MINISTÈRES
TRANSITION ÉCOLOGIQUE
AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE
TRANSPORTS
VILLE ET LOGEMENT
Liberté
Égalité
Fraternité

SHOM

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

SHOM
L'océan en référence

Cerema
CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

Utilisation des valeurs Extrêmes statistiques de Niveau d'eau

NIVEXT 2022

Gaël André (Shom), Xavier Kergadallan (Cerema), Julie Cheynel (Shom)

PARTENAIRE SCIENCE COMES TO TOWN
Financé par l'Union européenne

MARINE NATIONALE 400 ANS

Contexte et objectifs

Ministère de la Transition Écologique / Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR)

• Besoin de niveaux de référence pour la gestion des risques de submersion marine (T10ans, T100ans et T1000ans)

Des partenariats

• Partenariat Shom / Cerema

• GT TSH / Statistiques des Extrêmes (ASNR, EDF, Shom, BRGM, Artelia, 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

• Mise à jour de la méthode d'interpolation

• Estimations jusqu'à la période de retour 1000 ans et calcul des intervalles de confiance



Méthodologie

Données utilisées

Observations marégraphiques

- 33 ports de référence (période d'observation > 10 ans)
- Données horaires validées (Refmar, data.shom.fr)

Prédictions de marée (logiciel MAS du Shom)

- Modèle de marée cstFRANCE (Shom)

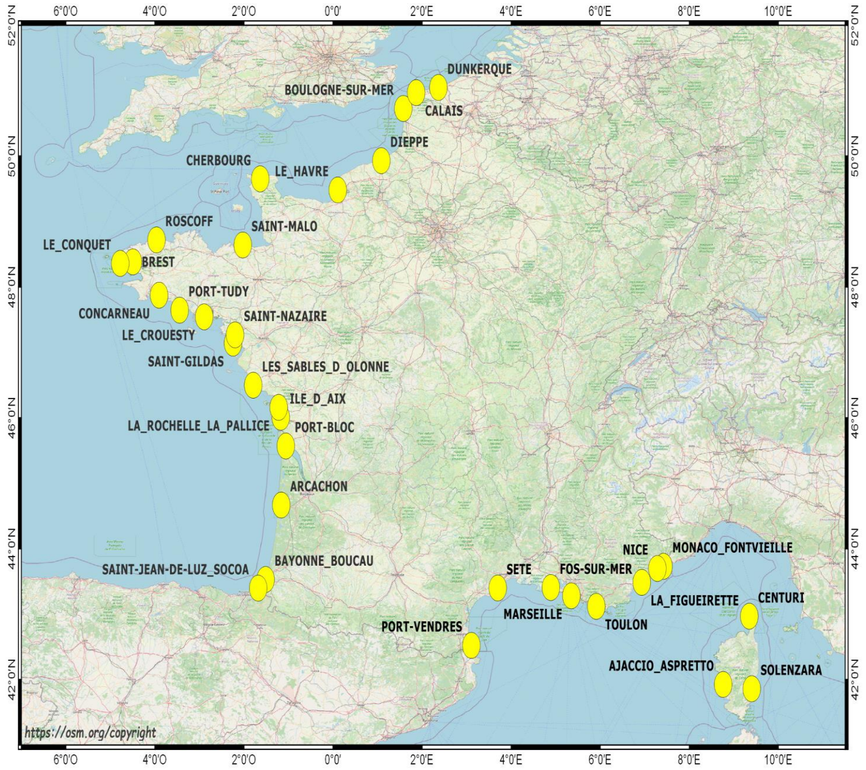
Référencement vertical ZH/IGN

- RAM 2020 (Shom)
- BathyElli V2.0 (Shom)
- RAF18 (IGN)

Simulation de surcote HOMONIM (Shom et Météo-France)

Vigilance Vagues-Submersions (VVS)

- Modèle HYCOM, configuration ATL V4 et MED V3, forçages météorologiques Arpège (MF)
- 4 ans (2010-2014)



MINISTÈRES
TRANSITION ÉCOLOGIQUE
AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE
TRANSPORTS
VILLE ET LOGEMENT
Liberté
Égalité
Fraternité

SHOM

Méthodologie

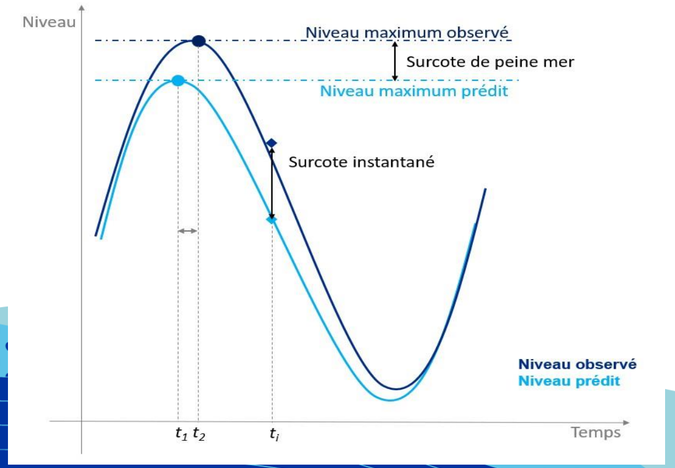
Analyse aux ports de référence

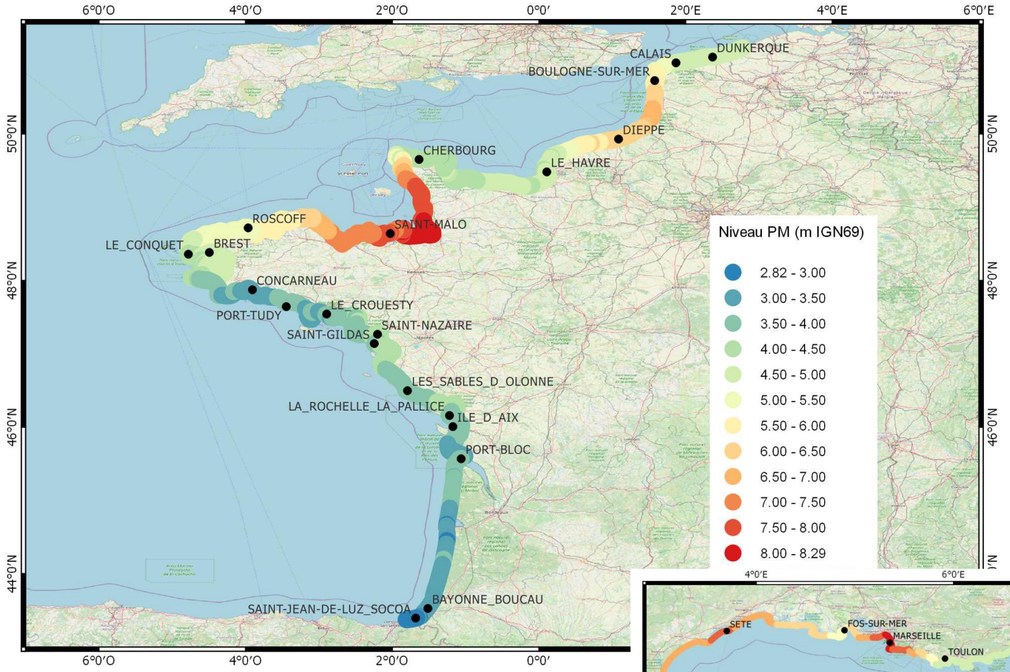
Théorie de valeurs extrêmes

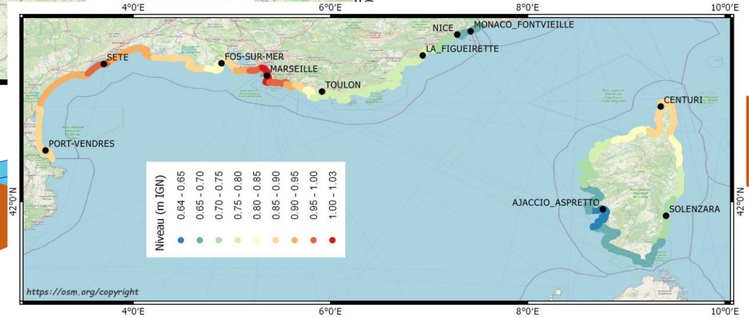
En Manche-Atlantique : fort marnage => convolution marée surcote PM

En Méditerranée : faible marnage => approche directe

- Niveau de pleine mer (PM) => calculé par interpolation des données horaires par spline-cubique
- Surcote de pleine mer (SPM) => permet de s'affranchir des éventuels problèmes de déphasage entre les niveaux observés et prédits







Niveaux d'eau de période de retour 50 ans

MINISTÈRES
TRANSITION ÉCOLOGIQUE
AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE
TRANSPORTS
VILLE ET LOGEMENT
Liberté
Égalité
Fraternité

SHOM

Méthodologie

Analyse aux ports de référence

Théorie de valeurs extrêmes

En Méditerranée : faible marnage => approche directe

Distribution des niveaux PM

Sélection des pics de tempête

- Méthode « Peaks Over Threshold » (POT)
- Critère de séparation ± 24h

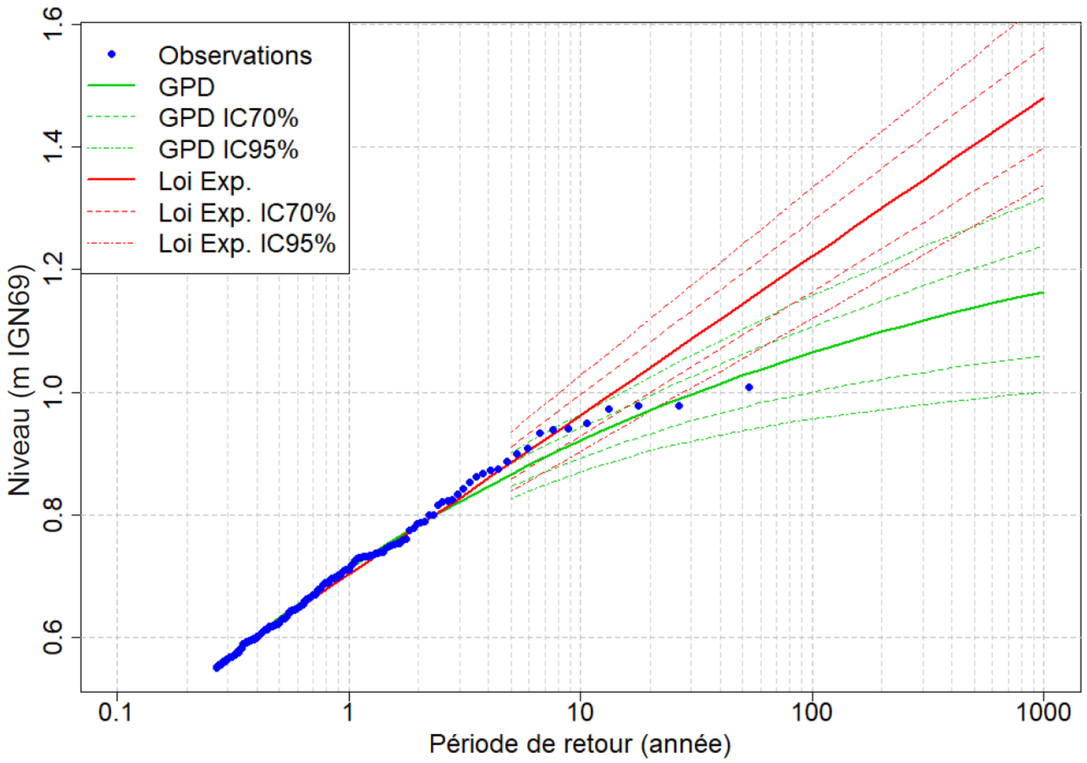
Ajustement statistique des valeurs extrêmes

2 lois d'ajustement :

- Distribution de Pareto (Generalized Pareto Distribution, GPD)
- Loi exponentielle

=> Estimation des périodes de retour des valeurs extrêmes des niveaux de PM

Marseille



Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0.87 m	0.84 m à 0.88 m	0.83 m à 0.90 m	0.88 m	0.86 m à 0.91 m	0.84 m à 0.94 m
10 ans	0.92 m	0.89 m à 0.94 m	0.87 m à 0.96 m	0.96 m	0.93 m à 1.00 m	0.91 m à 1.03 m
20 ans	0.97 m	0.93 m à 1.00 m	0.91 m à 1.03 m	1.04 m	1.00 m à 1.08 m	0.98 m à 1.12 m
50 ans	1.03 m	0.98 m à 1.07 m	0.94 m à 1.10 m	1.14 m	1.10 m à 1.19 m	1.06 m à 1.24 m
100 ans	1.06 m	1.00 m à 1.11 m	0.96 m à 1.16 m	1.22 m	1.17 m à 1.28 m	1.13 m à 1.33 m
200 ans	1.10 m	1.03 m à 1.16 m	0.97 m à 1.21 m	1.30 m	1.24 m à 1.36 m	1.20 m à 1.43 m
500 ans	1.14 m	1.05 m à 1.21 m	0.99 m à 1.28 m	1.40 m	1.34 m à 1.48 m	1.29 m à 1.55 m
1 000 ans	1.16 m	1.07 m à 1.24 m	1.00 m à 1.34 m	1.48 m	1.41 m à 1.56 m	1.35 m à 1.64 m

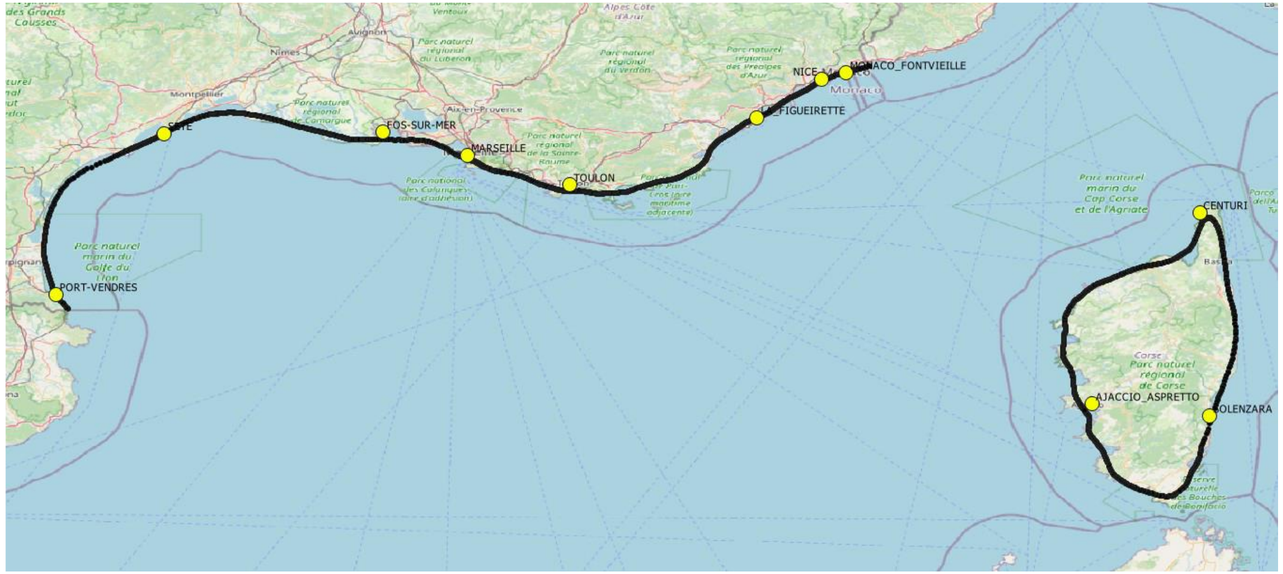
Tableau 75 : Marseille – Périodes de retour des valeurs extrêmes des niveaux horaires

Méthodologie

Analyse entre les ports de référence

En Méditerranée : Interpolation linéaire sur le trait de côte lissée

- Distribution des niveaux PM aux ports de référence
- Interpolation linéaire en fonction des distances le long du linéaire côtier



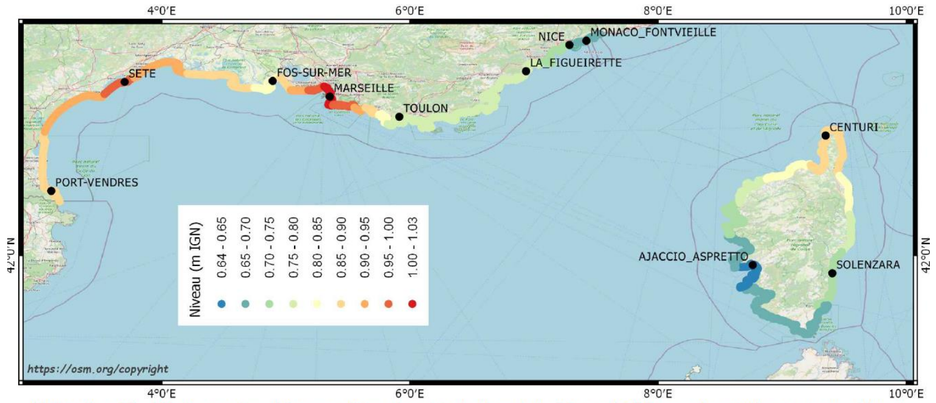


Illustration 87 : Méditerranée – Niveaux d'eau de période de retour 50 ans (GPD, représentation cartographique)

Méthodologie

Analyse aux ports de référence

Théorie de valeurs extrêmes

En Manche-Atlantique : fort marnage => convolution marée/surcote PM

Distribution des surcotes de PM

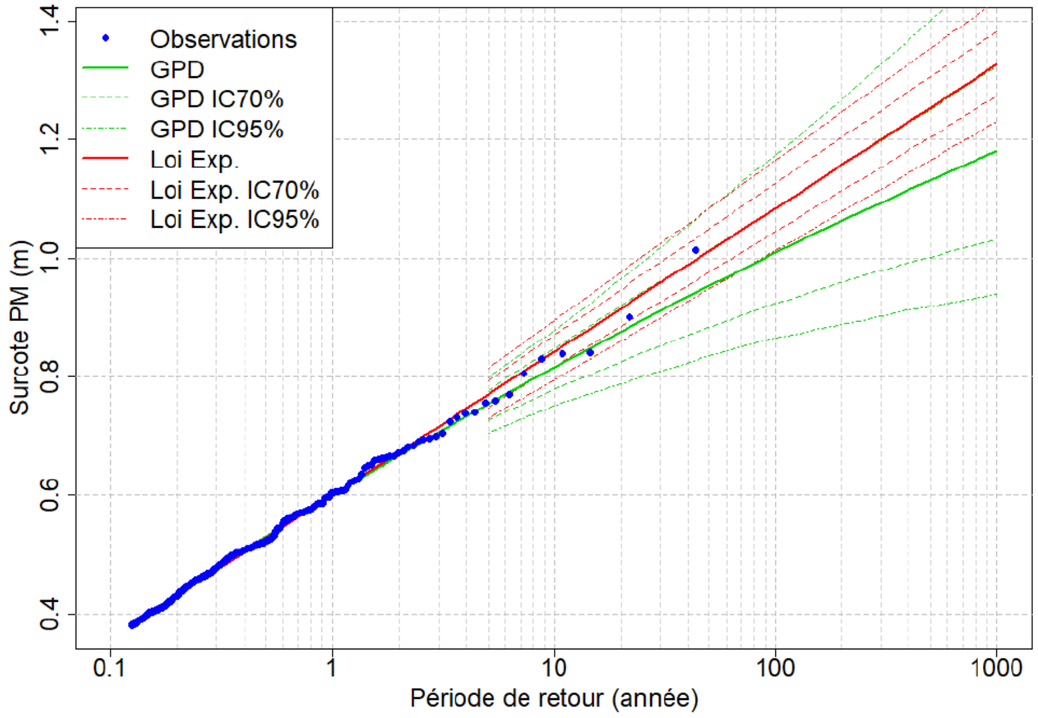
- Distribution paramétrique au-dessus du seuil de tempête :
  Sélection par POT et ajustement par GPD ou Exponentielle
- Distribution empirique sous le seuil de tempête

=> Estimation des périodes de retour des valeurs extrêmes de SPM

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0.75 m	0.73 m à 0.78 m	0.71 m à 0.80 m	0.77 m	0.75 m à 0.79 m	0.73 m à 0.81 m
10 ans	0.82 m	0.78 m à 0.85 m	0.75 m à 0.88 m	0.84 m	0.82 m à 0.87 m	0.79 m à 0.89 m
20 ans	0.88 m	0.83 m à 0.92 m	0.80 m à 0.97 m	0.92 m	0.89 m à 0.94 m	0.86 m à 0.97 m
50 ans	0.95 m	0.89 m à 1.02 m	0.84 m à 1.08 m	1.01 m	0.98 m à 1.05 m	0.94 m à 1.08 m
100 ans	1.01 m	0.93 m à 1.09 m	0.87 m à 1.17 m	1.08 m	1.05 m à 1.12 m	1.01 m à 1.16 m
200 ans	1.06 m	0.96 m à 1.16 m	0.90 m à 1.26 m	1.16 m	1.12 m à 1.20 m	1.07 m à 1.24 m
500 ans	1.13 m	1.01 m à 1.25 m	0.93 m à 1.39 m	1.25 m	1.21 m à 1.30 m	1.16 m à 1.34 m
1 000 ans	1.18 m	1.04 m à 1.32 m	0.95 m à 1.48 m	1.33 m	1.28 m à 1.38 m	1.23 m à 1.42 m

Tableau 6 : Calais – Périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote PM

Calais



Méthodologie

Analyse aux ports de référence

Théorie de valeurs extrêmes

En Manche-Atlantique : fort marnage => convolution marée surcote PM

Distribution des surcotes de PM

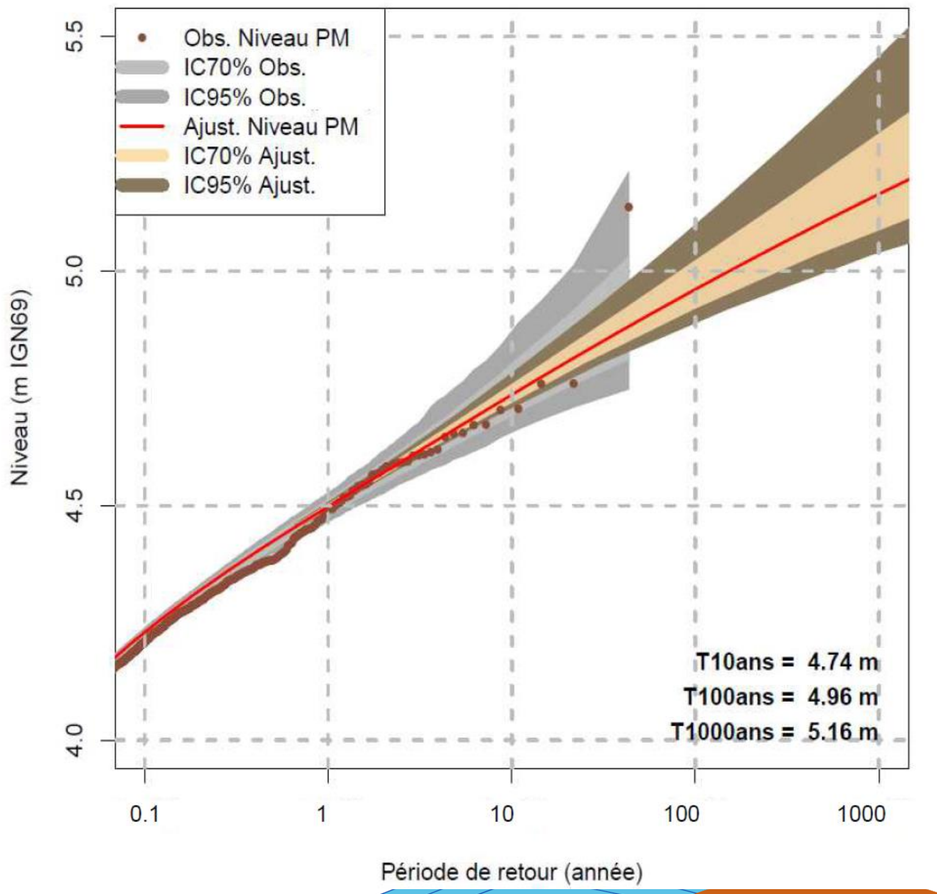
- Distribution paramétrique au-dessus du seuil de tempête :
  Sélection par POT et ajustement par GPD ou Exponentielle
- Distribution empirique sous le seuil de tempête

Convolution marée/surcote PM

- Distribution empirique des niveaux de pleine mer calculés sur 18 ans (Saros)
- Distribution de probabilités des surcotes PM : loi paramétrique GPD

=> Estimation des périodes de retour des valeurs extrêmes des niveaux de PM

Calais



Méthodologie

Analyse entre les ports de référence

En Manche-Atlantique : Interpolation linéaire sur le trait de côte lissée

- Distribution de marée PM le long du linéaire côtier (cstFrance)
- Distribution des surcotes PM aux ports de références
- Niveaux calculés par convolution marée / surcote PM
- Correction des effets locaux

⇒ Facteur de pondération des surcotes entre le point de calcul et le port de référence

⇒ Profil d'évolution des surcotes le long du littoral (centiles 99 %) à partir des simulations de surcote HOMINIM (4 ans)



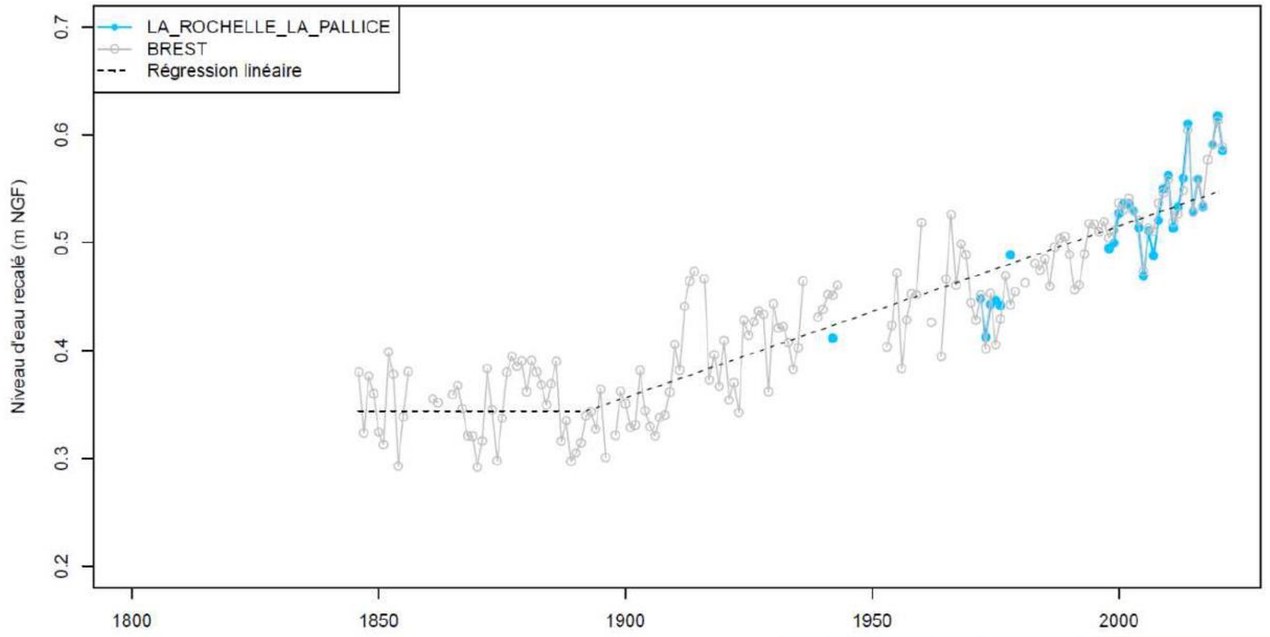
Méthodologie

Niveau moyen de référence

- 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)

Marégraphes	Variations pluri-annuelles
ARCACHON	1.59 mm/an
BOULOGNE-SUR-MER	1.34 mm/an
BREST	1.58 mm/an
BAYONNE BOUCAU	0.64 mm/an
CALAIS	0.14 mm/an
CHERBOURG	0.44 mm/an
CONCARNEAU	0.64 mm/an
LE CONQUET	1.63 mm/an
DIEPPE	3.85 mm/an
DUNKERQUE	1.09 mm/an
ILE D'AIX	2.85 mm/an
LE CROUESTY	2.21 mm/an
LE HAVRE	0.89 mm/an
LA ROCHELLE LA PALLICE	1.55 mm/an
PORT-BLOC	1.61 mm/an
PORT-TUDY	0.81 mm/an
ROSCOFF	0.75 mm/an
SAINT-GILDAS	0.69 mm/an
SAINT-JEAN-DE-LUZ SOCOA	0.95 mm/an
SAINT-MALO	1.42 mm/an
SAINT-NAZAIRE	1.24 mm/an
LES SABLES D'OLONNE	2.06 mm/an

Vitesses de variation pluriannuelle du niveau d'eau moyen aux ports en Manche-Atlantique



Incertitudes et limites

Incertitudes (2 sigma)

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

Stationnarité

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

Choix du modèle d'analyse statistique

- Méthode de sélection des pics de tempête (POT, critère de séparation)
- Lois paramétriques utilisées:
  - En Méditerranée, deux lois d'ajustement des valeurs extrêmes de niveau d'eau sont utilisées (GPD et loi exponentielle) La différence de résultat rentre dans l'incertitude du choix du modèle statistique
  - En Manche-Atlantique, la loi d'ajustement GPD a été retenue, car elle présente par construction le plus grand intervalle de confiance

Incertitudes et limites

Wave set-up et des seiches

- Le wave set-up portuaire et l'influence des seiches sont considérés comme négligeables
- Les niveaux d'eau observés dans les ports sont assimilés à des niveaux d'eau sans l'action des vagues
- Une analyse spécifique port par port de la présence du wave set-up et des seiches est nécessaire

Modulation locale de la marée et de la surcote météorologique

En Méditerranée l'interpolation entre les ports n'est pas corrigée des éventuels effets de modulation locale de la marée et de la surcote météorologique (contrairement au littoral Manche et Atlantique)

Analyse un peu moins fiable sur certaines zones géographiques

- Les résultats sont meilleurs aux ports de référence et moins bons en fond en baie
- Les résultats sont potentiellement légèrement :
  - Surestimés au voisinage des ports du Havre, de Bayonne et de Marseille
    (phénomènes très localisés qui peuvent remettre en question l'utilisation du port pour les calculs d'interpolation)
  - Sous-estimés entre Port-Vendres et Sète et entre Nice et Monaco

Incertitudes et limites

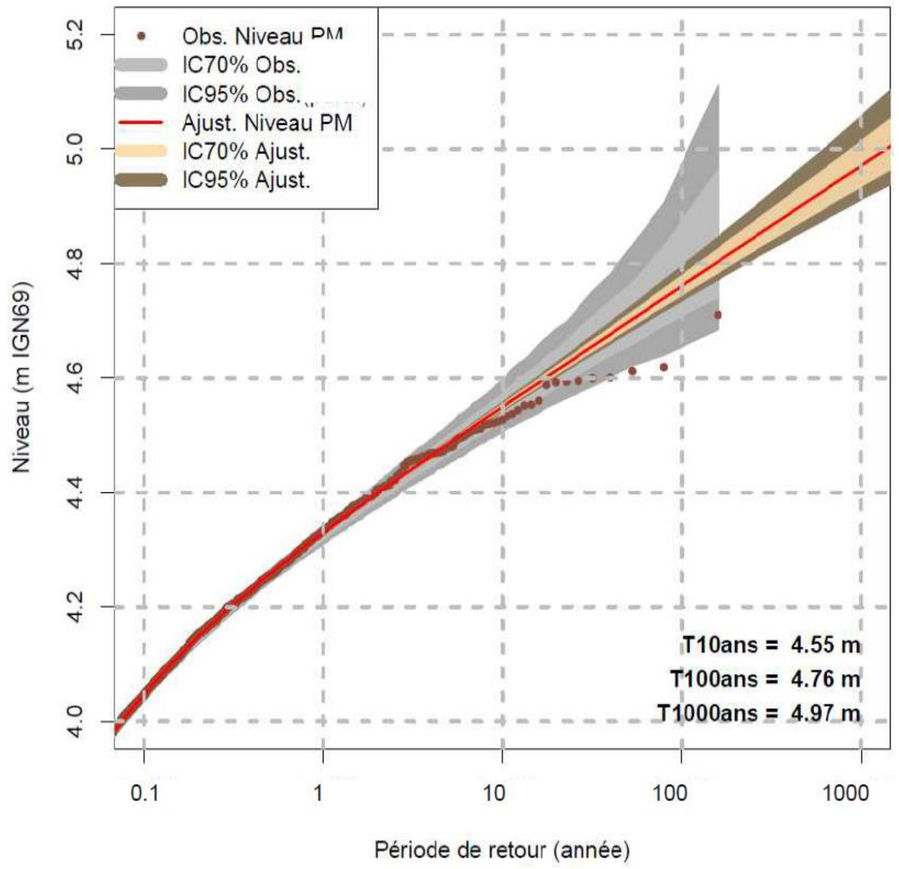
Intervalles de confiance

Les intervalles de confiance (IC à 70% et 95%) sont d'autant plus large que la durée d'observation est faible et que la période de retour estimée est élevée

Les intervalles de confiance communiqués font partie intégrante du résultat

Période de retour	Niveau PM (IGN69)	Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	4.48 m	4.48 m à 4.49 m	4.48 m à 4.49 m
10 ans	4.55 m	4.54 m à 4.55 m	4.54 m à 4.56 m
20 ans	4.61 m	4.61 m à 4.62 m	4.60 m à 4.63 m
50 ans	4.70 m	4.69 m à 4.71 m	4.68 m à 4.72 m
100 ans	4.76 m	4.74 m à 4.78 m	4.73 m à 4.80 m
200 ans	4.82 m	4.80 m à 4.85 m	4.79 m à 4.87 m
500 ans	4.91 m	4.88 m à 4.94 m	4.86 m à 4.98 m
1 000 ans	4.97 m	4.93 m à 5.01 m	4.91 m à 5.06 m

Brest



Conseils d’utilisation de l’ouvrage

Période de retour maximale exploitable

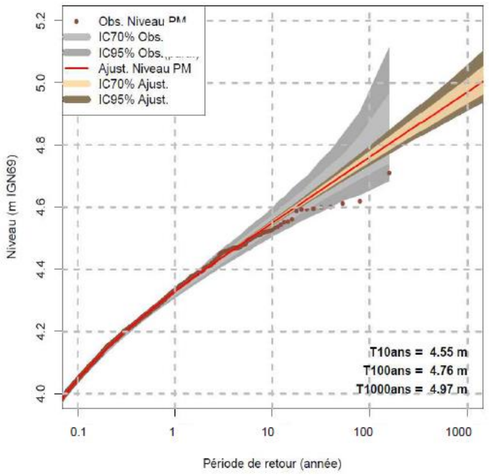
- Plus la durée d’observation est élevée, plus la projection sur des périodes de retour élevées est fiable
- Les intervalles de confiance sur les niveaux sont plus importants en Méditerranée qu’en Manche et Atlantique
  - l’approche indirecte en exploitant les prédictions de marée permet de diminuer l’incertitude

À titre d’illustration le même degré de confiance sera accordé aux estimations millénales à Brest et décennales à Centuri

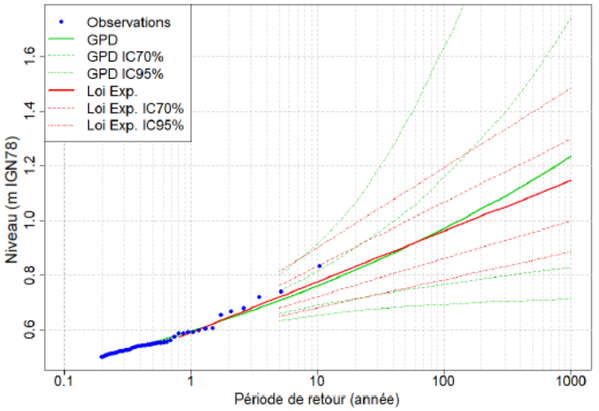
La méthode est adaptée jusqu’à la période de retour de 100 ans (voire 50 ans pour certains ports de Méditerranée)

D’autres méthodes d’analyse sont développées pour l’estimation des périodes de retour supérieures ou égales à 1000 ans (analyse régionale et/ou exploitant les données historiques)

Brest: 190 ans d’observation
IC 70% 1000ans -> 4.93-5.01 m



Centuri: 10 ans d’observation
IC 70% Exp. 10ans -> 72-83 cm

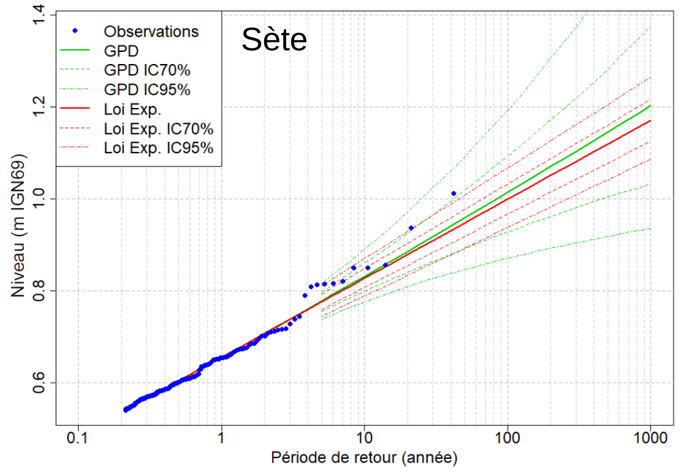


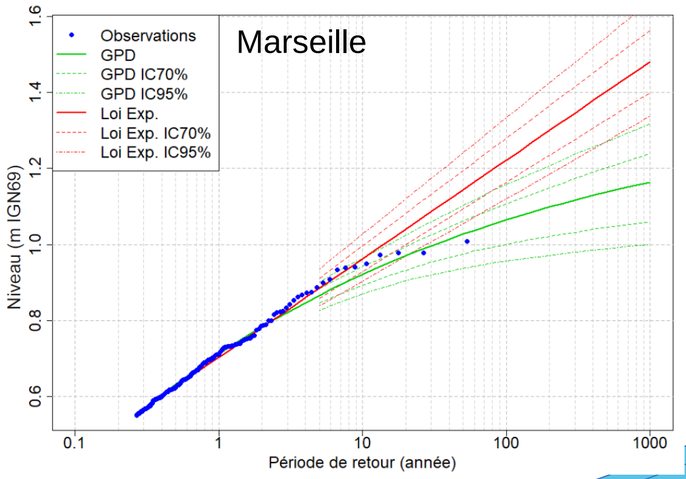
Conseils d'utilisation de l'ouvrage

Choix du résultat par ajustement de la GPD ou de la loi exponentielle

Entre la GPD et la loi exponentielle proposées pour l'ajustement des valeurs extrêmes de surcote de pleine mer en Manche et Atlantique et de niveaux de mer en Méditerranée :

- si l'utilisateur est plus intéressé par l'intervalle de confiance que par l'estimation médiane, la GPD est plus représentative des incertitudes
- s'il est recherché l'estimation médiane, il est intéressant de regarder les deux lois et de faire son choix selon le degré de sécurité souhaitée





Conseils d'utilisation de l'ouvrage

Prise en compte des incertitudes sur les prédictions de marée

L'incertitude à 95 % sur les prédictions de marée référencées à l'IGN est estimée à + ou - 15 cm dans les ports de référence et de + ou - 25 cm entre les ports de référence

Ces incertitudes peuvent être intégrées par exemple dans la marge de sécurité ajoutée au résultat final

Dans les faits, l'incertitude de marée est rarement exploitée

Prise en compte de l'élévation du niveau moyen

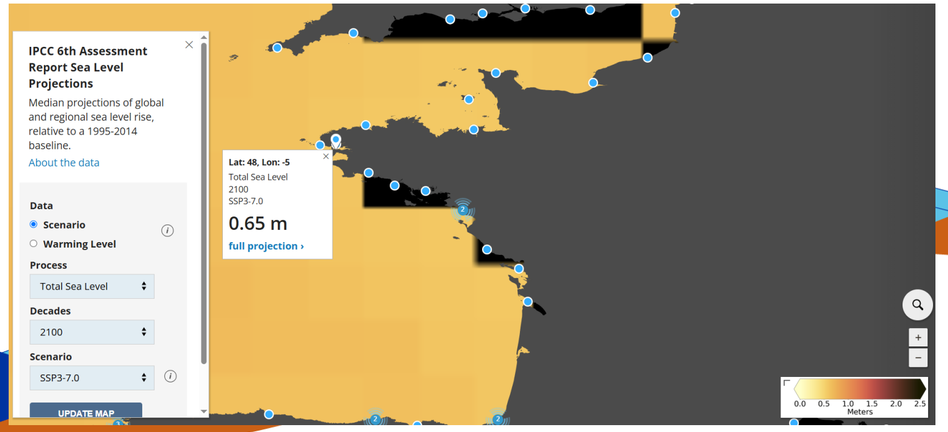
Pour les ports de référence, l'année de référence est 2020 => valeurs différentes de celles diffusées dans le produit « Références Altimétriques Maritimes (RAM) »

Pour changer d'année de référence (aux ports de référence comme entre les ports), il convient de prendre en compte la surélévation du niveau d'eau liée au changement climatique et les mouvements verticaux du sol

⇒ ajout d'une composante liée au changement climatique

Projections régionales du 6e rapport du GIEC

https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projectiontool



MINISTÈRES
TRANSITION ÉCOLOGIQUE
AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE
TRANSPORTS
VILLE ET LOGEMENT
Liberté
Égalité
Fraternité

SHOM

Conseils d'utilisation de l'ouvrage

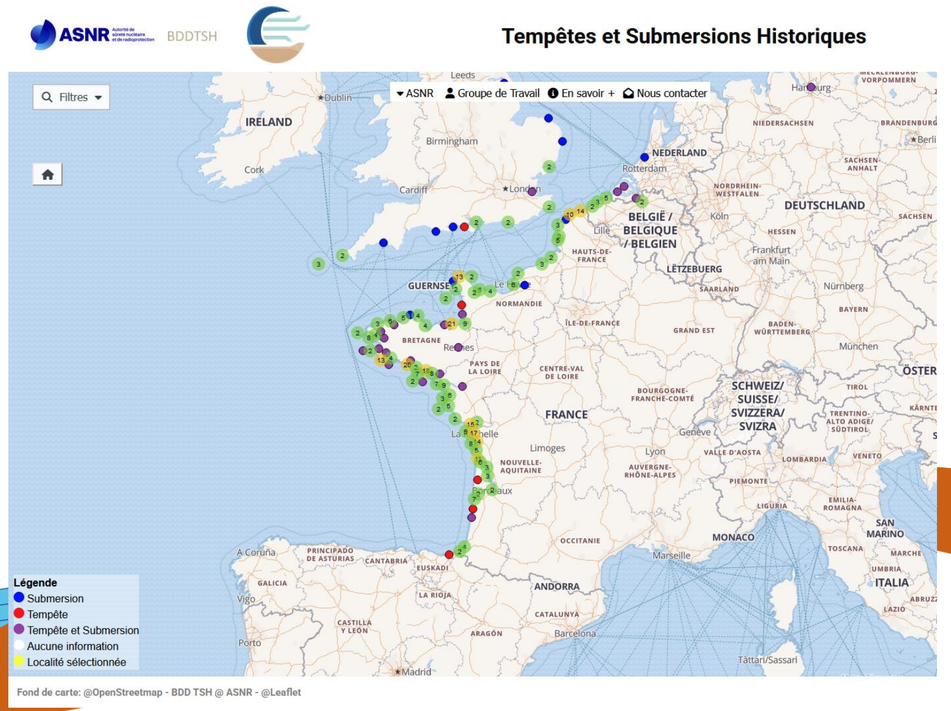
Caractérisation de l'aléa submersion marine

L'analyse des événements tempétueux historiques et des niveaux marins engendrés à la côte est complémentaire et nécessaire
Confrontation aux résultats du présent ouvrage, notamment dans le cadre des études préalables à l'élaboration de PPRL

Ces évènements permettent d'apporter une information de niveaux atteints en conditions exceptionnelles.

La confrontation de ces niveaux aux niveaux marins statistiques centennaux à la côte permet de déterminer l'événement de référence à retenir dans le cadre d'études d'aléa submersion marine

Pour trouver des événements historiques de référence, la base de données du groupe de travail Tempêtes et submersions historiques
peut être consultée : https://bddtsh.irsn.fr



MINISTÈRES
TRANSITION ÉCOLOGIQUE
AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE
TRANSPORTS
VILLE ET LOGEMENT
Liberté
Égalité
Fraternité

SHOM

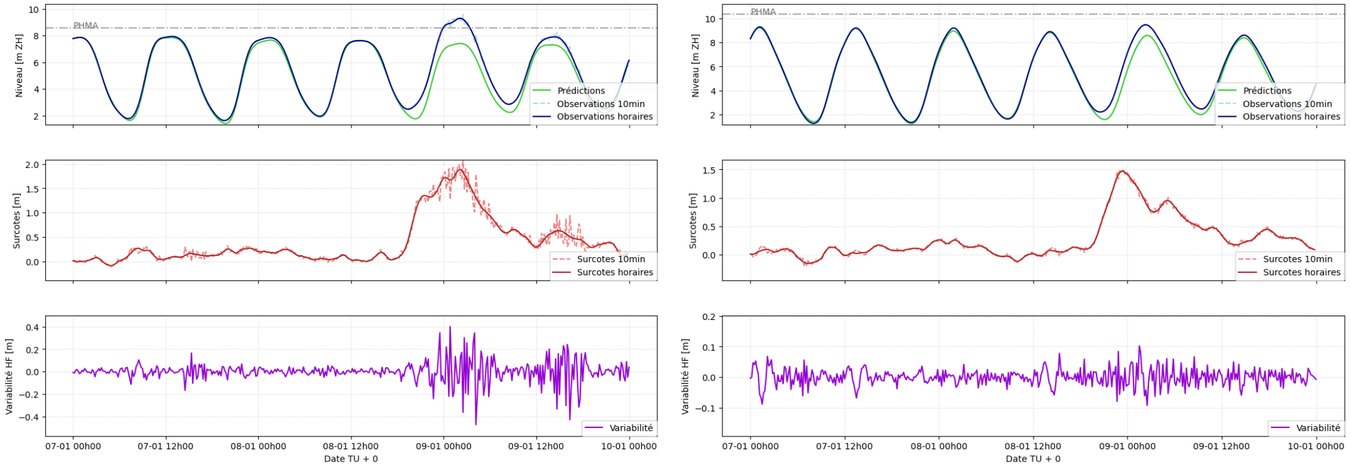
Exemple d'utilisation

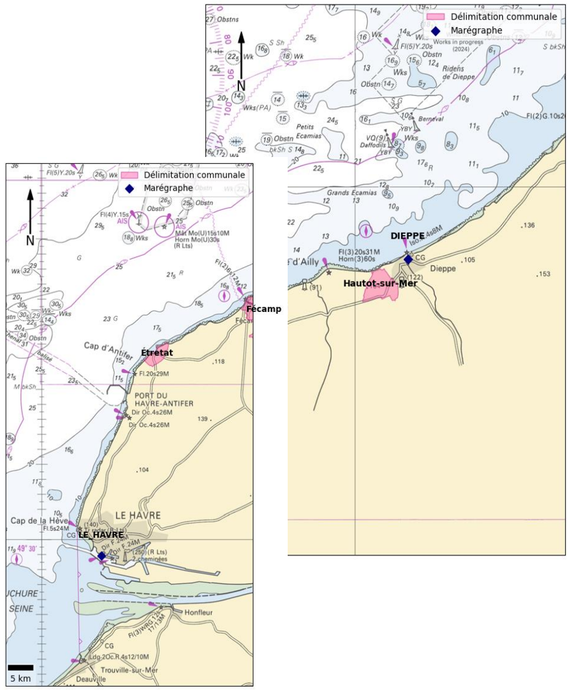
Rapports de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle

⇨ **Phénomènes liés à l'action de la mer**

Exemple tempête Goretti 8-9 janvier 2026

- Téléchargement des données brutes validées au marégraphe le plus proche sur data.shom.fr
- Calcul des niveaux d'eau horaires (filtrage des données brute)





- Comparaison aux valeurs médianes de niveaux PM
- Périodes de retour associées à l'évènement

Période de retour	Niveau PM (IGN69)	Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	4.48 m	4.46 m à 4.52 m	4.44 m à 4.55 m
10 ans	4.58 m	4.55 m à 4.63 m	4.52 m à 4.69 m
20 ans	4.69 m	4.64 m à 4.77 m	4.60 m à 4.87 m
50 ans	4.84 m	4.75 m à 4.97 m	4.69 m à 5.15 m
100 ans	4.96 m	4.84 m à 5.14 m	4.76 m à 5.41 m
200 ans	5.09 m	4.93 m à 5.34 m	4.83 m à 5.74 m
500 ans	5.27 m	5.05 m à 5.64 m	4.91 m à 6.25 m
1 000 ans	5.42 m	5.14 m à 5.90 m	4.98 m à 6.75 m

Période de retour	Niveau PM (IGN69)	Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	5.90 m	5.89 m à 5.93 m	5.88 m à 5.95 m
10 ans	5.97 m	5.95 m à 6.01 m	5.93 m à 6.04 m
20 ans	6.04 m	6.01 m à 6.10 m	5.99 m à 6.20 m
50 ans	6.15 m	6.09 m à 6.29 m	6.06 m à 6.49 m
100 ans	6.26 m	6.17 m à 6.48 m	6.12 m à 6.84 m
200 ans	6.38 m	6.24 m à 6.73 m	6.17 m à 7.31 m
500 ans	6.59 m	6.34 m à 7.18 m	6.25 m à 8.19 m
1 000 ans	6.77 m	6.43 m à 7.61 m	6.31 m à 9.08 m

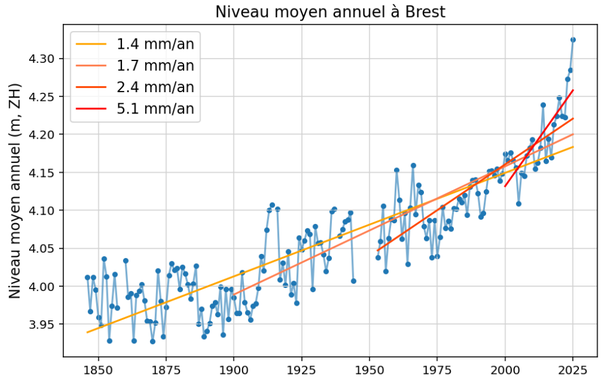
PARTENAIRE SCIENCE COMES TO TOWN

MARINE NATIONALE 400 ANS

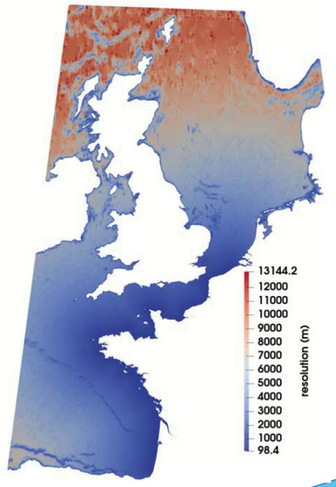
Perspectives pour la mise à jour de l'ouvrage

Amélioration de la méthodologie

- **Aux ports de référence**
  - Étude des interactions marée/surcote pour améliorer les ajustements statistiques
  - Amélioration de la correction du niveau moyen : régression linéaire pas forcément adaptée
  - Ajout de données historiques dans l'analyse statistique



- **Le long du linéaire côtier**
  - Calculs des niveaux d'eau à partir d'un long rejeu de surcotes (~40 ans)
  - Extension au large?

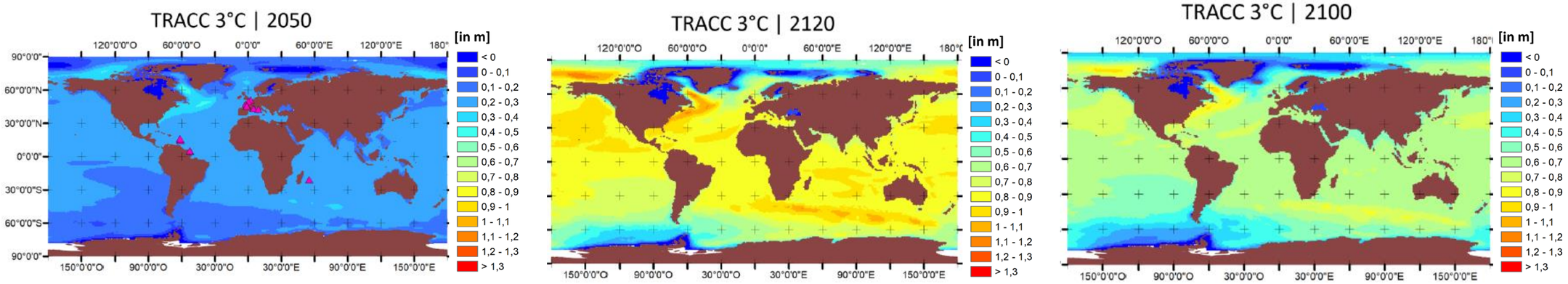


Modèle TOLOSA-sw, configuration Manche-Atlantique

Perspectives pour la mise à jour de l'ouvrage

Prise en compte de l'élévation du niveau moyen

- Prise en compte des scénarios d'élévation de la TRACC dans les simulations



Le Cozannet et al., 2025

Ajouts des outremers

- Étude limitée aux marégraphes, pas d'utilisation du modèle pour les outremers
- Étude des extrêmes plus difficile pour les outremers, car soumis aux cyclones

MINISTÈRES
TRANSITION ÉCOLOGIQUE
AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE
TRANSPORTS
VILLE ET LOGEMENT
Liberté
Égalité
Fraternité

SHOM

SHOM
L'océan en référence

Cerema
CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

Merci pour votre attention!

PARTENAIRE SCIENCE COMES TO TOWN
Financé par l'Union européenne

MARINE NATIONALE
AMS 400

Méthodologie

Analyse aux ports de référence

Théorie de valeurs extrêmes

En Méditerranée : faible marnage => approche directe

Distribution des niveaux PM

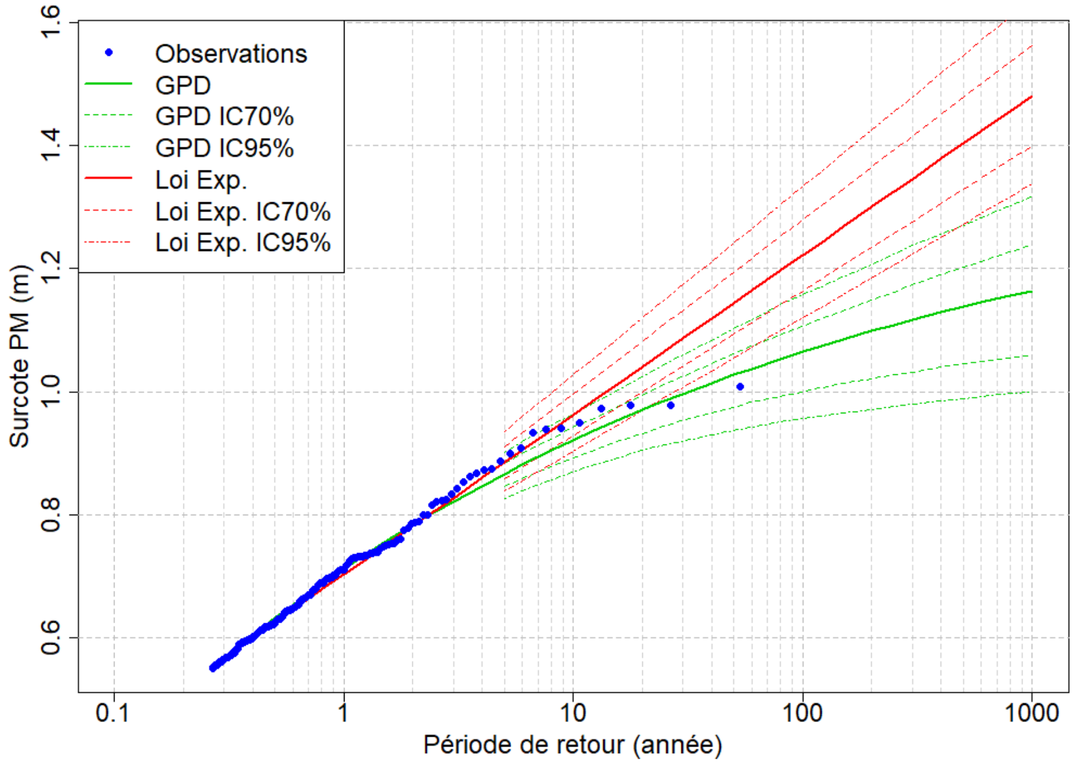
Ajustement statistique des valeurs extrêmes

Sélection des pics de tempête (POT avec critère de séparation ± 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

Analyse aux ports de référence

Théorie de valeurs extrêmes

En Manche-Atlantique : fort marnage => convolution marée surcote PM

Distribution des surcotes de 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

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

→ *p(m) :* densité de probabilité d'avoir une marée PM égale à « m » (Saros)

→ $F_s(s)$ *:* fonction de répartition des surcotes PM

Calais

