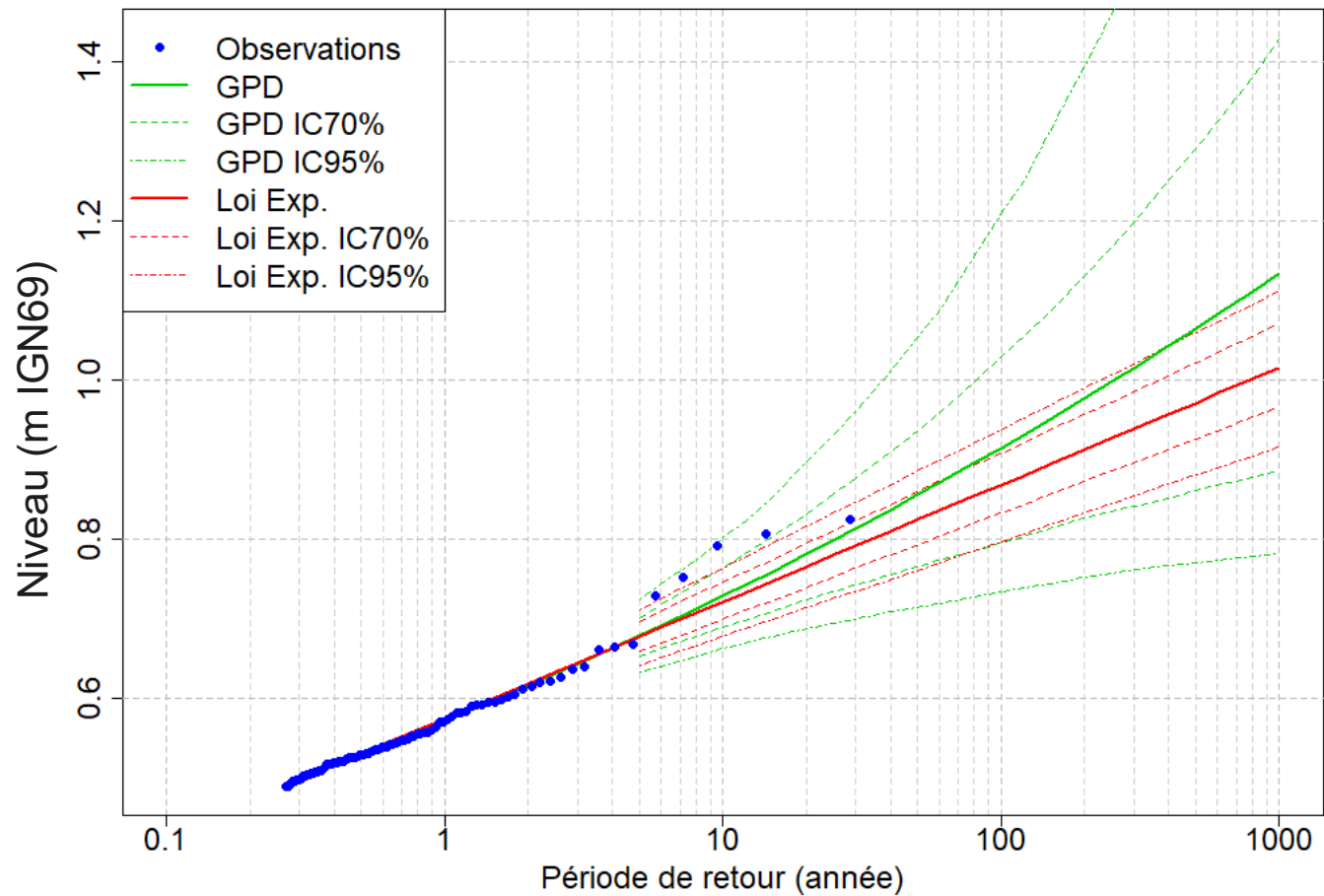
Résultats

Résultats

Aux ports de référence

- Méditerranée : ajustement des niveaux d'eau

Port de Port-Vendres

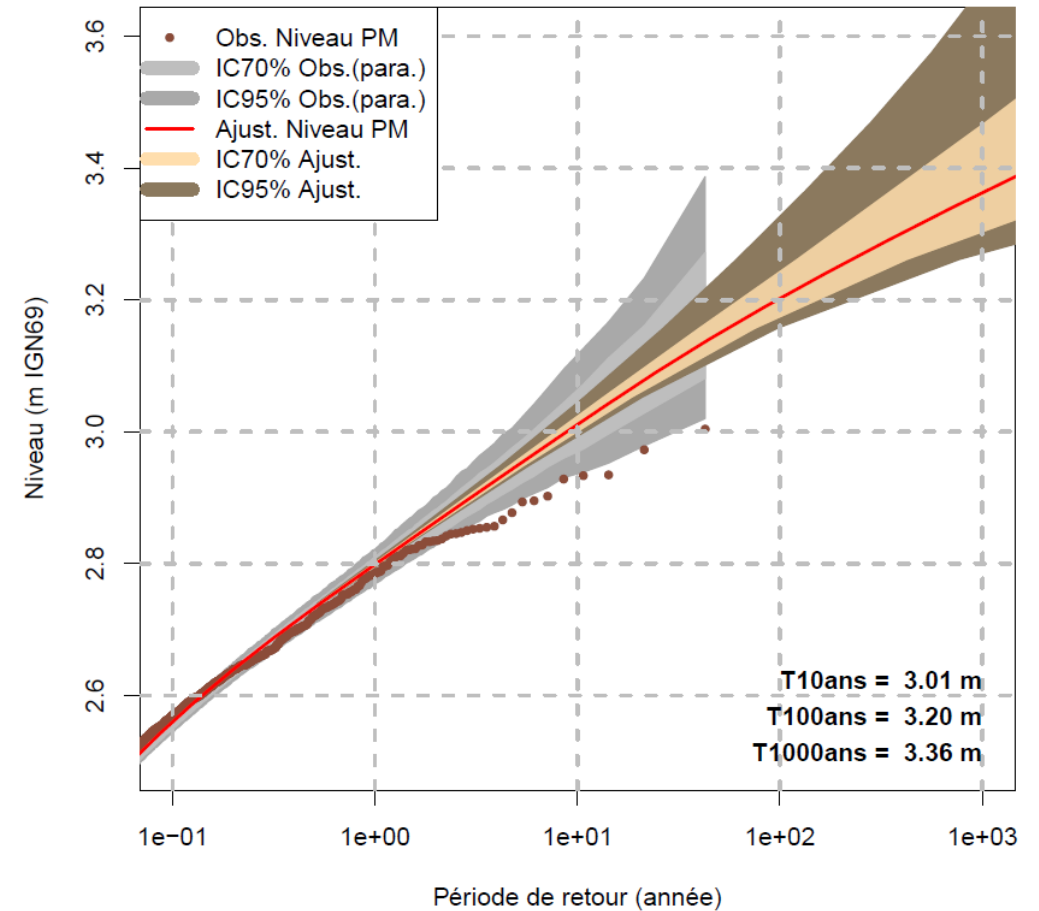
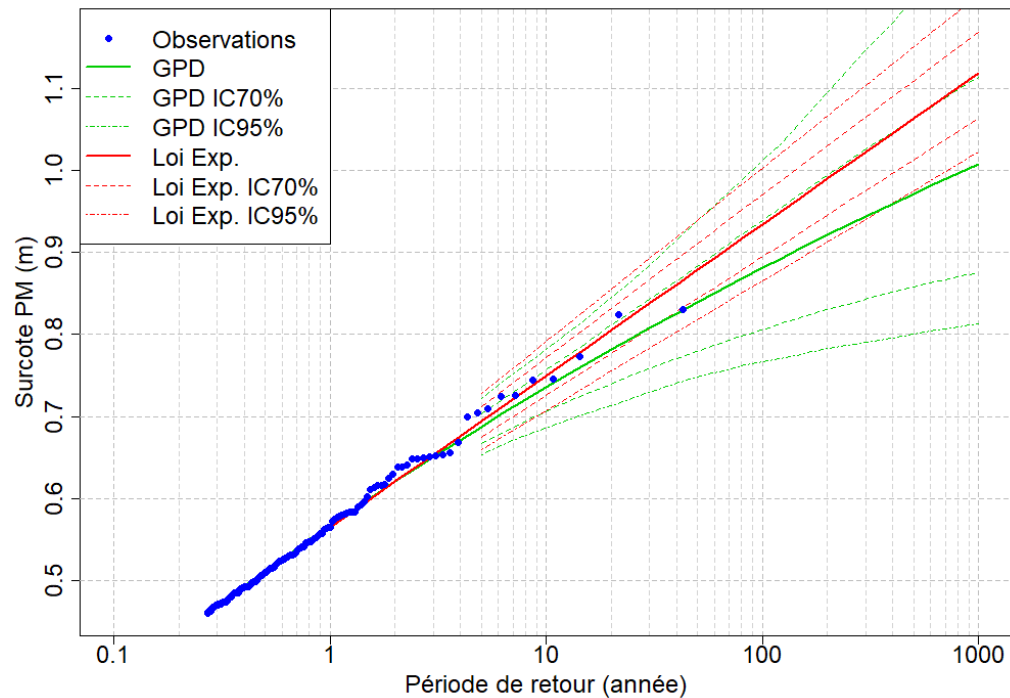


Résultats

Aux ports de référence

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

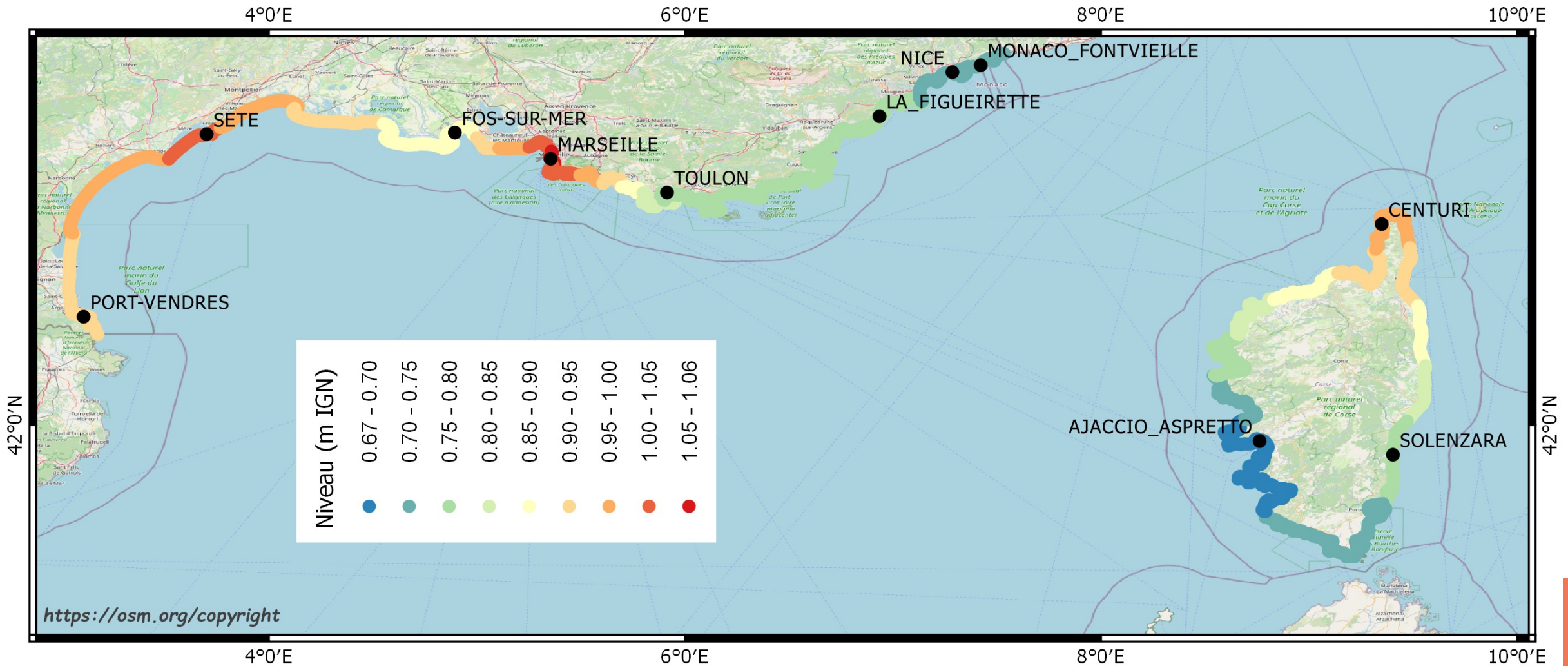
Port de Bayonne



Résultats

Le long du trait de côte

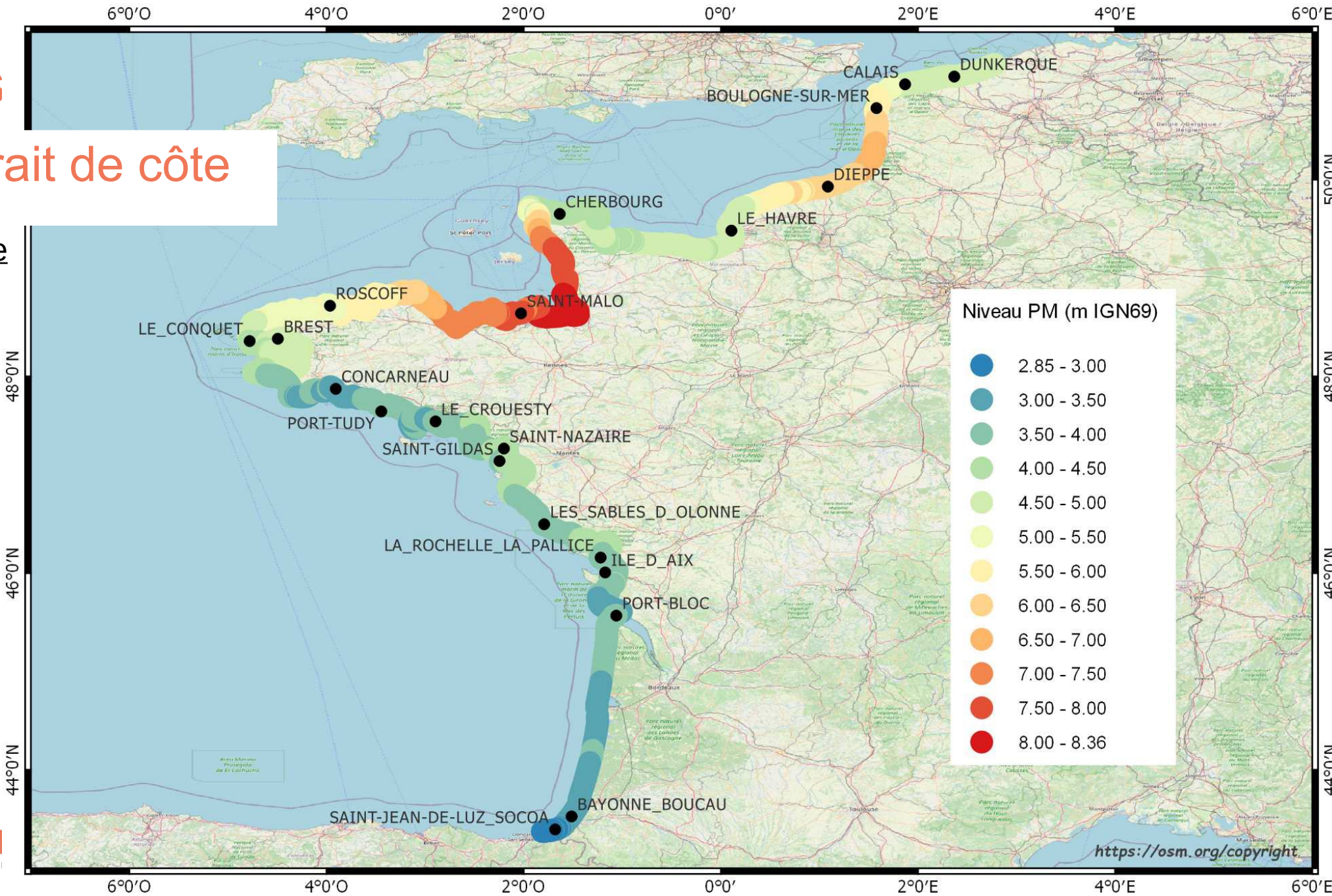
Niveaux de période de retour 100 ans



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

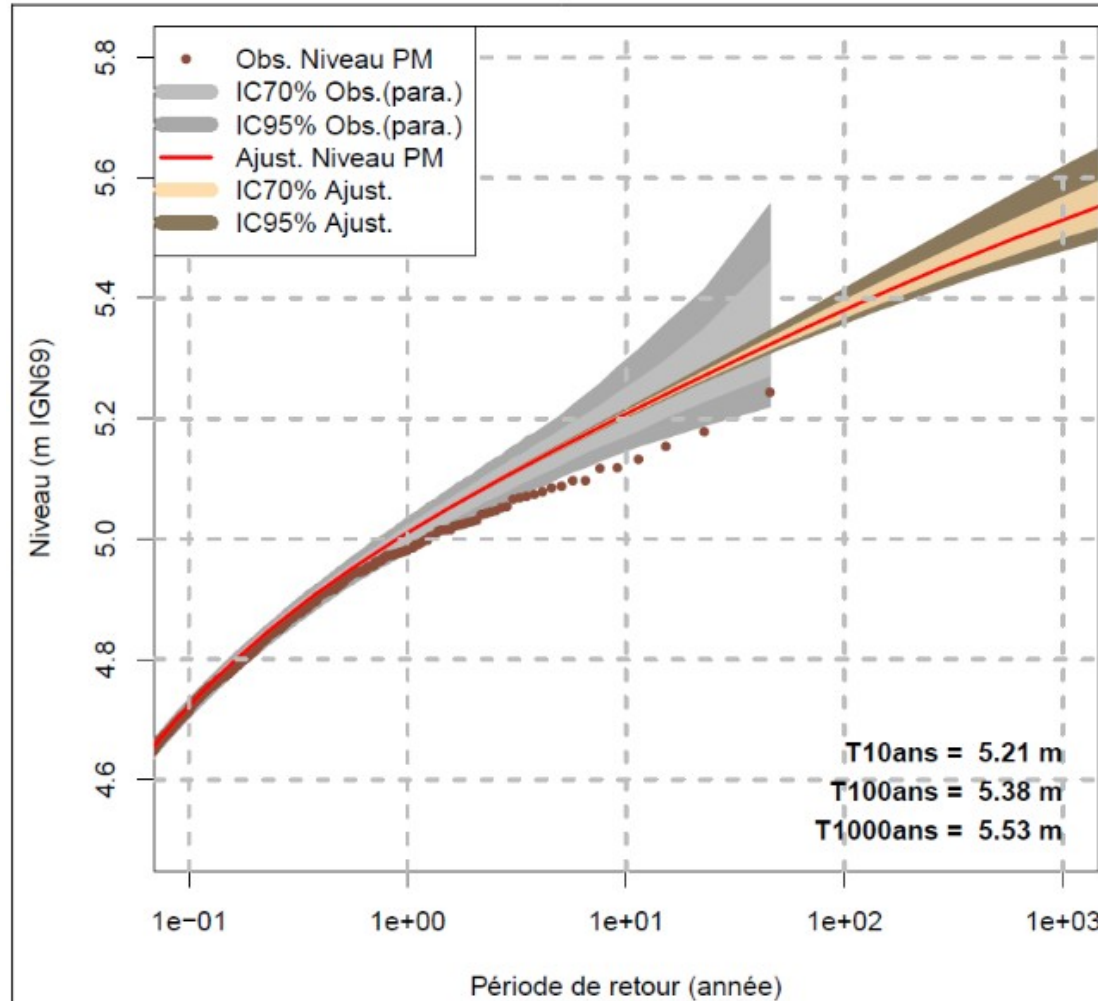
< 15 cm



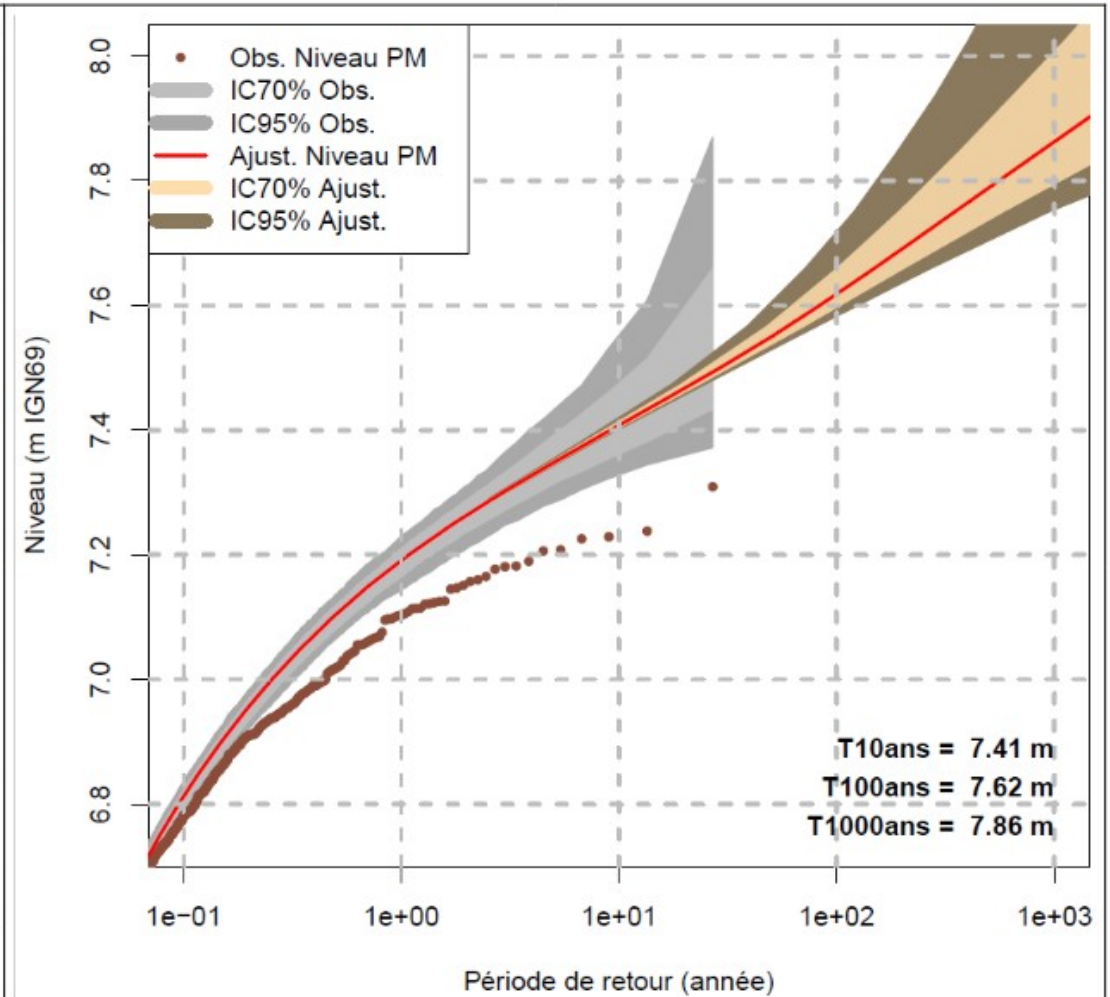
Dépendance marée surcote

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

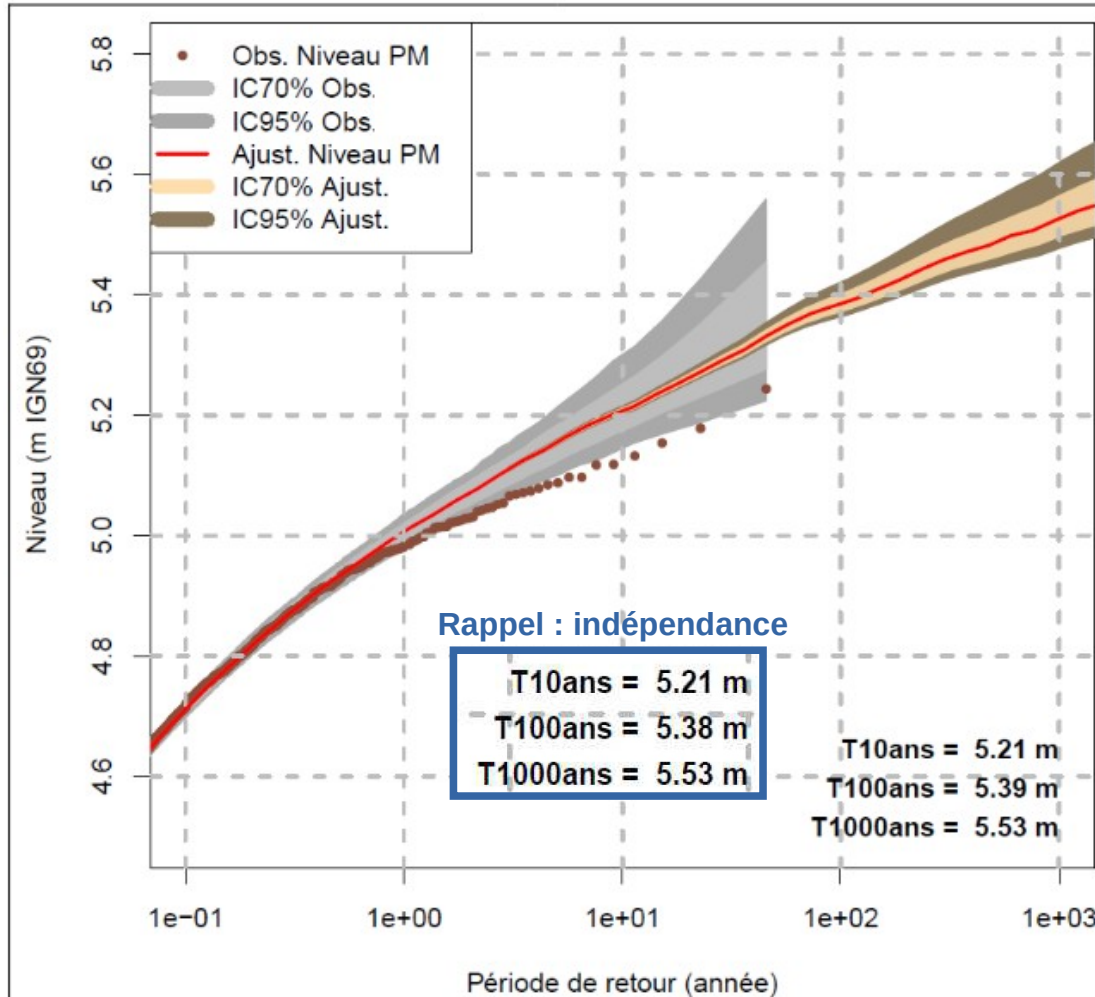
- Sélection de bandes équiprobables de surcote
- Calcul de la distribution empirique de marée par bandes de surcotes

Calcul des périodes de retour de niveaux d'eau

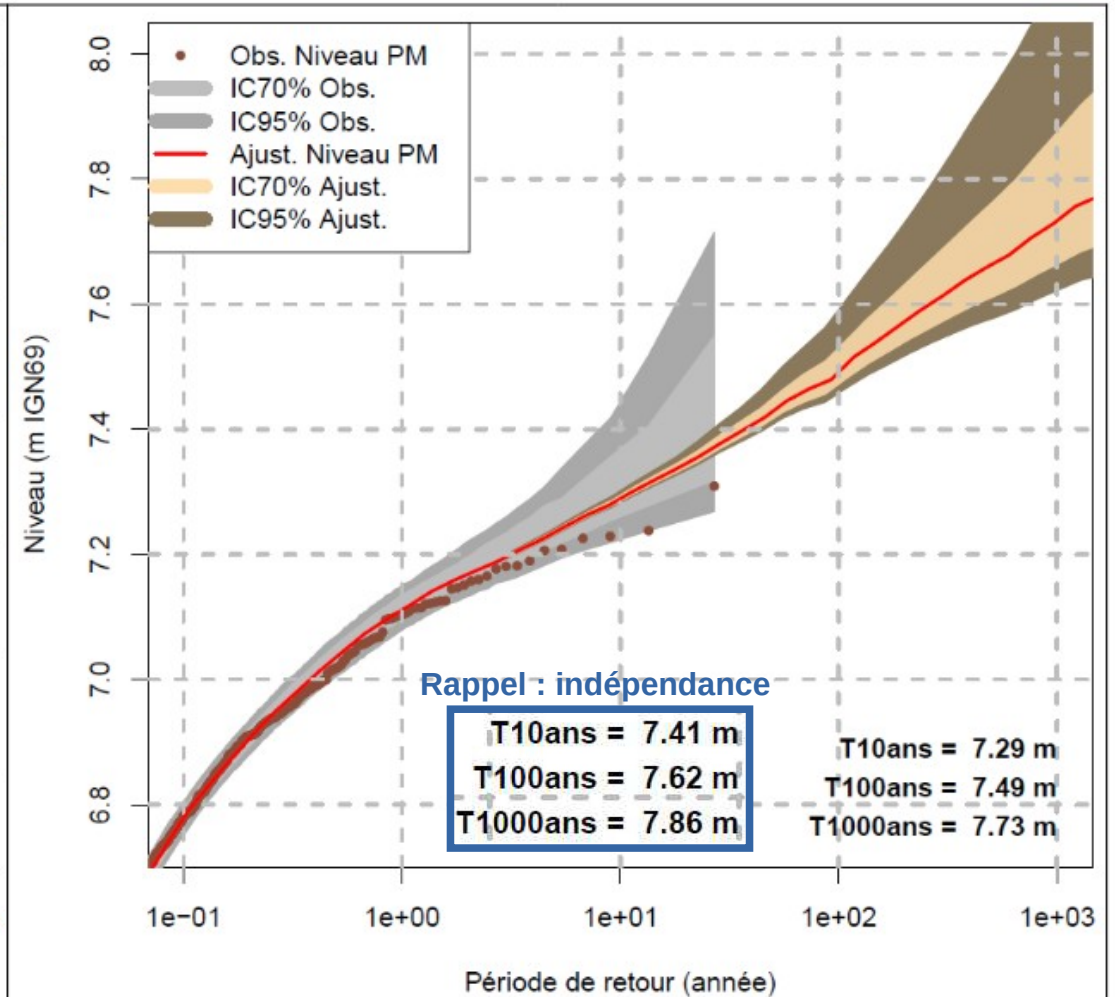
- Simulation de 10^5 années de surcote PM
- Surcote => bande de surcote => distribution de marée
- Tirages aléatoire de 10^5 années de marée PM
- Calcul des niveaux d'eau et analyse empirique des périodes de retour

Dépendance marée surcote PM

2 bandes de surcotes
Exemple de Roscoff et Saint-Malo



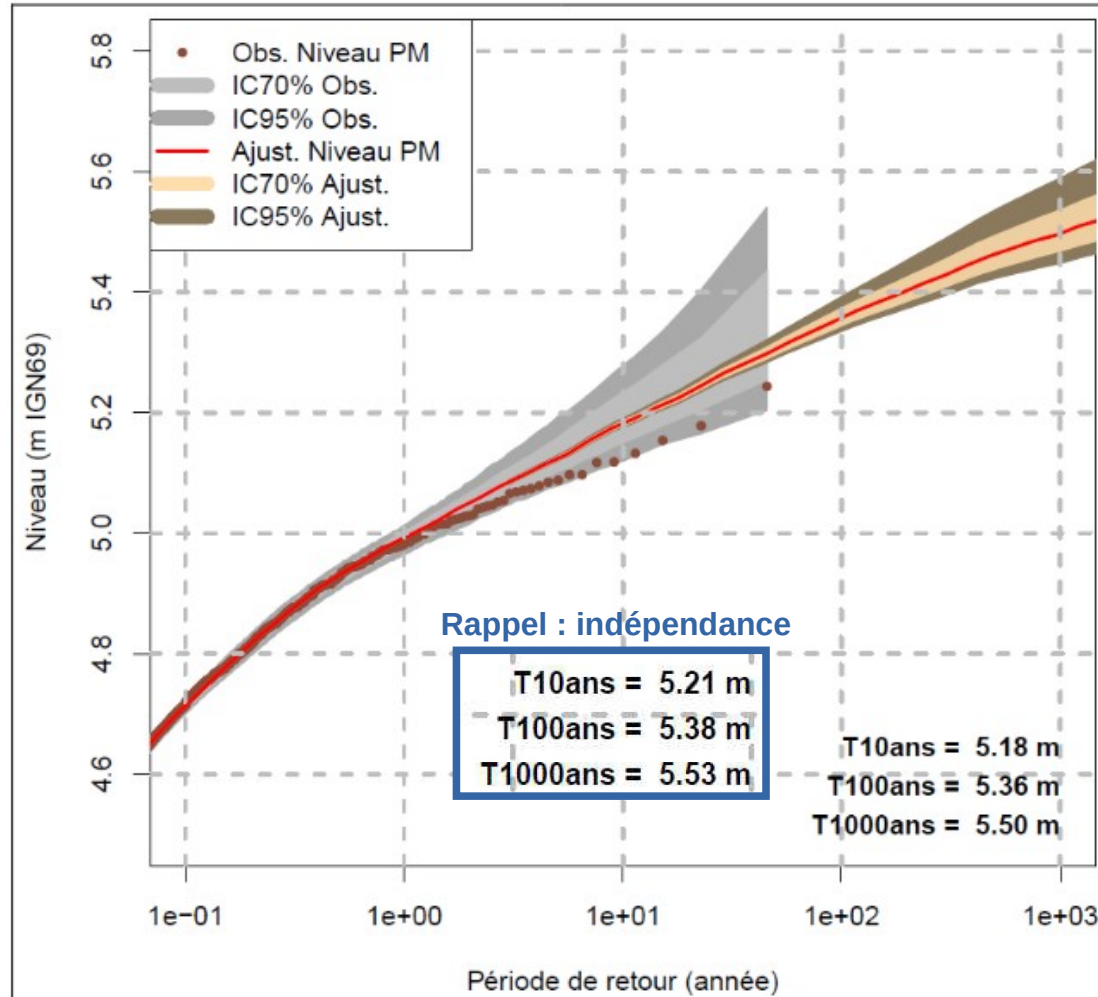
a) Roscoff



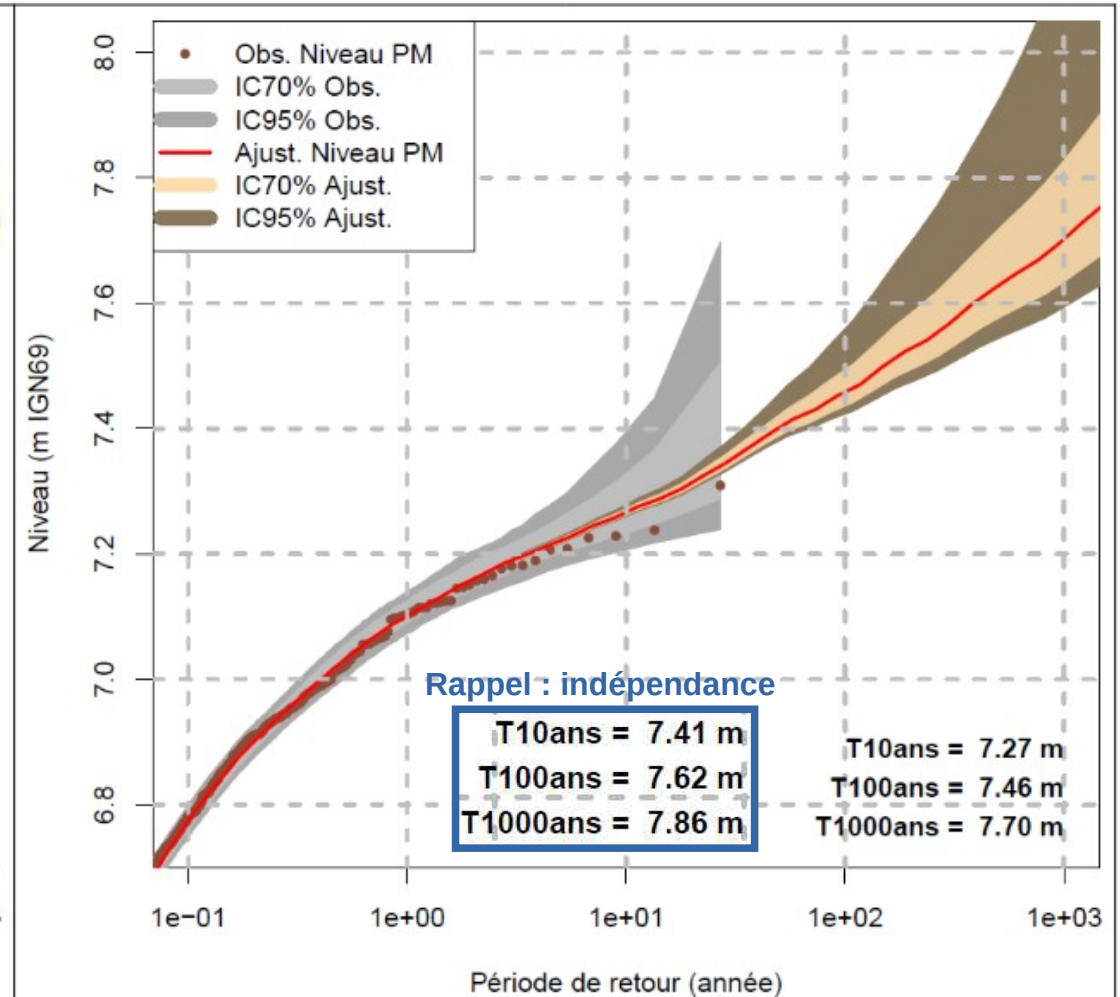
b) Saint-Malo

Dépendance marée surcote PM

3 bandes de surcotes
Exemple de Roscoff et Saint-Malo



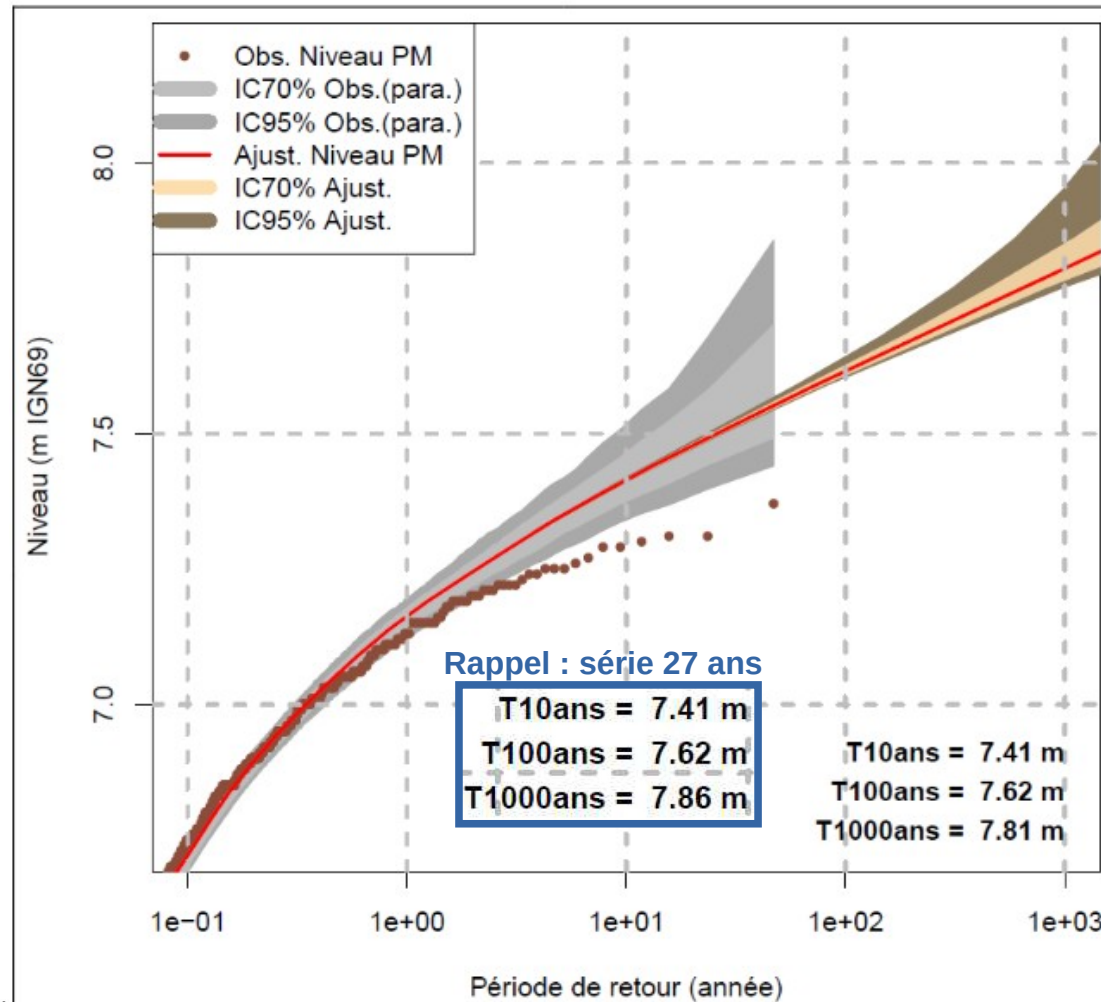
a) Roscoff



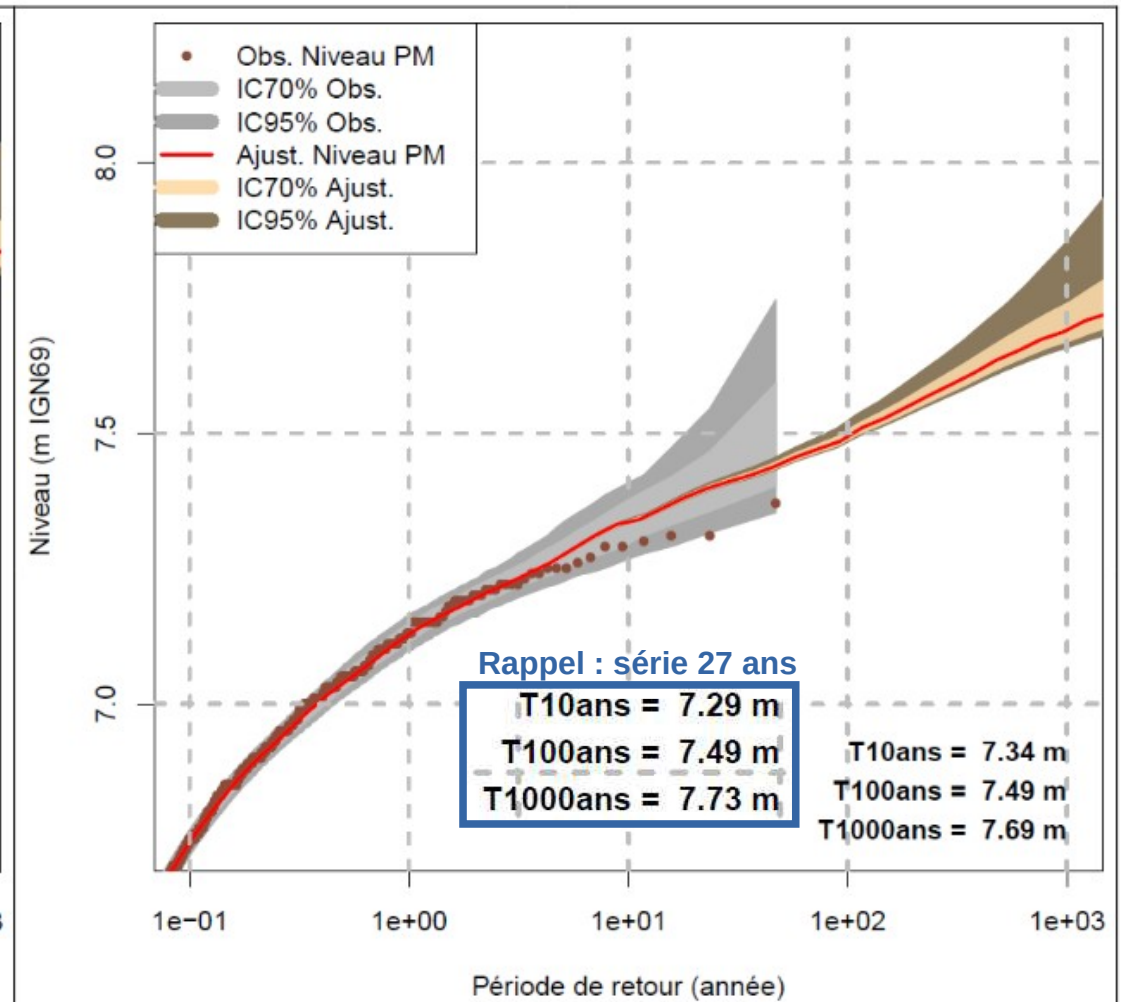
b) Saint-Malo

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

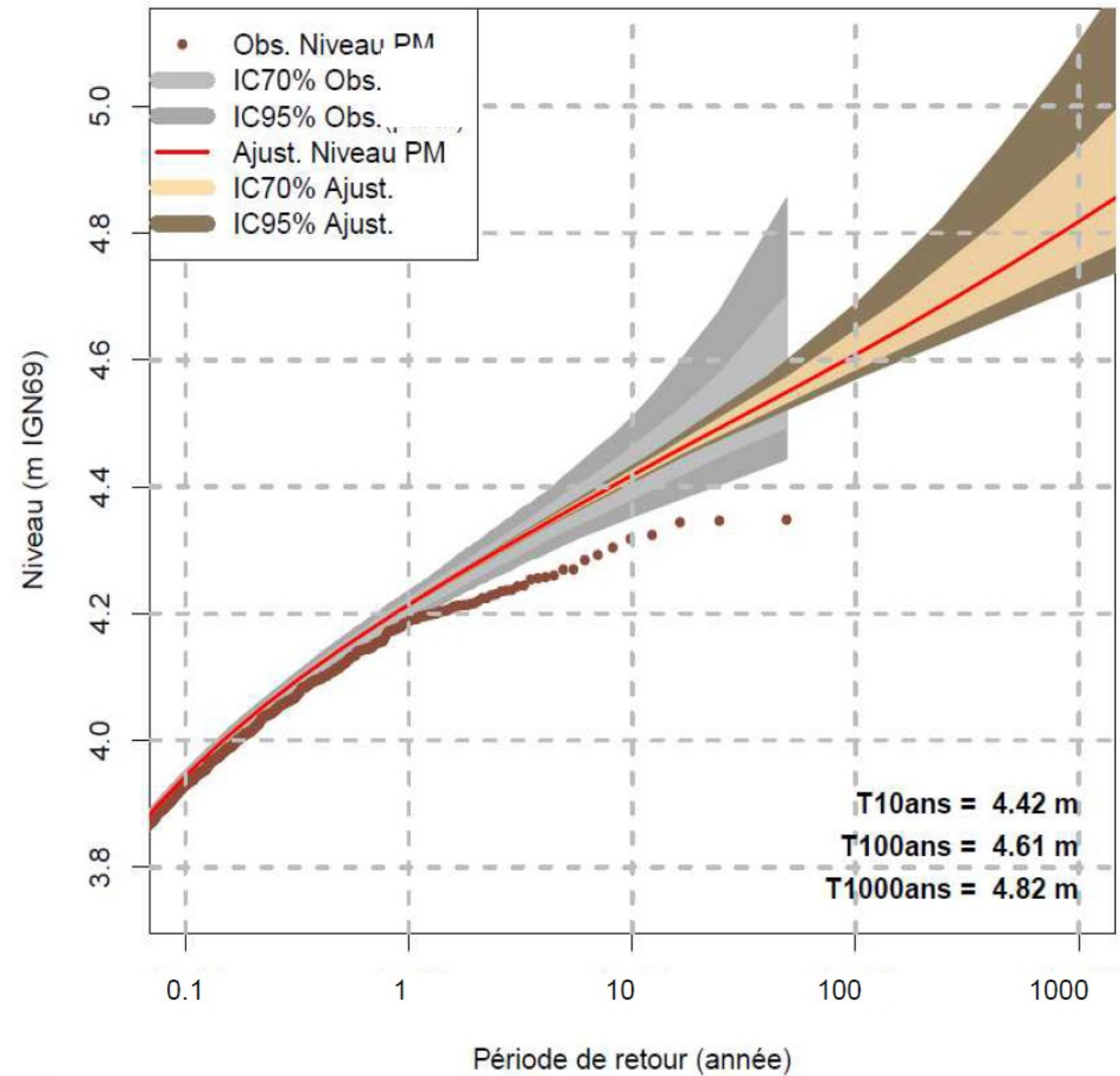
Dépendance marée surcote PM


Le Conquet

Cherbourg, Roscoff, Le Conquet, Bayonne ...

Si pas de dépendance marée / surcote

=> durée d'observation trop courte ?

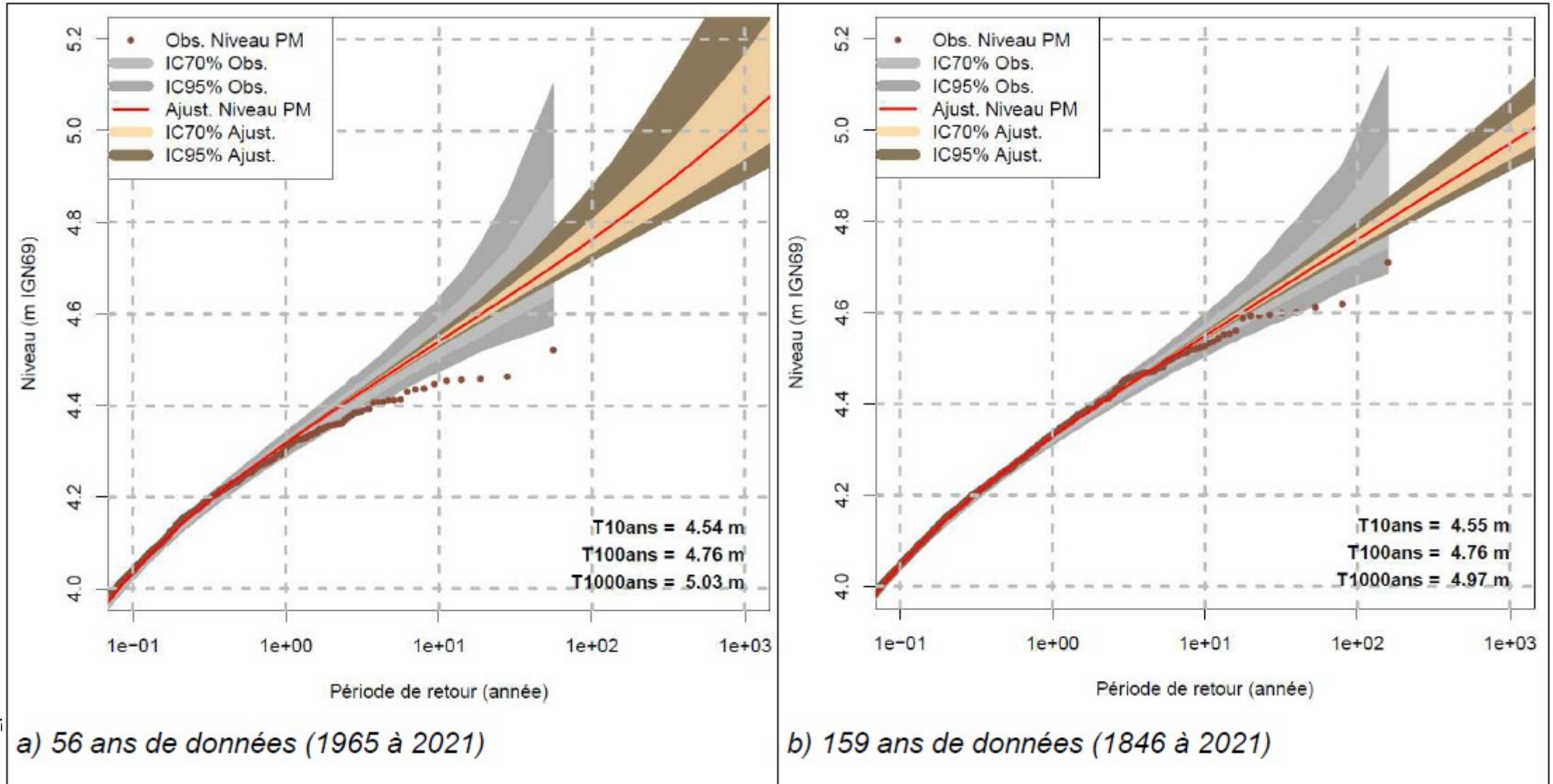




Test de sensibilité sur la durée d'observation

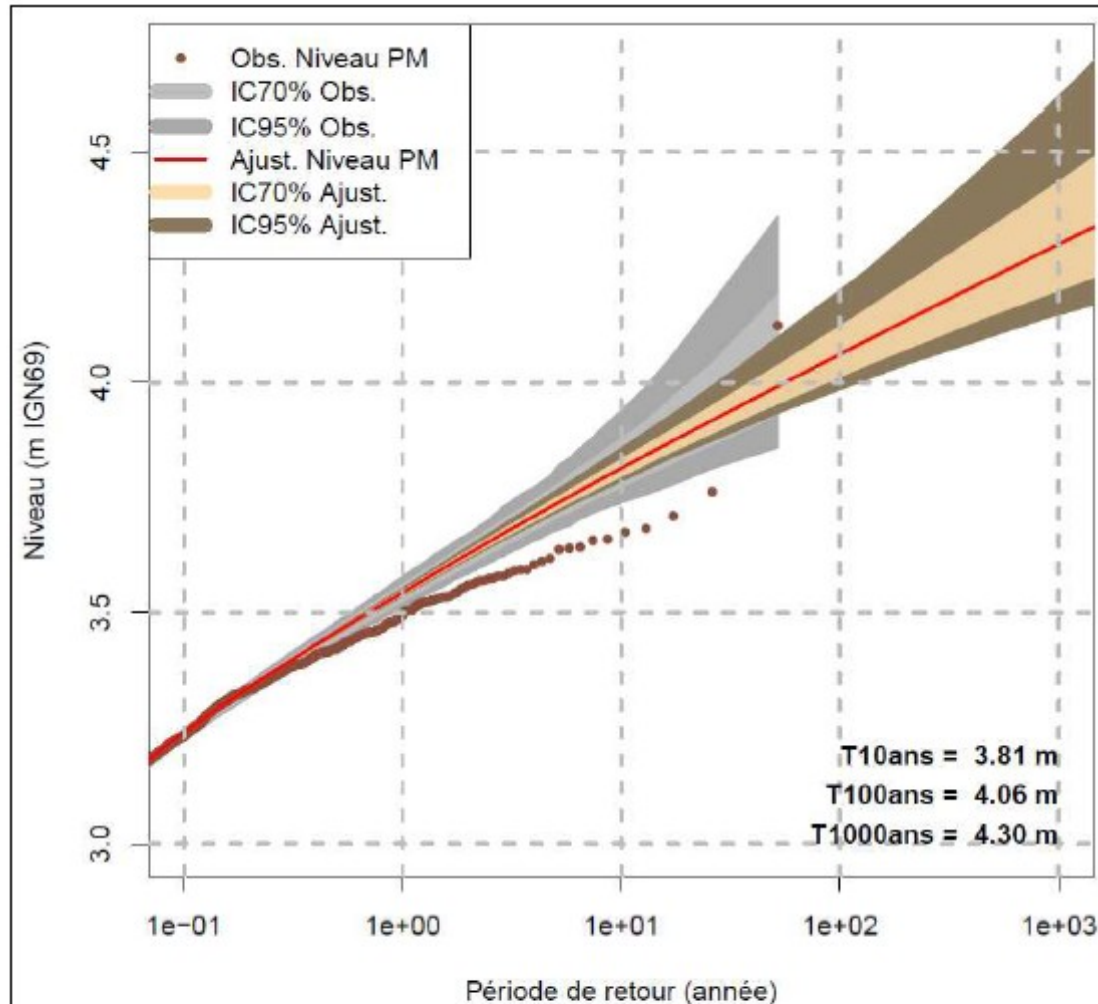
Test de sensibilité sur la durée d'observation

Marégraphe de Brest

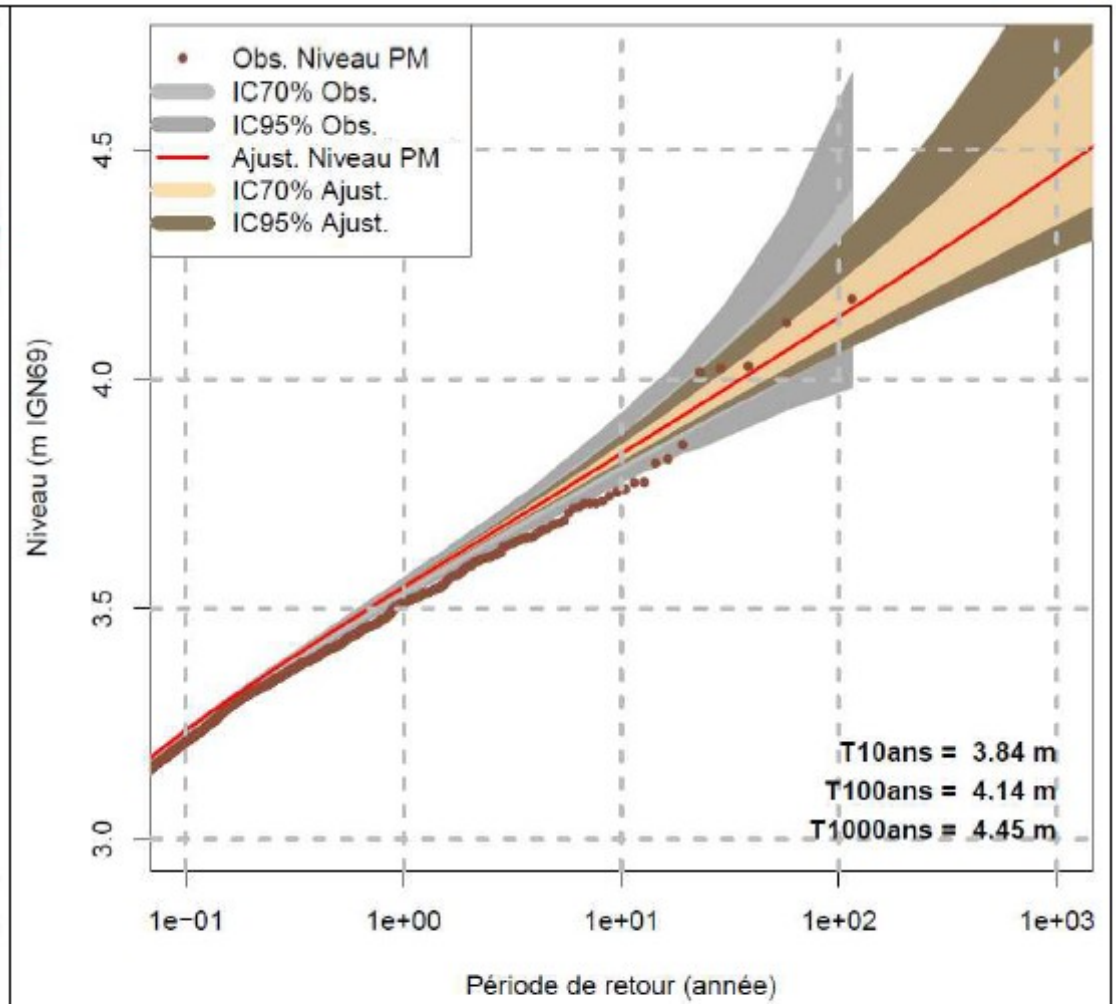


Test de sensibilité sur la durée d'observation

Marégraphe de Saint-Nazaire



a) 52 ans de données (1965 à 2021)

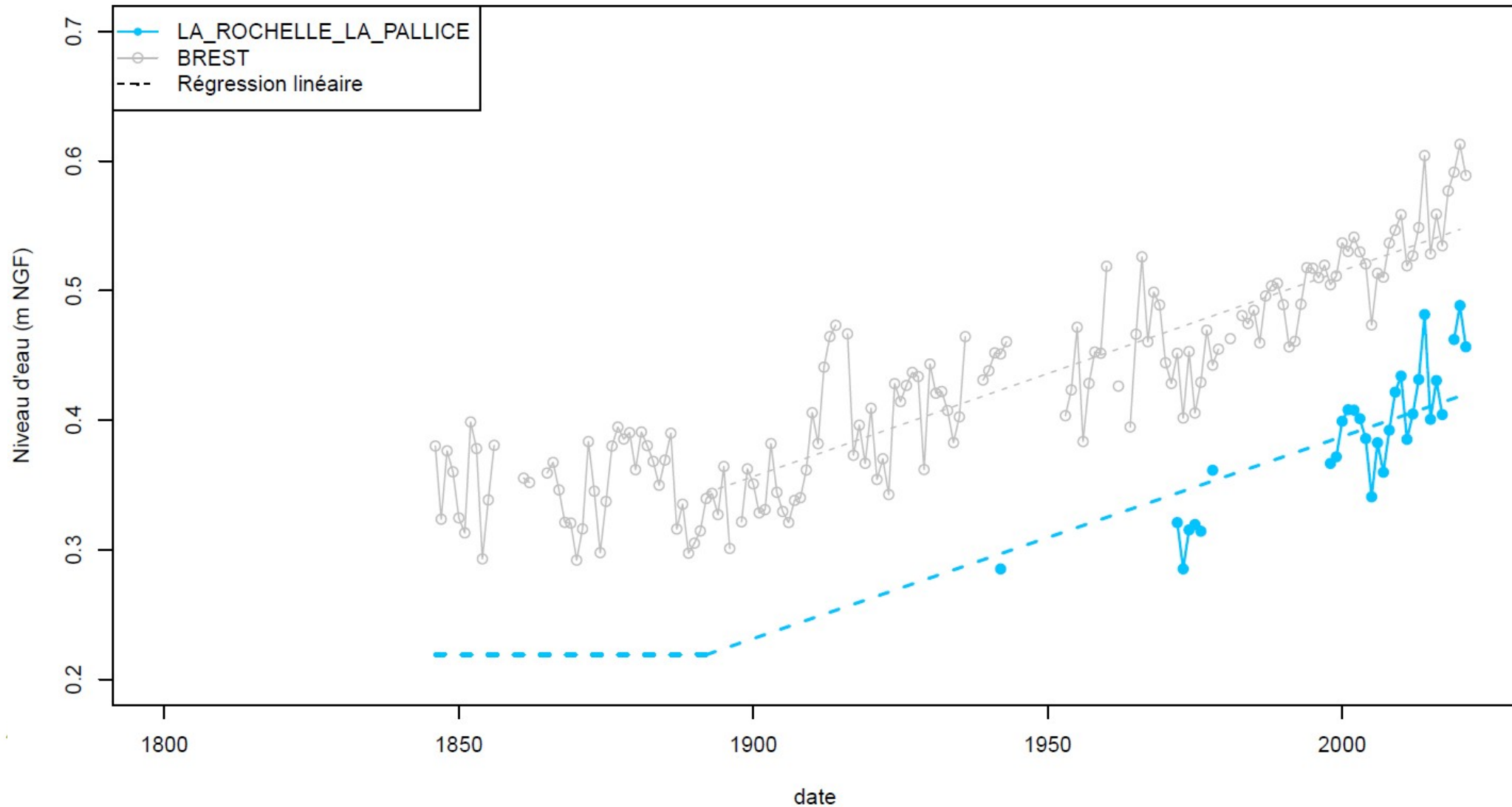


b) 155 ans de données (1863 à 2021)

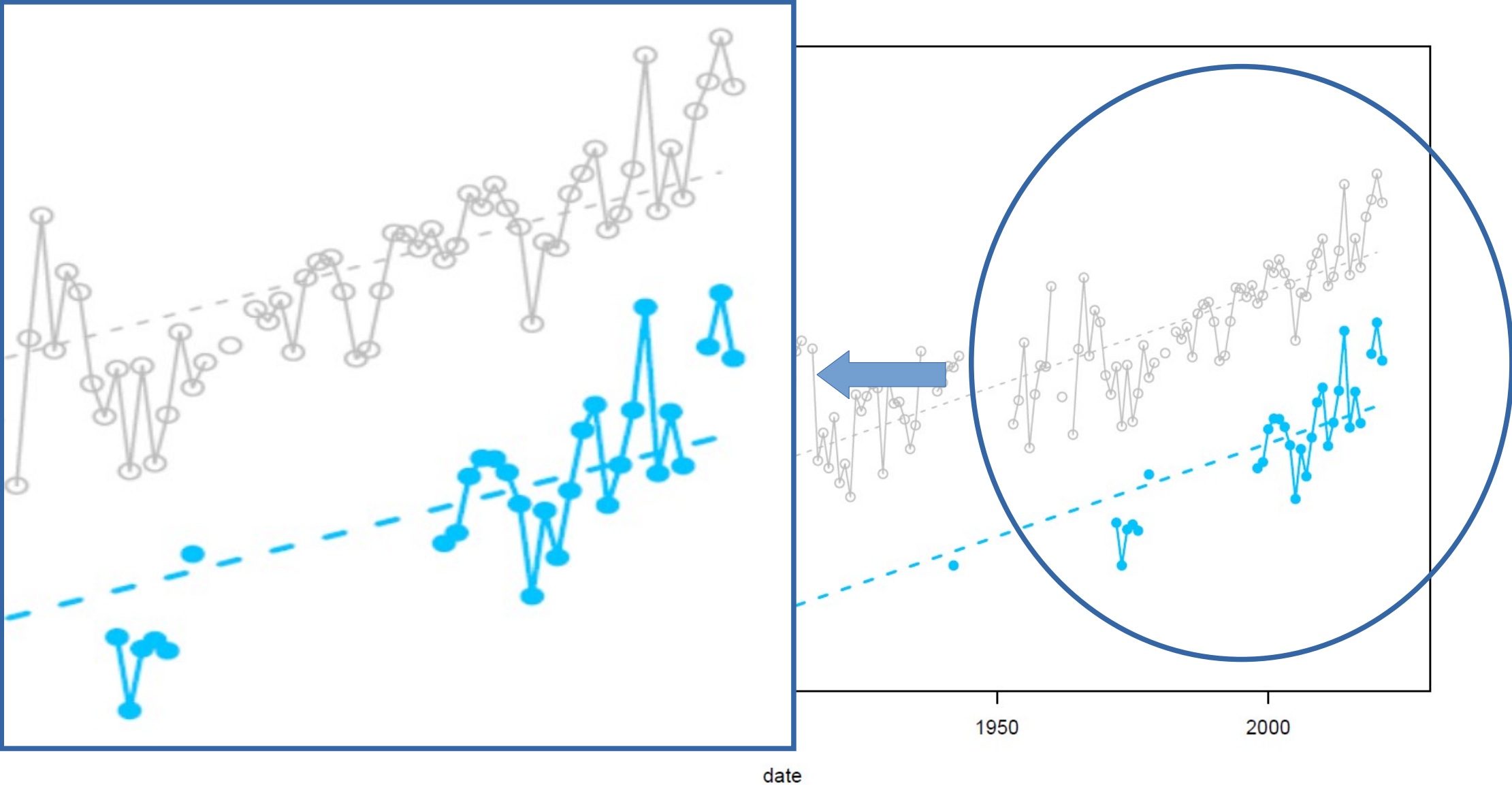


Estimation des variations pluriannuelles

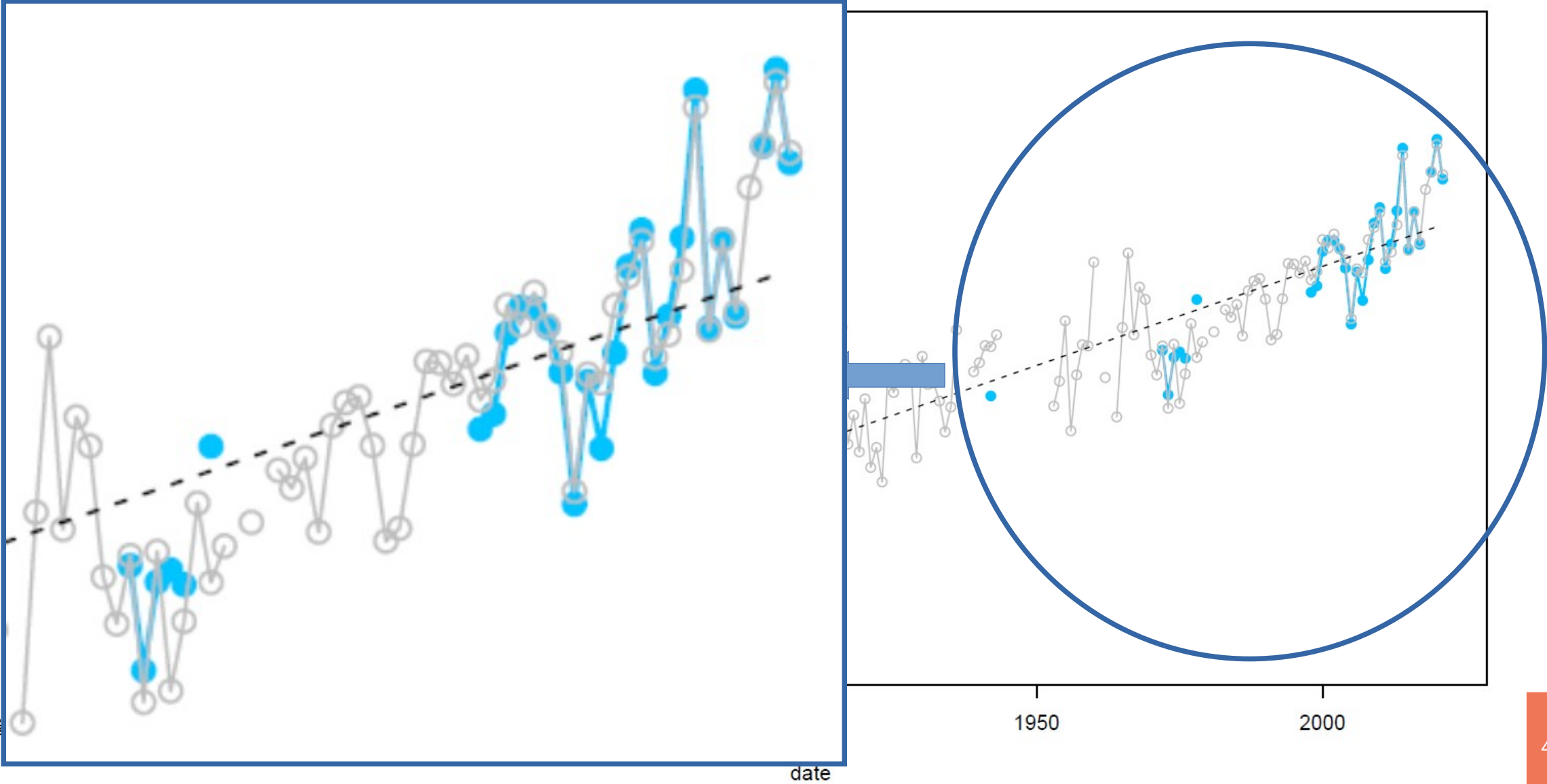
Estimation des variations pluriannuelles



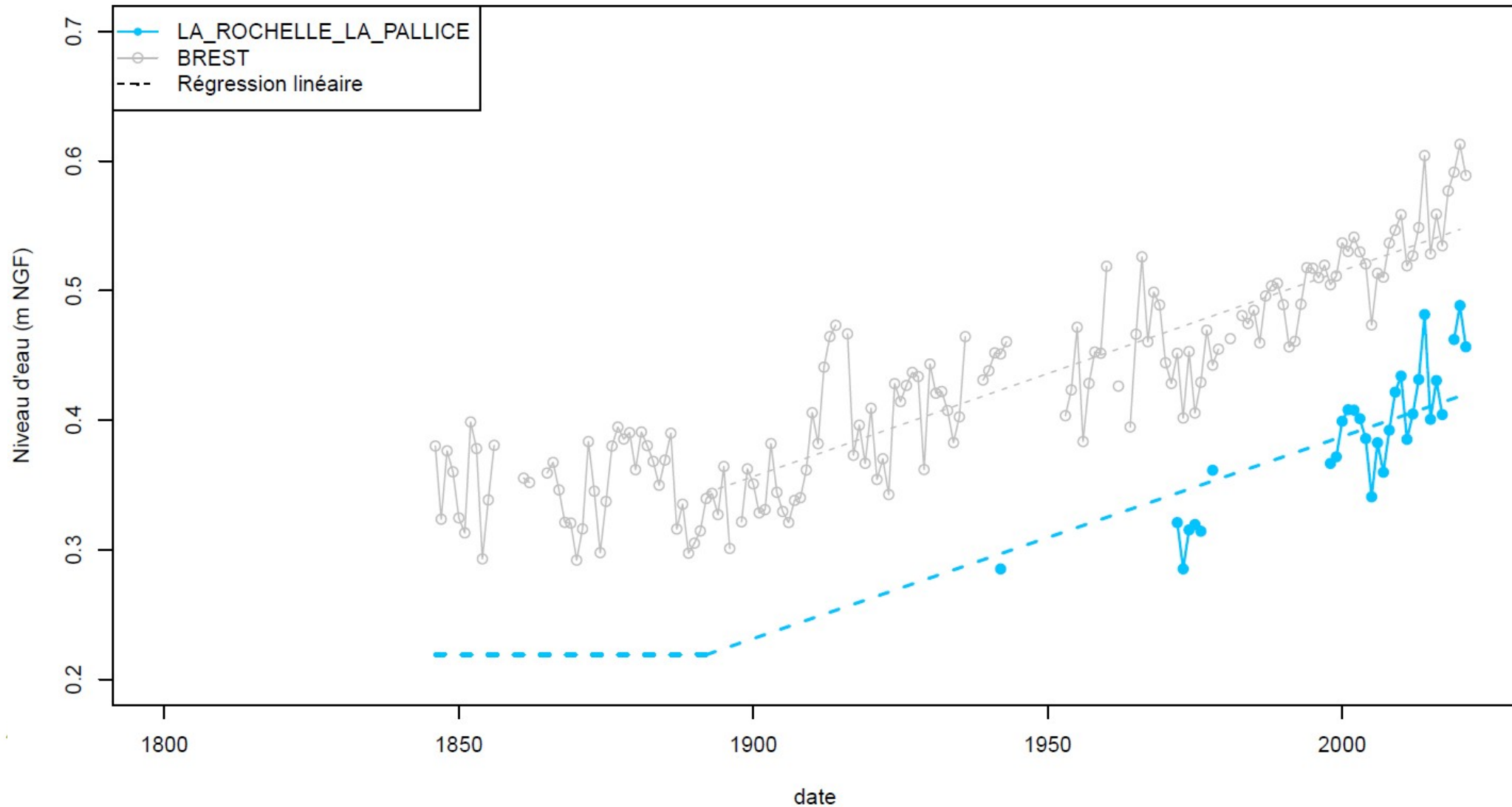
Estimation des variations pluriannuelles



Estimation des variations pluriannuelles

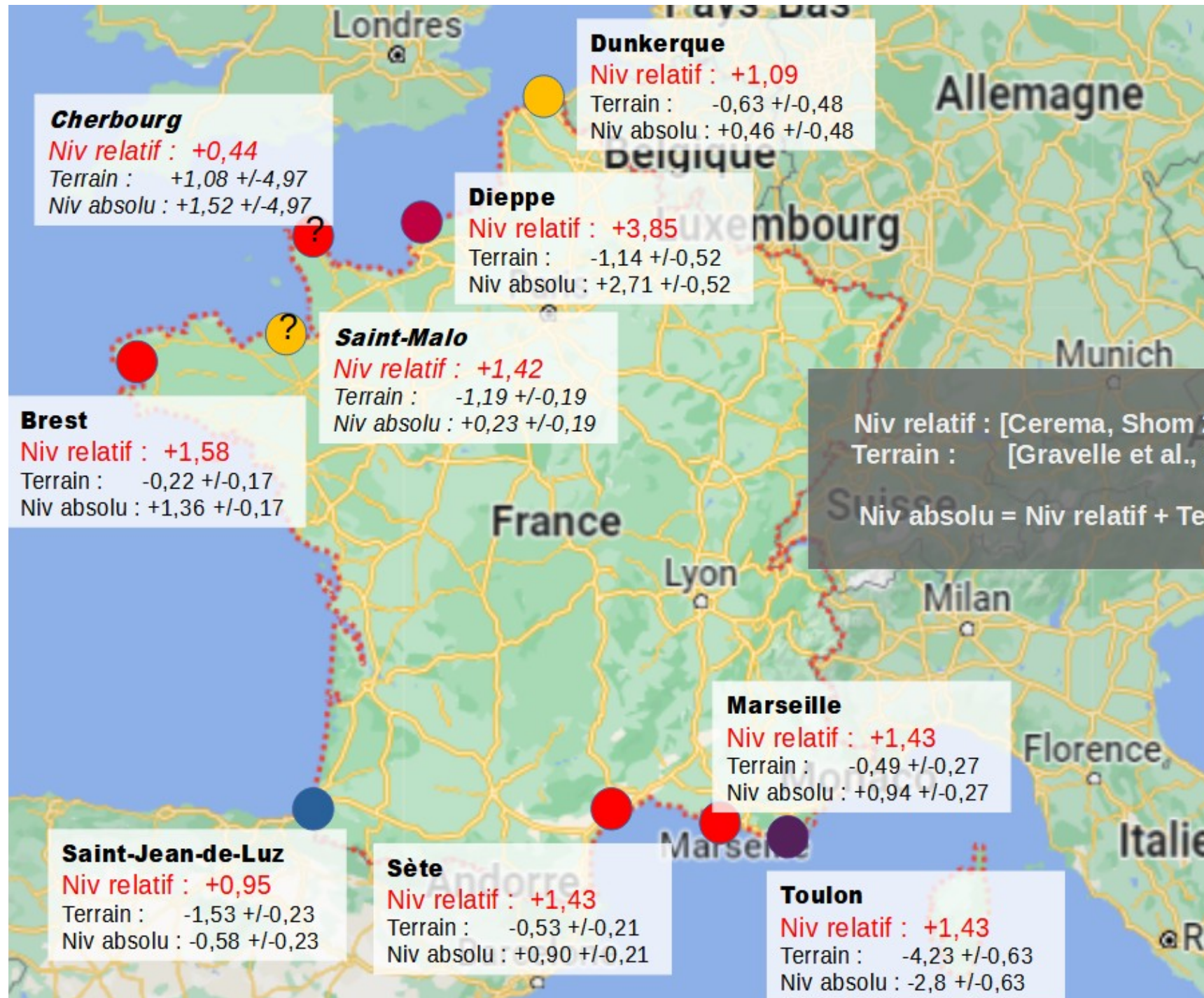


Estimation des variations pluriannuelles



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 ± 15 cm (Ports) ou ± 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

