

NIVEAUX D'EAU EXTRÊMES SUR LE LITTORAL MÉTROPOLITAIN

Mieux les connaître pour mieux
caractériser et anticiper le risque
de submersion marine



**NIVEAUX D'EAU
EXTRÊMES**

**SUR LE LITTORAL
MÉTROPOLITAIN**

**Mieux les connaître pour mieux
caractériser et anticiper le risque
de submersion marine**



Collection

« Les références »

Cette collection regroupe l'ensemble des documents de référence portant sur l'état de l'art dans les domaines d'expertise du Cerema (recommandations méthodologiques, règles techniques, savoir-faire...), dans une version stabilisée et validée. Destinée à un public de généralistes et de spécialistes, sa rédaction pédagogique et concrète facilite l'appropriation et l'application des recommandations par le professionnel en situation opérationnelle.

Cerema, au service de la transition écologique et de la cohésion des territoires

Établissement public placé sous la tutelle du ministère de la Transition écologique, le Cerema accompagne l'État et les collectivités sur les thématiques de la transition écologique, de l'adaptation au changement climatique et de la cohésion des territoires par l'élaboration, le déploiement et l'évaluation de politiques publiques d'aménagement et de transport.

Présents en métropole et dans les territoires ultramarins français, ses 2 400 agents interviennent dans six domaines : Expertise & Ingénierie territoriale, Bâtiment, Mobilités, Infrastructures de transport, Environnement & Risques, Mer & Littoral.

www.cerema.fr

Shom, l'océan en référence

Le Shom (Service hydrographique et océanographique de la Marine) est un établissement public placé sous la tutelle du ministère des Armées. En tant qu'opérateur de référence pour l'information géographique maritime et littorale, il a pour mission de connaître et décrire l'environnement physique marin, d'en prévoir l'évolution et d'assurer la diffusion des informations sur ce sujet. Ses domaines d'expertise sont notamment : la bathymétrie, la sédimentologie, l'hydrodynamique côtière, l'océanographie, l'ingénierie des systèmes d'acquisition à la mer, l'information géographique maritime et littorale. Le Shom a également une mission de soutien à la Défense et aux politiques publiques de la mer et du littoral.

www.shom.fr

Comment citer cet ouvrage :

*Niveaux d'eau extrêmes
sur le territoire métropolitain.*

Cerema et Shom, 2024.

Collection : Les références.

ISSN : 2276-0164

ISBN : 978-2-37180-680-1 (papier)

978-2-37180-681-8 (pdf)

REMERCIEMENTS

**Cet ouvrage est le fruit d'un travail partenarial du Cerema et du Shom.
Sa réalisation a été pilotée par Xavier Kergadallan et Julie Gaujard (Cerema).**

Sont remerciées les personnes ayant contribué à sa rédaction :

Xavier Kergadallan (Cerema), Gaël André et Audrey Pasquet (Shom).

Sont remerciés pour leur participation à l'annexe 5, les membres du sous-groupe « statistiques des extrêmes » du groupe de travail pluridisciplinaire sur les tempêtes et submersions historiques :

Xavier Kergadallan (Cerema), Lise Bardet, Yasser Hamdi et Antonin Migaud (IRSN), Jessie Louisor et Jeremy Rohmer (BRGM), Franck Mazas (Artelia), Marc Andreevsky, Roberto Frau et Anne Dutfoy (EDF), Gaël André, Nathalie Giloy, Héloïse Michaud, Laurent Leballeur, Guiomar Lopez et Yann Krien (Shom), Laurie Saint-Criq (INRS).

Sont remerciés pour leur relecture :

Gaël André, Nathalie Giloy et Audrey Pasquet (Shom), Franck Mazas (ARTELIA), Barbara Leroy (Cerema), Nancy Furer (nf2).

PRÉFACES

AMÉLIORER LA CONNAISSANCE SUR LES RISQUES POUR SAVOIR LES ANTICIPER ET SE PRÉPARER À LA GESTION DE CRISE

Espace de développement économique, urbanistique ou encore récréatif, le littoral offre aux territoires marins des ressources et opportunités spécifiques, mais il est de plus en plus vulnérable, soumis à des assauts naturels qui en font une zone de dangers et de fragilités. Tout au long de leurs 5 500 km, les côtes métropolitaines sont en perpétuel mouvement. Le changement climatique, la forte croissance de la population en bord de mer, l'augmentation du niveau moyen des mers intensifient les pressions qui pèsent sur elles.

Un enjeu majeur consiste à concilier l'attractivité et le développement de ces territoires avec les différents aléas auxquels ils sont soumis - recul du trait de côte, submersion marine, inondations - avec pour évident fil conducteur, la protection des personnes et des biens. Dans ce dessein et en accompagnement de l'application des politiques publiques en matière d'aménagement du littoral ou de prévention des risques naturels, l'aléa de submersion marine est un phénomène à observer au plus près, ce qui suppose de quantifier les valeurs extrêmes de niveau marin.

Sur une trentaine de ports du littoral métropolitain, cet ouvrage produit par le Cerema et le Shom présente une estimation des valeurs extrêmes de niveau d'eau jusqu'à une période de retour de 1000 ans. Son objectif est d'aider les communes et les collectivités territoriales concernées à se préparer à la gestion des risques et des crises, ainsi qu'à optimiser leurs capacités de vigilance et d'alerte.

Je suis convaincu qu'il vous apportera les informations précises et nécessaires pour anticiper ces phénomènes de submersion marine. Car appelés à se multiplier, ceux-ci vont à l'évidence remettre en cause l'occupation et l'usage des territoires littoraux, tout autant que l'exposition des populations au risque.



© Freddie Barbera

Pascal Berteaud,
directeur général du Cerema

MESURER ET MODÉLISER POUR ÉCLAIRER LA DÉCISION PUBLIQUE

Le cordon littoral, lieu d'enjeux économiques, environnementaux, de sécurité et sous forte pression anthropique, est aujourd'hui soumis à des événements catastrophiques de plus en plus puissants et fréquents. Comprendre et modéliser ces aléas est fondamental pour éclairer la puissance publique et aider à prendre les bonnes décisions en objectivant les menaces. C'est une tâche ardue et exigeante qui nécessite une forte mobilisation de moyens et d'expertise.

Pour anticiper l'avenir, il est essentiel de connaître et comprendre le passé. À cet égard, il faut se réjouir que nos prédécesseurs aient très tôt compris l'intérêt de capitaliser les observations des hauteurs d'eau qui permettent aujourd'hui de reconstituer des séries historiques sur plus de 300 ans dans certains ports. Ces séries ont une valeur inestimable pour déterminer les périodes de retour statistiques de niveaux extrêmes. Cette capacité d'observation se prolonge aujourd'hui par les réseaux opérationnels d'observation des niveaux marins déployés sur nos côtes et qui rapportent leurs mesures en temps réel.

Dans le contexte changeant du réchauffement du climat dont un effet majeur est l'élévation inexorable du niveau des mers et des océans, il faut aussi être capable de se projeter et de modéliser des événements dont la puissance n'a encore jamais été observée. Les modèles océanographiques que nous développons servent à cela. Ils seront bientôt intégrés dans des jumeaux numériques qui compléteront le dispositif en simulant les effets dynamiques des submersions et les mesures d'aménagement permettant de protéger nos côtes.



© Le Télégramme - David Cormier

C'est ainsi qu'éclairés par les analyses et les prévisions d'organismes scientifiques tels que le Shom et le Cerema, les acteurs du littoral pourront agir et anticiper.

Laurent Kerléguer,
directeur général du Shom

Sommaire

Introduction 12

CHAPITRE 1

La méthodologie d'analyse 15

- 1.1 Rappel sur l'estimation des valeurs extrêmes de niveau d'eau 16
- 1.2 Précision sur l'actualisation des résultats de 2012 17
- 1.3 Données utilisées pour les estimations de valeurs extrêmes de niveaux d'eau dans 33 ports de référence et le long du littoral 18
- 1.4 Méthode de calcul aux ports de référence 21
- 1.5 Méthode d'interpolation le long du trait de côte 22

CHAPITRE 2

Limites associées aux résultats et conseils d'utilisation de l'ouvrage 25

- 2.1 Principales limites 26
- 2.2 Conseils pour l'utilisation des données 27

CHAPITRE 3

Résultats en Manche-Atlantique 31

- 3.1 Résultats par port 32
 - 3.1.1 Dunkerque 32
 - 3.1.2 Calais 33
 - 3.1.3 Boulogne-sur-Mer 35
 - 3.1.4 Dieppe 37
 - 3.1.5 Le Havre 38
 - 3.1.6 Cherbourg 40
 - 3.1.7 Saint-Malo 42
 - 3.1.8 Roscoff 43
 - 3.1.9 Brest 45
 - 3.1.10 Le Conquet 47
 - 3.1.11 Concarneau 48
 - 3.1.12 Port-Tudy 50
 - 3.1.13 Le Crouesty 52
 - 3.1.14 Saint-Nazaire 53
 - 3.1.15 Saint-Gildas 55

3.1.16	Les Sables-d'Olonne	57
3.1.17	La Rochelle La Pallice	58
3.1.18	Île d'Aix	60
3.1.19	Port-Bloc	62
3.1.20	Arcachon	63
3.1.21	Bayonne Boucau	65
3.1.22	Saint-Jean-de-Luze Soccoa	67
3.2	Résultats le long du linéaire côtier	69
3.2.1	Niveau de période de retour 5 ans	69
3.2.2	Niveau de période de retour 10 ans	70
3.2.3	Niveau de période de retour 20 ans	71
3.2.4	Niveau de période de retour 50 ans	72
3.2.5	Niveau de période de retour 100 ans	73

CHAPITRE 4

Résultats en Méditerranée

75

4.1	Résultats par port	76
4.1.1	Port-Vendres	76
4.1.2	Sète	77
4.1.3	Fos-sur-Mer	78
4.1.4	Marseille	79
4.1.5	Toulon	80
4.1.6	La Figueirette	81
4.1.7	Nice	82
4.1.8	Monaco - Fontvieille	83
4.1.9	Ajaccio-Aspretto	84
4.1.10	Centuri	85
4.1.11	Solenzara	86
4.2	Résultats le long du linéaire côtier	87
4.2.1	Niveau de période de retour 5 ans	87
4.2.2	Niveau de période de retour 10 ans	89
4.2.3	Niveau de période de retour 20 ans	91
4.2.4	Niveau de période de retour 50 ans	93
4.2.5	Niveau de période de retour 100 ans	95

Conclusion **97**

Annexe 1 **99**

Comparaison des résultats 2012 et 2022 **100**

Annexe 2 **103**

Estimation des variations pluriannuelles **104**

Annexe 3 **107**

Description détaillée de la méthode de calcul
des valeurs extrêmes de niveau d'eau **108**

Annexe 4 **113**

Présentation détaillée des incertitudes et des limites liées aux résultats **114**

Annexe 5 **119**

Apports des données historiques et régionales pour diminuer
les intervalles de confiance des niveaux d'eau de grandes périodes de retour **120**

Annexe 6 **127**

Évolution des marées pleine mer le long du littoral de Manche-Atlantique **128**

Annexe 7 **129**

Évolution des surcotes le long du littoral de Manche-Atlantique **130**

Annexe 8 **131**

Évolution des surcotes le long du littoral méditerranéen **132**

Bibliographie **135**



INTRODUCTION

LES NIVEAUX D'EAU EXTRÊMES, CLÉS DE COMPRÉHENSION DU RISQUE DE SUBMERSION MARINE

Marqué par une succession de tempêtes, l'hiver 2023-2024 a généré plus de 50 demandes de reconnaissance en état de catastrophe naturelle par des communes françaises, en raison des dégâts survenus sur leurs côtes. Cette réalité de plus en plus prégnante place le risque de submersion marine en première ligne et renforce le besoin de caractérisation, d'estimation et de connaissance des valeurs extrêmes de niveau marin pouvant se produire.

Lié au passage d'une dépression ou d'un cyclone sur le littoral, ce risque est avéré si le niveau marin dépasse la crête des ouvrages de protection ou du terrain naturel, ou en cas de rupture des systèmes de protection. Pour le caractériser et dimensionner les ouvrages à réaliser ou à renforcer sur la côte, il apparaît fondamental de mieux connaître les niveaux marins, et plus particulièrement les niveaux d'eau extrêmes. Car ce sont eux qui sont à l'origine des conséquences les plus dramatiques.

Combinaison de plusieurs composantes et associé à différents phénomènes, le niveau d'eau marin oscille en fonction de la marée, phénomène parfaitement prédictible, des surcotes ou décotes d'origine météorologique dues au passage de perturbations atmosphériques et aussi de la surcote liée au déferlement des vagues. Localement, peuvent s'ajouter des phénomènes d'origine tectonique ou, dans certains environnements semi-fermés de baies, rades ou bassins portuaires, des phénomènes de résonance oscillatoire.

À l'échelle pluriannuelle et dans le contexte du changement climatique, le niveau moyen des mers augmente aussi du fait de la dilatation thermique et des apports d'eau douce liée à la fonte des glaces continentales. Ce phénomène est appelé l'eustatisme.

Variables d'une année sur l'autre, les niveaux d'eau expriment donc actuellement une tendance à l'augmentation. À ce titre, le rapport 2015 de l'Observatoire national sur les effets du changement climatique sur le littoral [ONERC, 2015] apporte les éléments d'information nécessaires pour aider à ajuster les projections d'élévation moyenne.

DE L'APPROCHE HISTORIQUE À L'APPROCHE STATISTIQUE

Aujourd'hui, pour comprendre le comportement de ces niveaux marins, deux approches complémentaires sont généralement mises en œuvre.

- Dite historique, la première revient à analyser les niveaux d'eau atteints par le passé à partir des traces ou des témoignages de niveaux d'eau atteints à différents endroits.
- Dite statistique, la seconde s'attache à définir des niveaux qui n'ont pas été observés, mais qui peuvent survenir avec une probabilité donnée. Elle repose sur une analyse statistique des observations de niveaux d'eau afin de déterminer les probabilités d'occurrence associées.

Le présent ouvrage s'inscrit dans cette deuxième approche. Son objet vise à l'estimation, par analyse statistique, des valeurs extrêmes de niveau d'eau marin jusqu'à une période de retour de 1000 ans le long du littoral métropolitain, sachant que par définition, un événement de période de retour de 10 ans, par exemple, a une chance sur dix de se produire une année donnée.

Basé sur les observations marégraphiques disponibles dans les ports, il ne prend toutefois pas en compte la surélévation du niveau d'eau par l'action des vagues. Seules les composantes du niveau marin mesurées par les marégraphes sont incluses.

Cet ouvrage se concentre sur 33 ports de référence répartis sur la façade Manche-Atlantique, sur le littoral métropolitain de Méditerranée.

Pour ceux situés en Manche-Atlantique, l'étude du niveau d'eau est effectuée à travers les composantes de marée et de surcote du fait des marnages importants supérieurs à trois mètres. Pour leurs homologues de Méditerranée, en raison des faibles marnages, une analyse directe des niveaux d'eau est choisie.

MIEUX SE PRÉPARER À LA GESTION DES RISQUES ET DES CRISES

Ainsi, fruit d'un travail partenarial entre le Cerema et le Shom, l'objet de ce rapport est d'aider à l'élaboration de jeux de données et de cartes de submersions marines, utiles pour la vigilance et l'alerte, ainsi que pour la préparation à la gestion des risques et des crises.

Il s'inscrit dans la continuité de trois publications antérieures :

- *Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique)*, publié en 2012 par le Shom-Cetmef : une analyse aux marégraphes et une analyse spatiale de valeurs extrêmes de niveau d'eau pour des périodes de retour inférieures ou égales à 100 ans (analyse limitée au littoral Manche-Atlantique jusqu'aux périodes de retour 100 ans et sans quantification des intervalles de confiance) ;
- *Analyse des surcotes extrêmes le long des côtes métropolitaines*, publié en 2013 par le Cetmef : une estimation aux marégraphes des valeurs extrêmes de surcotes pour les périodes de retour inférieures ou égales à 1 000 ans sur l'ensemble de la métropole ;
- *Les niveaux marins extrêmes – Ports de métropole Cerema*, publié en 2018 par le Cerema : une estimation aux marégraphes des valeurs extrêmes de niveau d'eau pour les périodes de retour inférieures ou égales à 1 000 ans sur l'ensemble de la métropole.

Les résultats présentés ici, en tant que mises à jour des études Shom-Cetmef 2012, Cetmef 2013 et Cerema 2018, fournissent trois types d'estimations statistiques :

- des valeurs extrêmes de surcote de pleine mer pour 22 ports de référence en Manche-Atlantique ;
- des valeurs extrêmes de niveau d'eau pour 33 ports de référence de la métropole en Manche-Atlantique et Méditerranée ;
- des valeurs extrêmes de niveau d'eau sur l'ensemble du littoral métropolitain présentées sous forme d'un ensemble de cartes.

Les services de l'État réalisent les Plans de prévention des risques littoraux (PPRL). Les valeurs présentées dans ce document font partie des références utilisées dans la réalisation des études associées à leur réalisation.



© AdobeStock - Hector Christiaen



CHAPITRE I

La méthodologie d'analyse

LA MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE

Limitées à la façade Manche-Atlantique, les données publiées en 2012 par le Shom-Cetmef dans son étude *Statistiques des niveaux marins extrêmes de côtes de France (Manche et Atlantique)* faisaient référence dans le cadre de l'élaboration des jeux de cartes de submersions marines.

Le présent ouvrage est issu d'un travail collaboratif réalisé en 2022 entre le Cerema et le Shom [Cerema et Shom, 2022]. Ce travail actualise les données publiées en 2012 et fournit des valeurs de référence pour les façades Manche-Atlantique et Méditerranéenne.

1.1 - RAPPEL SUR L'ESTIMATION DES VALEURS EXTRÊMES DE NIVEAU D'EAU

Le niveau d'eau marin observé à un instant donné est la combinaison de plusieurs composantes associées à différents phénomènes élémentaires.

Ce niveau oscille autour du niveau moyen de la mer en fonction de :

- la marée, un phénomène déterministe et prédictible. Il est directement lié au mouvement des astres et à leurs variations saisonnières. Sa composante principale en métropole a une périodicité semi-diurne ;
- les surcotes/décotes d'origine météorologique : ces phénomènes sont la manifestation des effets des paramètres atmosphériques que sont les pressions (effet de baromètre inverse) et les vents (accumulation d'eau par friction à la surface de l'eau) lors du passage des perturbations atmosphériques. Ils sont sensibles localement à l'orientation des vents par rapport à la côte, et plus généralement à une configuration littorale (bathymétrie et morphologie des côtes). Une tempête peut générer des pics de surcotes pendant quelques heures et jusqu'à deux ou trois jours ;
- la surcote liée aux vagues : surcote supplémentaire à la côte générée par le déferlement des vagues (surcote statique, le wave set-up ; ou dynamique, le wave run-up). Cette surcote est très sensible aux paramètres locaux (configuration littorale et des caractéristiques des éventuels ouvrages de protection) ;
- localement, dans certains environnements semi-fermés (baies, rades et bassins portuaires), des phénomènes oscillatoires locaux liés à la « mise en résonance » peuvent s'ajouter (phénomènes de seiches).

Avec le changement climatique, le niveau d'eau moyen des mers augmente aussi du fait de la dilatation thermique et des apports d'eau douce (fonte des glaces continentales). À cela peut s'ajouter une modification de la circulation des courants océaniques et, à des échelles de temps généralement plus élevées, le soulèvement ou la subsidence des continents.

Les dépressions atmosphériques sont à l'origine des fortes surcotes. Lorsque celles-ci coïncident avec une marée haute, les niveaux d'eau peuvent atteindre une valeur particulièrement élevée.

Afin d'estimer la probabilité qu'une valeur de niveau d'eau soit atteinte, une analyse statistique des observations disponibles est nécessaire. Le résultat est présenté sous forme de période de retour. Une période de retour de X années signifie que le niveau a une chance sur X d'être observé dans l'année. Mais rien n'interdit que ces niveaux soient observés plusieurs fois dans l'année, et/ou plusieurs années de suite.

À noter que pour une période de retour donnée, le niveau d'eau associé augmente dans le temps sous l'effet du changement climatique. Au niveau mondial et en 2100, les niveaux d'eau centennaux deviendraient des niveaux annuels pour 60 à 80% des sites équipés de marégraphes (Journées Refmar 2022, V. Masson Delmotte, GIEC).

Les observations marégraphiques sont les principales sources d'information sur les niveaux d'eau à la côte. À ce jour, seuls les marégraphes portuaires disposent d'une durée de mesure suffisante pour une estimation statistique des valeurs extrêmes de niveau d'eau. Les ports maintenant une hauteur d'eau minimum pour la navigation maritime avec une configuration destinée à diminuer l'agitation à l'intérieur des bassins ; la surcote liée au déferlement des vagues y est faible, voire nulle. Le niveau d'eau dans les ports est donc assimilé à un niveau sans l'action des vagues. Pour les interpolations entre les ports, il convient d'ajouter la surcote liée aux vagues.

Les mesures des marégraphes portuaires sont les données de référence pour l'estimation des périodes de retour des niveaux marins à la côte. Par contre, elles ne permettent pas (ou mal) de prendre en compte la surcote liée au déferlement des vagues. Les niveaux d'eau calculés sont donc assimilés à des niveaux sans l'action des vagues. Pour une utilisation en dehors des ports, il convient de quantifier la surcote additionnelle liée aux vagues.

Les périodes de retour calculées sont associées à l'année de calcul. Pour un niveau d'eau donné, elles diminuent dans le temps du fait de la remontée du niveau moyen des mers sous l'effet du changement climatique visque la probabilité d'observer le niveau d'eau devient plus élevée.

1.2 - PRÉCISION SUR L'ACTUALISATION DES RÉSULTATS DE 2012

L'étude 2012 ne couvre pas la Méditerranée. La comparaison est donc limitée à la façade Manche-Atlantique.

Pour 2012 comme pour 2022, une estimation est faite pour des ports de référence. Ces résultats sont utilisés pour une interpolation spatiale entre les ports. De manière générale, la différence de méthode est faible aux ports de référence (voir annexe 1). Par contre elle est importante entre les ports avec une interpolation dans l'étude 2022 le long du trait de côte alors que dans l'étude 2012 l'interpolation s'étend au large.

1.2.1 - ACTUALISATION AUX PORTS DE RÉFÉRENCE

La méthode utilisée en 2022 est similaire à celle utilisée en 2012. Les résultats de 2022 peuvent être donc considérés comme une mise à jour de ceux effectués en 2012 avec douze années d'observations supplémentaires (jusqu'à la fin 2009 pour l'étude 2012 et fin 2021 pour l'étude 2022).

À noter quelques différences par rapport à 2012 :

- au port de Saint-Nazaire, en 2016, les séries marégraphiques ont fait l'objet d'un travail de reconstruction par le Shom. La durée d'observation est donc passée de 25 ans en 2012 à 117 ans en 2022 ;
- les séries marégraphiques au port de Saint-Malo ont aussi fait l'objet d'un travail de reconstruction par le Shom avec 20 années de données supplémentaires. La validation des données était toujours en cours à la date d'écriture de rapport. Les données reconstruites n'ont donc pas été utilisées pour le résultat officiel, mais seulement pour une étude de sensibilité sur la durée d'observation [Cerema et Shom, 2022]. L'estimation centennale produite par le rapport est la même avec et sans la partie reconstruite ;
- dans l'étude 2022 et pour le seul port de Saint-Malo, il a été introduit un modèle de dépendance "marée surcote" afin de prendre en compte la surestimation apparente par la méthode traditionnelle ;
- depuis 2012, il a été remarqué au port de Dieppe une saturation du marégraphe pour les mesures avant 1990 (plafonnement à 9,99 m ZH). La méthode utilisée ne permet pas l'exploitation des données plafonnées. Les données avant 1990 n'ont donc pas été traitées, car elles faussaient le résultat. La durée d'observation est donc passée de 38 ans en 2012 à 18 ans en 2022 ;
- l'ajout de deux nouveaux ports de référence sur la façade Manche-Atlantique qui ont atteint les dix années de mesure en 2022, les ports du Crouesty (56) et de l'île d'Aix (17).

1.2.2 - ACTUALISATION LE LONG DU TRAIT DE CÔTE ENTRE LES PORTS DE RÉFÉRENCE

Les limites identifiées sur l'étude 2012 qui ont été levées (ou contournées) par l'étude 2022 sont les suivantes :

- les incertitudes sur les prédictions de marée et sur la méthode d'ajustement statistique n'étaient pas renseignées en 2012 ;
- la référence altimétrique n'était pas la même à la côte (0 IGN69) et au large (le niveau moyen). Les données BathyElli¹ permettant de référencer le niveau moyen au large à l'IGN69 n'existaient pas encore ;
- pour les points de calage au large (ports secondaires), il était considéré que les surcotes atmosphériques au large étaient proportionnelles aux surcotes aux ports de référence, alors qu'il a été montré que ces dernières sont sensibles à la bathymétrie et à l'orientation du trait de côte ;
- l'interpolation était effectuée directement sur les niveaux, ne prenant pas en compte les éventuelles modulations de marée et de surcote atmosphérique entre les points de calage ;
- certaines zones géographiques n'étaient pas contraintes par les ports secondaires avec des résultats jugés peu fiables (en baie du Mont-Saint-Michel par exemple).

En changeant de méthode et en se limitant à une estimation des valeurs extrêmes de niveau d'eau le long du trait de côte, l'étude 2022 a permis de contourner les limites liées à l'interpolation spatiale de 2012.

La méthode d'interpolation entre les ports de référence utilisée ici est donc très différente de celle de 2012. Les présents résultats sont considérés comme plus fiables et sont mieux renseignés en termes d'incertitude.

1.3 - DONNÉES UTILISÉES POUR LES ESTIMATIONS DE VALEURS EXTRÊMES DE NIVEAUX D'EAU DANS 33 PORTS DE RÉFÉRENCE ET LE LONG DU LITTORAL

La méthode repose sur l'utilisation de données aux ports de référence et sur l'interpolation des résultats entre ces ports.

1.3.1 - LES PORTS DE RÉFÉRENCE

Dans la continuité de l'étude du Shom Cetmef de 2012, un port de référence désigne un port disposant d'une durée d'observation cumulée égale ou supérieure à 10 ans. Les observations utilisées sont les données de hauteur d'eau « validées horaires » du réseau de marégraphes REFMAR géré par le Shom (<https://refmar.shom.fr>).

Listés dans le tableau ci-après, les 33 ports de référence se composent de 22 ports sur la façade Manche-Atlantique, 11 sur le littoral métropolitain de Méditerranée dont 3 en Corse. À noter, par manque de point de calage en Corse, que le port de Solenzara est inclus même s'il dispose d'une durée d'observation légèrement inférieure à 10 ans. De plus, le port d'Arcachon n'est pas utilisé pour les calculs d'interpolation de niveau d'eau à l'extérieur du bassin d'Arcachon, du fait de son emplacement à l'intérieur du bassin. À Sète, les données REFMAR ont été complétées par le travail du Cerema [CETE, 2010].

En Manche-Atlantique, il est adopté une approche indirecte basée sur la convolution de la marée et de la surcote, avec des données de prédiction de marée et, pour le calcul des surcotes, des données d'observation aux marégraphes.

Sur cette façade Manche-Atlantique, les prédictions de marée aux ports de référence sont calculées avec le logiciel de marée du Shom (MAS) à partir des constantes harmoniques officielles. Ces prédictions sont référencées au ZH et à l'IGN69 en utilisant les niveaux du produit RAM 2020 [Shom, 2020].

En Méditerranée, il est choisi une approche directe utilisant seulement les observations aux marégraphes.

⁽¹⁾ <https://diffusion.shom.fr/donnees/references-verticales/surfaces-bathyelli-v2-1.html>

Ports de référence et périodes d'observation associées

Port	Dates d'observation	Durée d'observation	Lacunes	ZH / Ref *	Ref
Manche-Atlantique					
ARCACHON	du 27/11/1967 au 30/12/2021	21,05 ans	61%	- 1,98 m	IGN69
BOULOGNE-SUR-MER	du 20/11/1941 au 31/12/2021	34,13 ans	57%	- 4,382 m	IGN69
BREST	du 04/01/1846 au 31/12/2021	159,82 ans	9%	- 3,635 m	IGN69
BAYONNE BOUCAU	du 22/05/1967 au 02/07/2021	42,72 ans	21%	- 2,143 m	IGN69
CALAIS	du 03/05/1941 au 31/12/2021	43,51 ans	46%	- 3,459 m	IGN69
CHERBOURG	du 30/03/1943 au 31/12/2021	47,48 ans	40%	- 3,285 m	IGN69
CONCARNEAU	du 28/06/1999 au 24/09/2021	22,02 ans	1%	- 2,534 m	IGN69
LE CONQUET	du 21/12/1970 au 31/12/2021	49,16 ans	4%	- 3,503 m	IGN69
DIEPPE	du 31/12/1953 au 31/12/2021	49,96 ans	26%	- 4,454 m	IGN69
DUNKERQUE	du 06/06/1956 au 27/06/2021	52,58 ans	19%	- 2,693 m	IGN69
ILE D'AIX	du 08/01/1973 au 31/12/2021	10,00 ans	79%	- 3,505 m	IGN69
LE CROUESTY	du 14/03/1996 au 04/10/2021	17,04 ans	33%	- 2,85 m	IGN69
LE HAVRE	du 04/01/1938 au 04/10/2021	51,49 ans	39%	- 4,375 m	IGN69
LA ROCHELLE LA PALLICE	du 18/05/1941 au 31/12/2021	37,60 ans	53%	- 3,503 m	IGN69
PORT-BLOC	du 18/04/1959 au 31/12/2021	32,98 ans	47%	- 2,831 m	IGN69
PORT-TUDY	du 10/08/1966 au 31/12/2021	46,28 ans	16%	- 2,742 m	IGN69
ROSCOFF	du 06/04/1973 au 31/12/2021	46,17 ans	5%	- 4,764 m	IGN69
SAINT-GILDAS	du 06/06/1962 au 27/06/2017	45,68 ans	17%	- 3,078 m	IGN69
SAINT-JEAN- DE-LUZ SOCOA	du 20/11/1942 au 04/10/2021	46,48 ans	41%	- 2,173 m	IGN69
SAINT-MALO	du 09/04/1986 au 31/12/2021	27,43 ans	23%	- 6,289 m	IGN69
SAINT-NAZAIRE	du 25/05/1821 au 31/12/2021	116,57 ans	42%	- 3,16 m	IGN69
LES SABLES- D'OLONNE	du 05/07/1965 au 31/12/2021	31,48 ans	44%	- 2,828 m	IGN69
Méditerranée (métropole)					
FOS-SUR-MER	du 31/01/2006 au 20/09/2021	11,24 ans	28%	- 0,334 m	IGN69
LA FIGUEIRETTE	du 26/05/2011 au 04/10/2021	10,12 ans	2%	- 0,329 m	IGN69
MONACO FONTVIEILLE	du 31/12/1959 au 31/03/2022	29,12 ans	53%	- 0,336 m	IGN69
MARSEILLE	du 01/11/1849 au 31/03/2022	52,86 ans	69%	- 0,329 m	IGN69
NICE	du 03/07/1981 au 01/03/2021	22,74 ans	43%	- 0,344 m	IGN69
PORT-VENDRES	du 28/12/1981 au 02/07/2021	28,40 ans	28%	- 0,391 m	IGN69
SÈTE	du 23/04/1956 au 31/03/2022	41,88 ans	36%	- 0,307 m	IGN69
TOULON	du 31/12/1960 au 28/09/2020	33,65 ans	44%	- 0,253 m	IGN69
Méditerranée (Corse)					
AJACCIO ASPRETTO	du 25/07/1981 au 31/03/2022	21,02 ans	48%	- 0,367 m	IGN78
CENTURI	du 21/10/2010 au 04/10/2021	10,20 ans	7%	- 0,35 m	IGN78
SOLENZARA	du 16/04/1977 au 31/03/2022	9,58 ans	79%	- 0,479 m	IGN78

(*) Références altimétriques maritimes [Shom,2020]

Ports de référence



1.3.2 - LE TRAIT DE CÔTE ENTRE LES PORTS DE RÉFÉRENCE

Pour les calculs le long du littoral entre les ports, le trait de côte est discrétisé en 4 727 points, soit 1 point environ tous les kilomètres. Dans le détail, il se compose de 2 579 points en Manche-Atlantique, 1 375 points sur le littoral continental de Méditerranée et 773 en Corse. Sur chacun d'entre eux, une estimation des valeurs extrêmes de niveau d'eau est produite.

Les données utilisées sont :

- des simulations de surcotes horaires le long du littoral : surcotes du 01/07/2010 au 30/07/2014 issues du projet HOMONIM² [Pasquet et al., 2013, 2015, 2016, 2021] et fournies par le Shom ;
- en Manche-Atlantique seulement, des prédictions calculées sur 18 ans à partir du modèle Shom cstFRANCE et ramenées à l'IGN69 en utilisant les surfaces de conversion BathyElli v2.0³ et RAF2018⁴.

En Manche-Atlantique, les points de calcul sont extraits de la grille de calcul de marée du Shom (jusqu'à 500 mètres des côtes environ).

En Méditerranée, les points de calcul sont localisés sur le trait de côte (HISTOLITT® 2012).

⁽²⁾ Modélisation HYCOM, configuration ATL V4 et MED V3, forçages météorologiques Arpège horaires fournis par Météo-France.

⁽³⁾ diffusion.shom.fr/donnees/references-verticales/surface-zero-hydrographique-bathyelli-20.html

⁽⁴⁾ geodesie.ign.fr/index.php?page=grilles

1.4 - MÉTHODE DE CALCUL AUX PORTS DE RÉFÉRENCE

Avant de mettre en œuvre les méthodes d'analyse statistique, il est nécessaire de corriger les observations de niveau d'eau des variations pluriannuelles associées à l'eustatisme et aux échelles de temps plus élevées (émersion et subsidence des continents). La méthode utilisée est présentée en annexe 2.

En Manche-Atlantique, la méthode d'analyse statistique utilisée est la méthode dite de « convolution marée surcote ». Une description détaillée de la méthode est fournie en annexe 3. Les grandes étapes sont décrites ci-après.

Seuls les niveaux de pleine mer sont pris en compte. Les surcotes de pleine mer sont extraites des observations. L'analyse des extrêmes est effectuée sur ces surcotes. Pour ce faire, une loi statistique des valeurs extrêmes est ajustée sur les pics de tempêtes. Cette loi permet d'établir les périodes de retour des observations de surcote, mais aussi par extrapolation les périodes de retour des valeurs plus élevée. Nous obtenons ainsi la distribution de probabilité des surcotes de pleine mer.

Les marées se produisant presque à l'identique tous les 18 ans, la distribution de probabilité des marées de pleine mer est calculée par une simple analyse empirique des marées prédites sur 18 ans.

La convolution marée surcote permet de mixer ces deux distributions de probabilité et ainsi calculer la probabilité (et donc la période de retour) associée à la combinaison des deux.

Une particularité sur le port de Saint-Malo est à noter. Il y a été introduit dans la convolution une contrainte de dépendance entre la marée et la surcote. Cela s'explique par la localisation géographique particulière du port, avec de grandes variations des marées de pleine mer et des interactions avec les surcotes.

En Manche-Atlantique, la décomposition marée surcote est imposée par la théorie des valeurs extrêmes, qui veut que l'ajustement statistique sur les pics de tempête se fasse sur des données stationnaires (donc non modulées par un signal de marée).

En Méditerranée, les variations de marée sont beaucoup plus faibles. Les observations aux ports peuvent donc être considérées comme stationnaires. La décomposition marée surcote n'est plus obligatoire et l'analyse des extrêmes est effectuée directement sur les niveaux d'eau. Pour ce faire, une loi statistique des valeurs extrêmes est ajustée sur les pics de tempêtes de niveaux d'eau. Le résultat fournit directement les périodes de retour associées.

Aux ports de référence, la méthode est relativement similaire à celles utilisées dans les publications de référence précédentes (Shom-Cetmef, 2012 ; Cerema, 2013 ; Cerema, 2018). En Manche-Atlantique, du fait des fluctuations importantes de marée, il est adopté une approche indirecte (calcul des probabilités de marée et de surcote de pleine mer, et combinaison des deux par une méthode dite de « convolution »). En Méditerranée, il est adopté une approche directe (ajustement d'une loi statistique des valeurs extrêmes directement sur les observations aux ports).

1.5 - MÉTHODE D'INTERPOLATION LE LONG DU TRAIT DE CÔTE

Les résultats obtenus aux ports de référence sont interpolés entre les ports le long du trait de côte. Une description détaillée de la méthode est fournie en annexe 3. Les grandes étapes sont décrites ci-après.

Il est utilisé une interpolation 1D basée sur la distance aux deux ports de référence (et eux seuls) encadrant le point de calcul. Pour simplifier, pour un point à équidistance de deux ports, il est calculé la moyenne des résultats des deux ports. Si le point d'interpolation est à 25 kilomètres du port de gauche et 75 kilomètres du port de droite, le port de gauche (plus proche) pèsera pour 75 % dans la moyenne et celui de droite (plus éloigné) pour 25 %. Pour calculer les distances, le trait de côte est déroulé et lissé.

Cela permet d'interpoler directement les niveaux d'eau calculés aux ports de référence. Mais ne sont pas prises en compte les variations locales de marée et de surcote entre les ports, variations liées à la bathymétrie et la morphologie des côtes.

En Manche-Atlantique, pour prendre en compte les variations locales de marée, il est choisi d'utiliser les prédictions de marée entre les ports, prédictions disponibles auprès du Shom. Seules les surcotes de pleine mer calculées aux ports sont interpolées. Au point d'interpolation, les périodes de retour de niveaux d'eau sont donc obtenues en combinant la distribution de marée calculée par le Shom avec la distribution de surcote interpolée.

Toujours en Manche-Atlantique pour prendre en compte les variations locales de surcote, le résultat de l'interpolation des surcotes est modulé par un facteur d'amplification ou de diminution. Ce facteur est calculé en tous points du littoral à partir des simulations numériques de surcote HOMONIM.

En Méditerranée, les modèles de marée ne sont pas assez précis pour exploiter les marées prédites entre les ports. Il est donc choisi la méthode d'interpolation des niveaux d'eau calculés aux ports de référence, sans prise en compte des variations locales de marée et de surcote entre les ports.

Les résultats le long du trait de côte sont obtenus par interpolation des valeurs aux ports de référence les plus proches. Seuls les deux ports encadrant le point d'interpolation sont utilisés.

Sur le littoral Manche-Atlantique, il est pris en compte les variations locales de marée et de surcote entre les ports. Pour ce faire, la marée est celle prédite au point d'interpolation (pas d'interpolation pour la marée) et les surcotes sont interpolées, mais modulées par un facteur local d'amplification issue de l'analyse des données HOMONIM. Les distributions de niveaux sont obtenues par convolution de la marée (prédite) avec la surcote (interpolée et modulée).

Sur le littoral méditerranéen, il est effectué une interpolation directe des niveaux aux ports de référence. Les éventuels effets locaux de modulation entre les ports ne sont pas pris en compte.



© Terra - Arnaud Bouissou



© AdobeStock - AlceVision

CHAPITRE 2

Limites associées aux résultats et conseils d'utilisation de l'ouvrage

LIMITES ASSOCIÉES AUX RÉSULTATS ET CONSEILS D'UTILISATION DE L'OUVRAGE

2.1 - PRINCIPALES LIMITES

Les incertitudes et limites sont présentées dans le détail en annexe 4.

Deux types d'intervalle de confiance sont fournis aux ports de référence :

- pour juger de la qualité du résultat, l'intervalle sur les observations (noté sur les figures « IC Obs. ») dans lequel doivent être comprises les observations si elles sont bien issues de la loi paramétrique calculée ;
- pour renseigner l'incertitude sur les estimations de périodes de retour, l'intervalle lié au nombre de pics de tempête sélectionnés pour l'ajustement statistique (incertitude d'échantillonnage noté sur les figures « IC Ajust. » ou simplement « IC »).

Les principales limitations impactant la compréhension ou l'utilisation du présent ouvrage sont les suivantes :

- les niveaux d'eau calculés sont assimilés au niveau d'eau sans l'action des vagues, si nécessaire il convient donc d'ajouter le *wave set-up* ou le *wave run-up* ;
- les incertitudes liées aux prédictions de marée sont de ± 15 cm dans les ports de référence et ± 25 cm entre les ports de référence (intervalle de confiance à 95 %) ;
- les incertitudes statistiques liées à la méthode d'ajustement des valeurs extrêmes sont calculées pour les ports et les points du trait de côte (intervalle de confiance à 70 % et 95 %) ;
- le niveau d'eau moyen pris en référence est celui de 2022 dans les ports de référence (niveau renseigné port par port au §3 de l'ouvrage, si besoin de changement de référence) et celui de 2000 entre les ports de référence ;
- contrairement au littoral Manche-Atlantique, 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.

La prise en compte de l'incertitude statistique montre de manière générale que la méthode utilisée ici est plutôt adaptée jusqu'aux périodes de retour 100 ans, voire 50 ans pour certains ports de Méditerranée et 1000 ans pour certains ports de Manche-Atlantique. Pour les périodes de retour élevées (en particulier si l'on s'intéresse aux périodes de retour 1000 ans et plus), il est préférable d'adopter une approche différente de celle mise en œuvre ici (voir l'apport de données historiques et régionales en annexe 5).

L'analyse est jugée 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) ;
 - surestimés au voisinage du Cap de Pertusato ;
 - sous-estimés entre Port-Vendres et Sète et entre Nice et Monaco.

En synthèse, les niveaux calculés ne prennent pas en compte la surcote liée aux vagues ni la remontée du niveau d'eau à venir liée au changement climatique. Les résultats sont meilleurs aux ports de référence et moins bons en fond en baie. Les interpolations sont un peu moins pertinentes en Méditerranée, avec en Manche-Atlantique un point de vigilance autour du Havre et de Bayonne. Pour les périodes de retour supérieures à 100 voire 1000 ans (fonction des ports), la méthode utilisée ici n'est pas forcément la plus adaptée.

2.2 - CONSEILS POUR L'UTILISATION DES DONNÉES

2.2.1 - PÉRIODE DE RETOUR MAXIMALE EXPLOITABLE

La confiance accordée sur le résultat peut être appréciée par les intervalles de confiance statistique fournis. Cela montre une certaine disparité sur le territoire. De manière générale :

- plus la durée d'observation est élevée, plus la projection sur des périodes de retour élevées est fiable ;
- pour les deux lois de valeurs extrêmes testées (GPD⁵ et exponentielle), l'intervalle de confiance est plus faible pour la loi exponentielle, mais repose sur l'hypothèse non vérifiée que ce soit une loi exponentielle ;
- les intervalles de confiance sur les niveaux sont plus importants en Méditerranée qu'en Manche-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 vingtennale à Centuri.

D'autres méthodes d'analyse non mises en œuvre ici (analyse régionale et/ou exploitant les données historiques) sont développées pour l'estimation des périodes de retour supérieures ou égales à 1000 ans (voir annexe 5).

2.2.2 - 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-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.

La loi exponentielle correspond en fait à une GPD pour laquelle le paramètre de forme est fixé arbitrairement à zéro (moins de variables donc l'intervalle de confiance est réduit, mais l'hypothèse n'est pas vérifiée). Elle est testée en complément de la GPD, car souvent elle offre un choix alternatif plus sécuritaire.

Pour un choix entre un ajustement statistique des valeurs extrêmes par GPD ou par loi exponentielle, la loi exponentielle a tendance à être plus sécuritaire, tandis que la GPD reflète mieux les intervalles de confiance.

2.2.3 - 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. L'incertitude aux ports correspond à l'incertitude du modèle de marée. Elle se répercute directement sur les calculs de surcotes (sur l'exploitation des données REFMAR comme pour les bases de données de surcotes historiques).

L'incertitude en dehors des ports correspond à l'incertitude du modèle de marée à laquelle s'ajoute l'incertitude du référencement du zéro hydrographique (référence altimétrique maritime) à l'IGN (référence altimétrique terrestre).

Si besoin, 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.

⁽⁵⁾ Generalized Pareto Distribution.

2.2.4 - PRISE EN COMPTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le changement climatique peut être pris en compte dans le niveau marin retenu en première approximation par l'ajout de l'élévation du niveau d'eau moyen. Le niveau moyen étant une variable, il est important de se référer à son année de référence.

Pour les ports de référence, l'année de référence est ici 2022. Attention, les valeurs peuvent donc différer de celles diffusées par le Shom dans le produit « Références altimétriques maritimes (Ram) » où seulement une partie des sites est mise à jour chaque année.

Entre les ports de référence, l'année de référence est 2000 (année de référence BathyElli).

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.

La surélévation du niveau d'eau liée au changement climatique peut être quantifiée avec les dernières estimations du GIEC (par exemple <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>).

2.2.5 - CARACTÉRISATION DE L'ALÉA SUBMERSION MARINE

Dans le cadre de la réalisation d'études d'aléa submersion marine, il est recommandé de réaliser une analyse des événements tempétueux historiques et des niveaux marins qu'ils ont engendrés à la côte. Ces niveaux marins ne sont pas directement comparables aux niveaux produits ici, puisqu'il ne s'agit en général pas de mesures issues de marégraphes. En revanche, ils permettent d'apporter une information de niveaux atteints en conditions exceptionnelles. La confrontation de ces niveaux aux niveaux marins statistiques centennaux à la côte (intégrant une composante de surcote liée aux vagues) permet de déterminer l'événement de référence à retenir dans le cadre d'études d'aléa submersion marine, notamment dans le cadre des études préalables à l'élaboration de PPRL.

Pour des événements historiques de référence, la base de données du groupe de travail Tempêtes et submersions historiques (<https://bddtsh.irsnn.fr>) peut être consultée.

L'analyse des événements tempétueux historiques et des niveaux marins engendrés à la côte est complémentaire et nécessaire à la confrontation aux résultats du présent ouvrage.



© AdobeStock - Christian Müller



© AdobeStock - Teddi

CHAPITRE 3

Résultats en Manche- Atlantique

MANCHE-ATLANTIQUE

3.1 - RÉSULTAT PAR PORT

3.1.1 - DUNKERQUE

La durée d'observation cumulée est de 52,58 années, s'étalant du 06/06/1956 au 27/06/2021.

Dunkerque – Paramètres d'ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,49 m	s0 =	0,49 m
n =	9,602850	n =	9,602850
σ =	0,146450	ρ =	7,216140
ξ =	-0,056703		

Rappel
Pour la surcote s associée à la période de retour $Tret$:

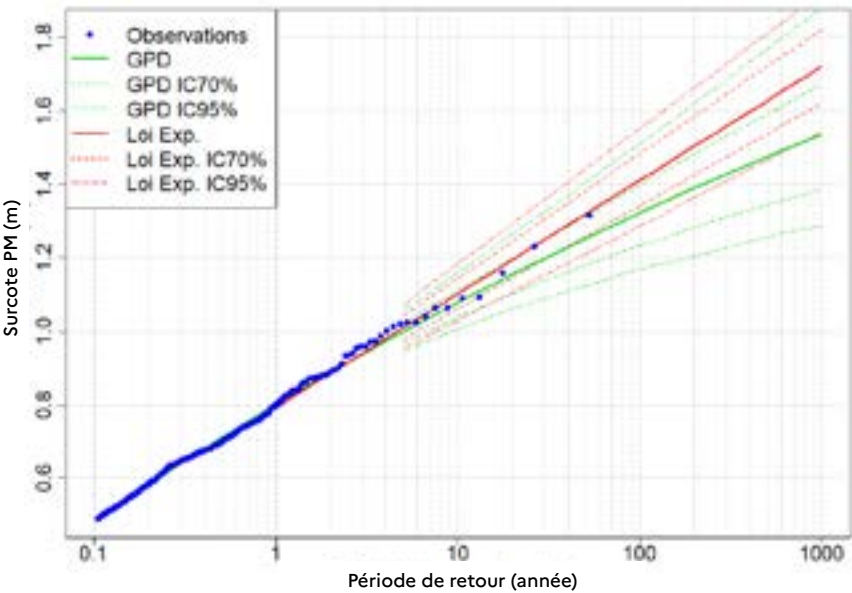
GPD : $Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s0) \right)^{(1/\xi)}$

Loi Exp. : $Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s0))$

Dunkerque – Périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote PM

Période de retour	GPD			Loi Exp.	Loi Exp.	
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	1,00 m	0,97 m à 1,03 m	0,94 m à 1,05 m	1,03 m	1,00 m à 1,05 m	0,98 m à 1,07 m
10 ans	1,08 m	1,03 m à 1,11 m	1,00 m à 1,15 m	1,12 m	1,09 m à 1,15 m	1,07 m à 1,18 m
20 ans	1,16 m	1,10 m à 1,20 m	1,05 m à 1,25 m	1,22 m	1,18 m à 1,25 m	1,16 m à 1,28 m
50 ans	1,25 m	1,17 m à 1,32 m	1,12 m à 1,39 m	1,35 m	1,30 m à 1,39 m	1,27 m à 1,42 m
100 ans	1,32 m	1,23 m à 1,40 m	1,16 m à 1,49 m	1,44 m	1,40 m à 1,49 m	1,36 m à 1,52 m
200 ans	1,39 m	1,28 m à 1,49 m	1,20 m à 1,60 m	1,54 m	1,49 m à 1,59 m	1,45 m à 1,63 m
500 ans	1,48 m	1,34 m à 1,60 m	1,25 m à 1,73 m	1,66 m	1,61 m à 1,72 m	1,57 m à 1,77 m
1 000 ans	1,54 m	1,38 m à 1,68 m	1,28 m à 1,84 m	1,76 m	1,70 m à 1,82 m	1,65 m à 1,87 m

Dunkerque – Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

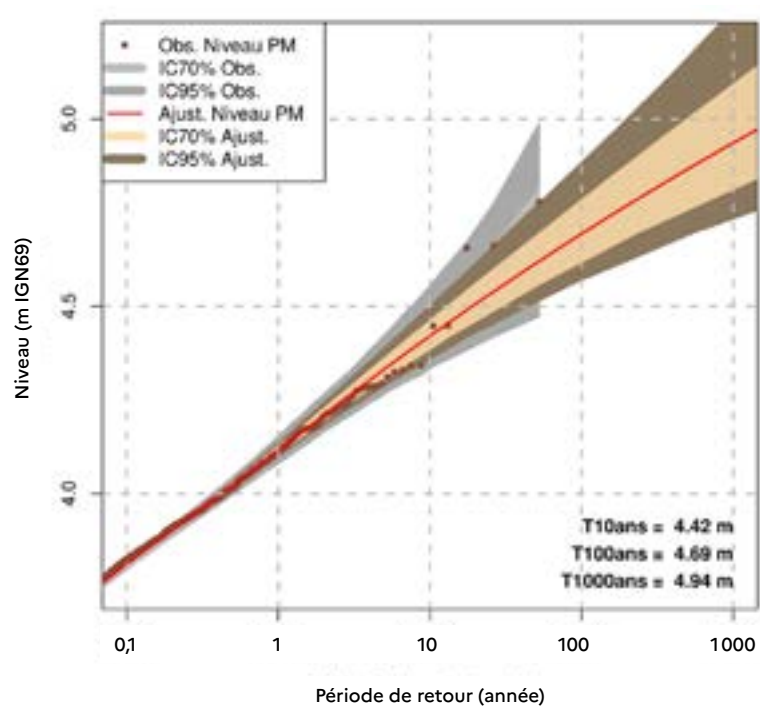


Niveau moyen pris en référence : 0,62 m IGN69.

Dunkerque – Périodes de retour des valeurs extrêmes de niveaux PM

Période de retour	Niveau PM (IGN69)		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	4,33 m	4,31 m à 4,36 m	4,29 m à 4,39 m
10 ans	4,42 m	4,39 m à 4,46 m	4,36 m à 4,50 m
20 ans	4,51 m	4,46 m à 4,56 m	4,43 m à 4,62 m
50 ans	4,61 m	4,55 m à 4,69 m	4,51 m à 4,77 m
100 ans	4,69 m	4,62 m à 4,78 m	4,57 m à 4,89 m
200 ans	4,77 m	4,68 m à 4,88 m	4,62 m à 5,00 m
500 ans	4,87 m	4,76 m à 5,00 m	4,69 m à 5,17 m
1 000 ans	4,94 m	4,81 m à 5,09 m	4,73 m à 5,29 m

Dunkerque – Valeurs extrêmes de niveau PM estimées par la convolution marée-surcote



3.1.2 - CALAIS

La durée d’observation cumulée est de 43,51 années, s’étalant du 03/05/1941 au 31/12/2021.

Calais – Paramètres d’ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,38 m	s0 =	0,38 m
n =	8,113088	n =	8,113088
σ =	0,110457	ρ =	9,504592
ξ =	-0,049739		

Rappel
Pour la surcote s associée à la période de retour $Tret$:

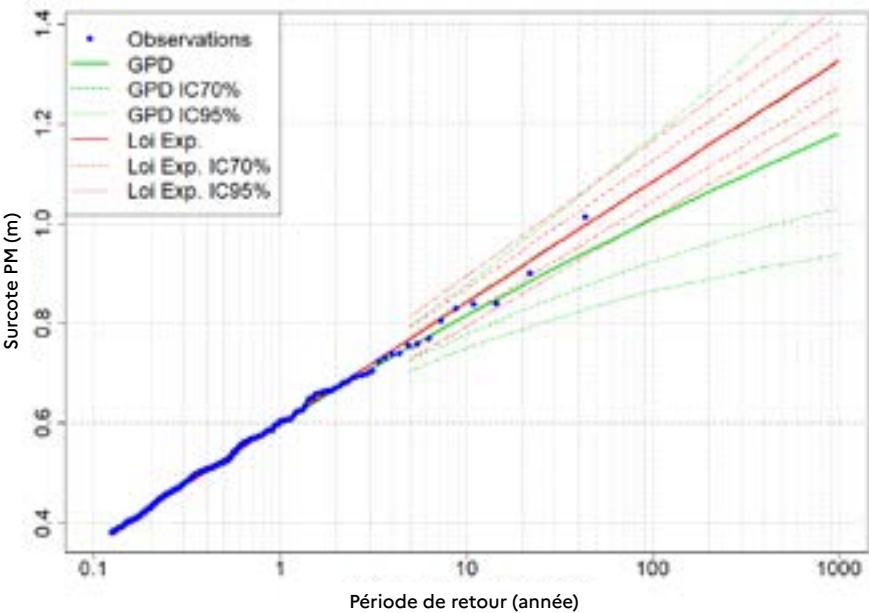
GPD : $Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s0) \right)^{(1/\xi)}$

Loi Exp. : $Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s0))$

Calais – Périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote PM

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

Calais – Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

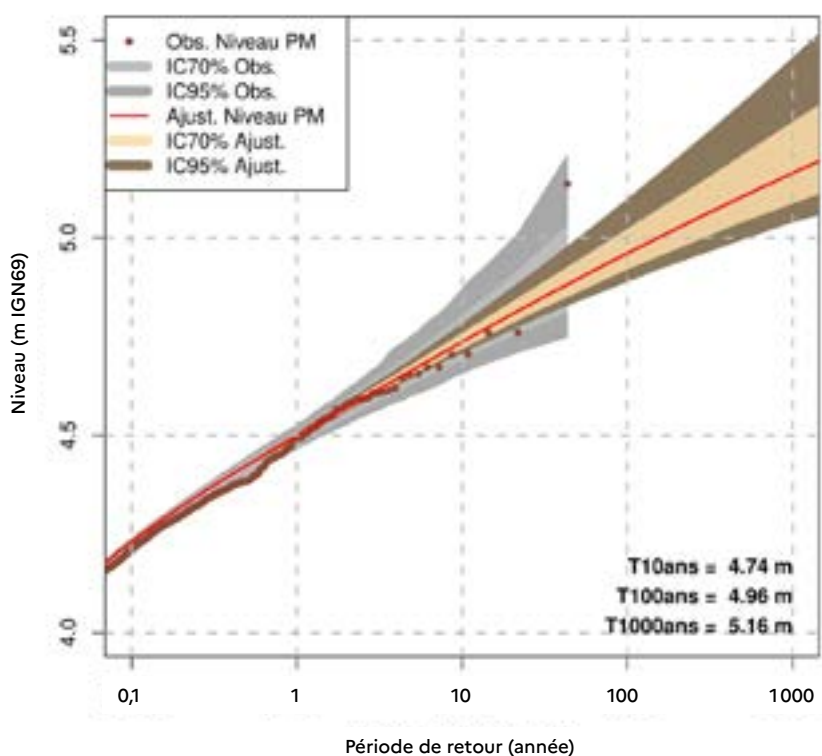


Niveau moyen pris en référence : 0,58 m IGN69.

Calais – Périodes de retour des valeurs extrêmes de niveaux PM

Période de retour	Niveau PM (IGN69)	Niveau PM	
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	4,66 m	4,65 m à 4,68 m	4,65 m à 4,69 m
10 ans	4,74 m	4,72 m à 4,76 m	4,71 m à 4,78 m
20 ans	4,81 m	4,78 m à 4,84 m	4,77 m à 4,87 m
50 ans	4,90 m	4,86 m à 4,94 m	4,84 m à 5,00 m
100 ans	4,96 m	4,92 m à 5,02 m	4,89 m à 5,10 m
200 ans	5,02 m	4,97 m à 5,10 m	4,94 m à 5,20 m
500 ans	5,10 m	5,04 m à 5,21 m	5,00 m à 5,34 m
1 000 ans	5,16 m	5,09 m à 5,29 m	5,04 m à 5,46 m

Calais – Valeurs extrêmes de niveau PM estimées par la convolution marée-surcote



3.1.3 - BOULOGNE-SUR-MER

La durée d'observation cumulée est de 34,13 années, s'étalant du 20/11/1941 au 31/12/2021.

Boulogne-sur-Mer – Paramètres d'ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,50 m	s0 =	0,50 m
n =	2,464121	n =	2,464121
σ =	0,099598	ρ =	9,012685
ξ =	0,102065		

Rappel

Pour la surcote s associée à la période de retour T_{ret} :

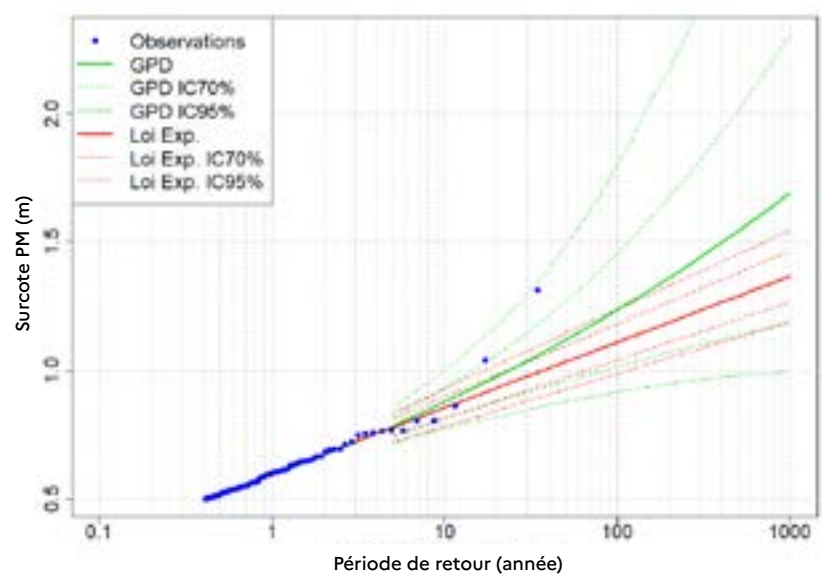
$$\text{GPD : } T_{ret} = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s_0) \right)^{(1/\xi)}$$

$$\text{Loi Exp. : } T_{ret} = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s_0))$$

Boulogne-sur-Mer – Périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote PM

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,79 m	0,74 m à 0,82 m	0,71 m à 0,86 m	0,78 m	0,75 m à 0,81 m	0,72 m à 0,84 m
10 ans	0,88 m	0,81 m à 0,93 m	0,76 m à 0,99 m	0,86 m	0,81 m à 0,90 m	0,78 m à 0,93 m
20 ans	0,98 m	0,87 m à 1,06 m	0,81 m à 1,16 m	0,93 m	0,88 m à 0,99 m	0,84 m à 1,02 m
50 ans	1,12 m	0,95 m à 1,26 m	0,86 m à 1,44 m	1,03 m	0,97 m à 1,10 m	0,92 m à 1,15 m
100 ans	1,24 m	1,00 m à 1,43 m	0,89 m à 1,70 m	1,11 m	1,04 m à 1,19 m	0,98 m à 1,24 m
200 ans	1,36 m	1,06 m à 1,63 m	0,93 m à 2,01 m	1,19 m	1,11 m à 1,27 m	1,04 m à 1,33 m
500 ans	1,54 m	1,13 m à 1,94 m	0,96 m à 2,57 m	1,29 m	1,20 m à 1,39 m	1,12 m à 1,46 m
1 000 ans	1,69 m	1,18 m à 2,22 m	0,99 m à 3,10 m	1,37 m	1,27 m à 1,47 m	1,18 m à 1,55 m

Boulogne-sur-Mer – Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

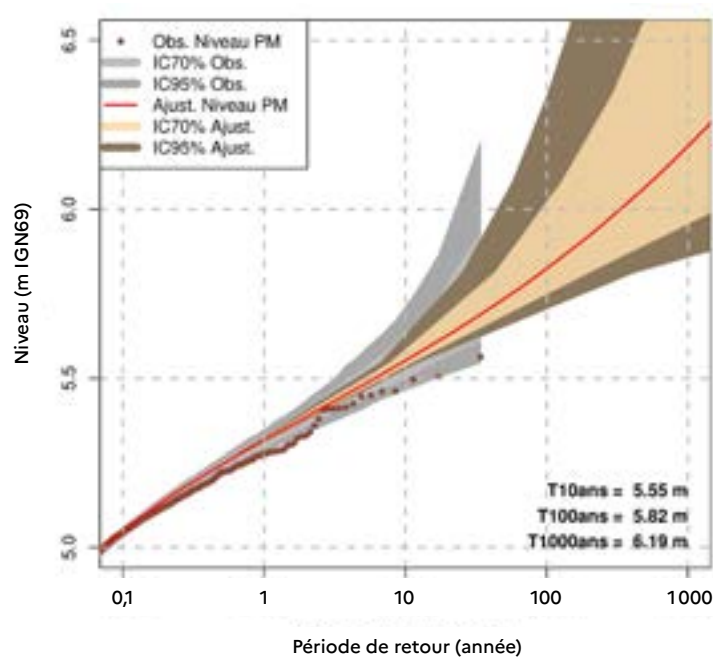


Niveau moyen pris en référence : 0,61 m IGN69.

Boulogne-sur-Mer – Périodes de retour des valeurs extrêmes de niveaux PM

Période de retour	Niveau PM (IGN69)		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	5,48 m	5,47 m à 5,50 m	5,46 m à 5,51 m
10 ans	5,55 m	5,54 m à 5,58 m	5,53 m à 5,63 m
20 ans	5,63 m	5,60 m à 5,69 m	5,58 m à 5,77 m
50 ans	5,74 m	5,69 m à 5,85 m	5,65 m à 6,04 m
100 ans	5,82 m	5,75 m à 6,02 m	5,71 m à 6,33 m
200 ans	5,92 m	5,81 m à 6,22 m	5,76 m à 6,74 m
500 ans	6,07 m	5,90 m à 6,57 m	5,82 m à 7,53 m
1 000 ans	6,19 m	5,96 m à 6,91 m	5,86 m à 8,31 m

Boulogne-sur-Mer – Valeurs extrêmes de niveau PM estimées par la convolution marée-surcote



3.1.4 - DIEPPE

La durée d'observation cumulée est de 18,92 années, s'étalant du 03/05/1993 au 31/12/2021⁽⁵⁾.

Dieppe – Paramètres d'ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,34 m	s0 =	0,51 m
n =	9,784138	n =	1,116668
σ =	0,074299	ρ =	6,019898
ξ =	0,174845		

Rappel

Pour la surcote s associée à la période de retour T_{ret} :

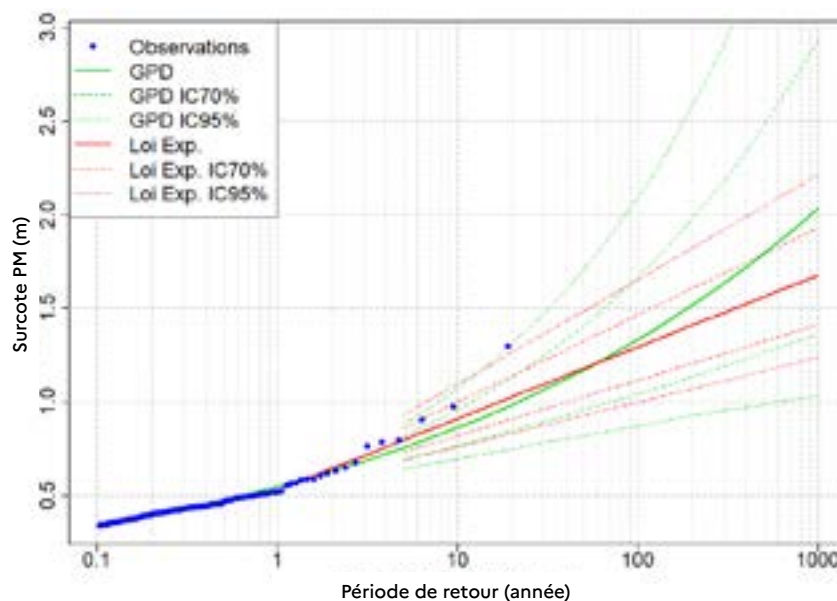
$$\text{GPD : } T_{ret} = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s - s_0) \right)^{1/\xi}$$

$$\text{Loi Exp. : } T_{ret} = \frac{1}{n} \exp(\rho(s - s_0))$$

Dieppe – Périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote PM

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,75 m	0,69 m à 0,81 m	0,65 m à 0,89 m	0,80 m	0,73 m à 0,86 m	0,69 m à 0,93 m
10 ans	0,86 m	0,77 m à 0,96 m	0,71 m à 1,10 m	0,91 m	0,82 m à 0,99 m	0,77 m à 1,10 m
20 ans	0,98 m	0,85 m à 1,13 m	0,76 m à 1,35 m	1,03 m	0,92 m à 1,13 m	0,84 m à 1,27 m
50 ans	1,17 m	0,96 m à 1,41 m	0,83 m à 1,75 m	1,18 m	1,03 m à 1,32 m	0,94 m à 1,49 m
100 ans	1,33 m	1,05 m à 1,66 m	0,88 m à 2,16 m	1,29 m	1,13 m à 1,46 m	1,02 m à 1,66 m
200 ans	1,51 m	1,14 m à 1,98 m	0,93 m à 2,73 m	1,41 m	1,22 m à 1,60 m	1,09 m à 1,83 m
500 ans	1,79 m	1,27 m à 2,49 m	1,00 m à 3,66 m	1,56 m	1,34 m à 1,78 m	1,19 m à 2,06 m
1 000 ans	2,03 m	1,38 m à 2,99 m	1,05 m à 4,64 m	1,68 m	1,43 m à 1,92 m	1,26 m à 2,23 m

Dieppe – Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM



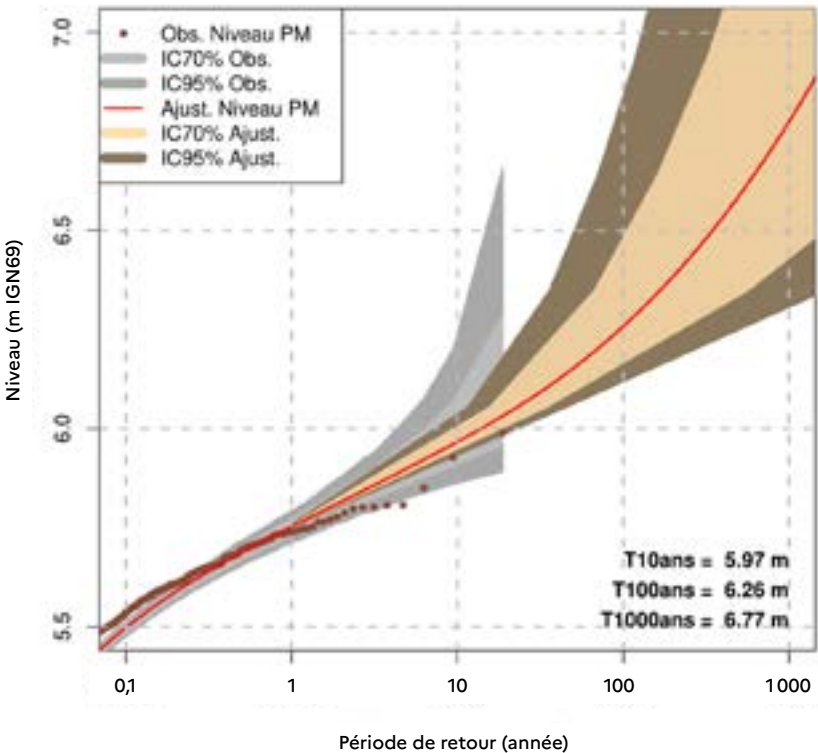
⁽⁵⁾ À noter que les observations antérieures à 1993 n'ont pas été prises en compte du fait d'un phénomène de saturation du marégraphe.

Niveau moyen pris en référence : 0,61 m IGN69.

Dieppe – Périodes de retour des valeurs extrêmes de niveaux PM

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

Dieppe – Valeurs extrêmes de niveau PM estimées par la convolution marée-surcote



3.1.5 - LE HAVRE

La durée d’observation cumulée est de 51,49 années, s’étalant du 04/01/1938 au 04/10/2021.

Le Havre – Paramètres d’ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,48 m	s0 =	0,66 m
n =	4,928073	n =	1,110277
σ =	0,130083	ρ =	5,453939
ξ =	0,071739		

Rappel
Pour la surcote *s* associée à la période de retour *Tret* :

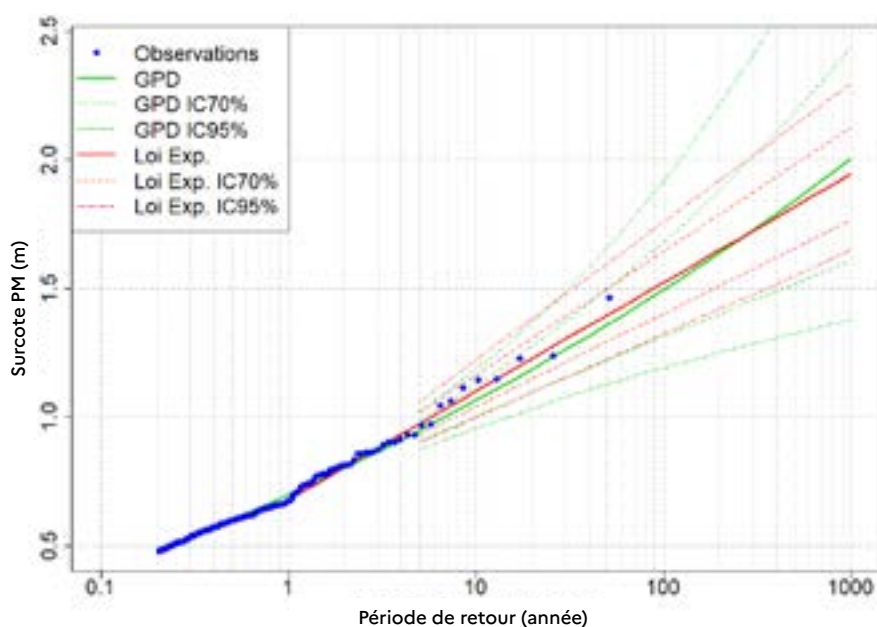
GPD : $Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s_0) \right)^{(1/\xi)}$

Loi Exp. : $Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s_0))$

Le Havre – Périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote PM

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,95 m	0,91 m à 0,99 m	0,87 m à 1,03 m	0,97 m	0,93 m à 1,02 m	0,90 m à 1,06 m
10 ans	1,06 m	1,00 m à 1,12 m	0,95 m à 1,18 m	1,10 m	1,04 m à 1,16 m	0,99 m à 1,22 m
20 ans	1,19 m	1,09 m à 1,27 m	1,02 m à 1,36 m	1,23 m	1,15 m à 1,31 m	1,09 m à 1,38 m
50 ans	1,36 m	1,21 m à 1,49 m	1,12 m à 1,64 m	1,40 m	1,30 m à 1,50 m	1,22 m à 1,59 m
100 ans	1,50 m	1,31 m à 1,68 m	1,18 m à 1,89 m	1,52 m	1,41 m à 1,64 m	1,31 m à 1,75 m
200 ans	1,64 m	1,40 m à 1,88 m	1,24 m à 2,17 m	1,65 m	1,52 m à 1,79 m	1,41 m à 1,91 m
500 ans	1,84 m	1,51 m à 2,18 m	1,31 m à 2,64 m	1,82 m	1,66 m à 1,98 m	1,54 m à 2,12 m
1 000 ans	2,00 m	1,59 m à 2,44 m	1,35 m à 3,06 m	1,95 m	1,77 m à 2,12 m	1,63 m à 2,28 m

Le Havre – Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

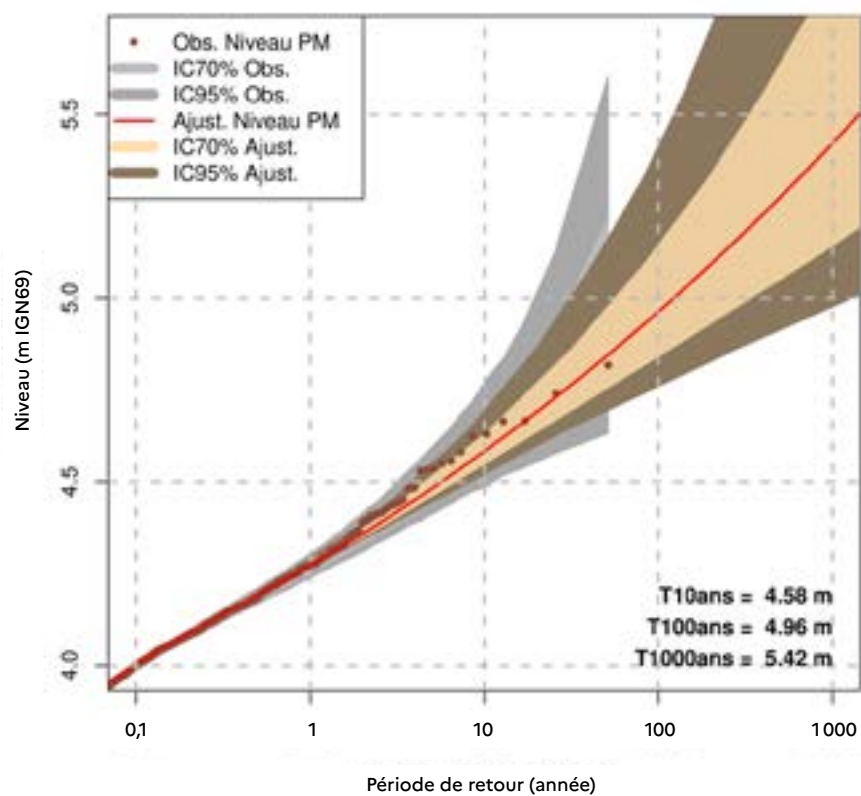


Niveau moyen pris en référence : 0,58 m IGN69.

Le Havre – Périodes de retour des valeurs extrêmes de niveaux PM

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

Le Havre – Valeurs extrêmes de niveau PM estimées par la convolution marée-surcote



3.1.6 - CHERBOURG

La durée d’observation cumulée est de 47,48 années, s’étalant du 30/03/1943 au 31/12/2021.

Cherbourg – Paramètres d’ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,37 m	s0 =	0,37 m
n =	5,484970	n =	5,484970
σ =	0,073761	ρ =	13,251444
ξ =	0,022657		

Rappel
Pour la surcote *s* associée à la période de retour *Tret* :

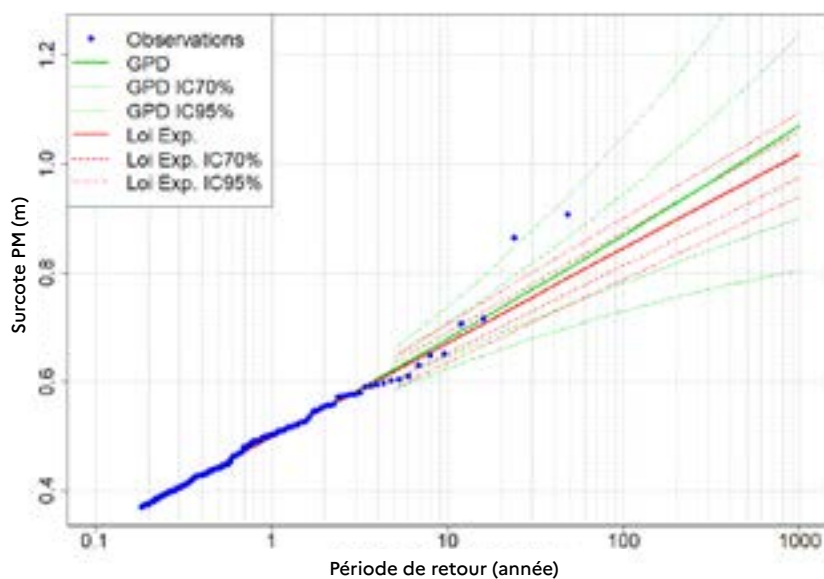
GPD : $Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s_0)\right)^{(1/\xi)}$

Loi Exp. : $Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s_0))$

Cherbourg – Périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote PM

Période de retour	GPD			Loi Exp.	Loi Exp.	
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,62 m	0,60 m à 0,64 m	0,59 m à 0,66 m	0,62 m	0,60 m à 0,64 m	0,59 m à 0,65 m
10 ans	0,68 m	0,65 m à 0,71 m	0,62 m à 0,74 m	0,67 m	0,65 m à 0,69 m	0,64 m à 0,71 m
20 ans	0,74 m	0,69 m à 0,77 m	0,66 m à 0,82 m	0,72 m	0,70 m à 0,75 m	0,68 m à 0,77 m
50 ans	0,81 m	0,75 m à 0,87 m	0,70 m à 0,94 m	0,79 m	0,77 m à 0,82 m	0,74 m à 0,85 m
100 ans	0,87 m	0,79 m à 0,94 m	0,73 m à 1,04 m	0,85 m	0,81 m à 0,88 m	0,79 m à 0,91 m
200 ans	0,93 m	0,83 m à 1,02 m	0,75 m à 1,15 m	0,90 m	0,86 m à 0,93 m	0,84 m à 0,96 m
500 ans	1,01 m	0,87 m à 1,14 m	0,78 m à 1,32 m	0,97 m	0,93 m à 1,01 m	0,90 m à 1,04 m
1 000 ans	1,07 m	0,91 m à 1,23 m	0,81 m à 1,46 m	1,02 m	0,98 m à 1,06 m	0,94 m à 1,10 m

Cherbourg – Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

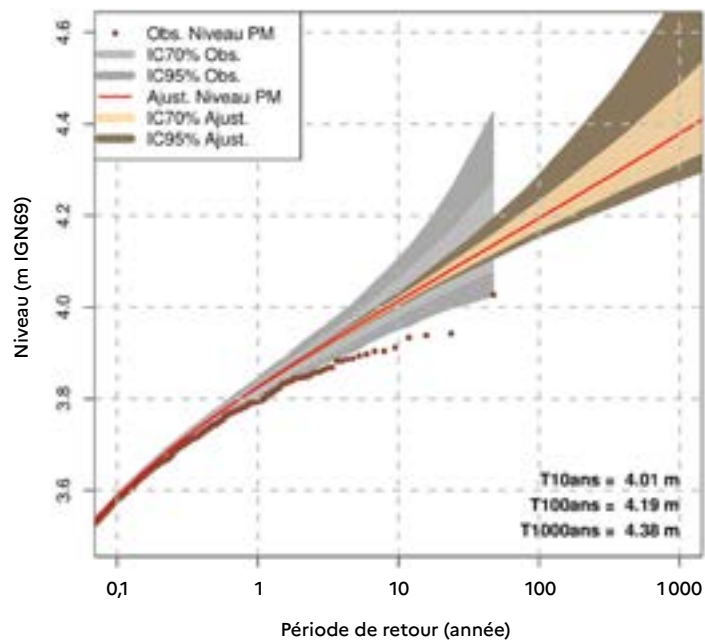


Niveau moyen pris en référence : 0,56 m IGN69.

Cherbourg – Périodes de retour des valeurs extrêmes de niveaux PM

Période de retour	Niveau PM (IGN69)		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	3,96 m	3,95 m à 3,96 m	3,95 m à 3,97 m
10 ans	4,01 m	4,01 m à 4,02 m	4,00 m à 4,03 m
20 ans	4,07 m	4,06 m à 4,08 m	4,05 m à 4,10 m
50 ans	4,14 m	4,12 m à 4,16 m	4,11 m à 4,20 m
100 ans	4,19 m	4,17 m à 4,23 m	4,15 m à 4,29 m
200 ans	4,25 m	4,21 m à 4,30 m	4,19 m à 4,39 m
500 ans	4,32 m	4,27 m à 4,40 m	4,24 m à 4,55 m
1 000 ans	4,38 m	4,31 m à 4,49 m	4,28 m à 4,69 m

Cherbourg – Valeurs extrêmes de niveau PM estimées par la convolution marée-surcote



3.1.7 - SAINT-MALO

La durée d'observation cumulée est de 27,43 années, s'étalant du 09/04/1986 au 31/12/2021.

Saint-Malo – Paramètres d’ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,42 m	s0 =	0,42 m
n =	3,830612	n =	3,830612
σ =	0,107201	ρ =	9,329861
ξ =	0,000026		

Rappel
Pour la surcote s associée à la période de retour $Tret$:

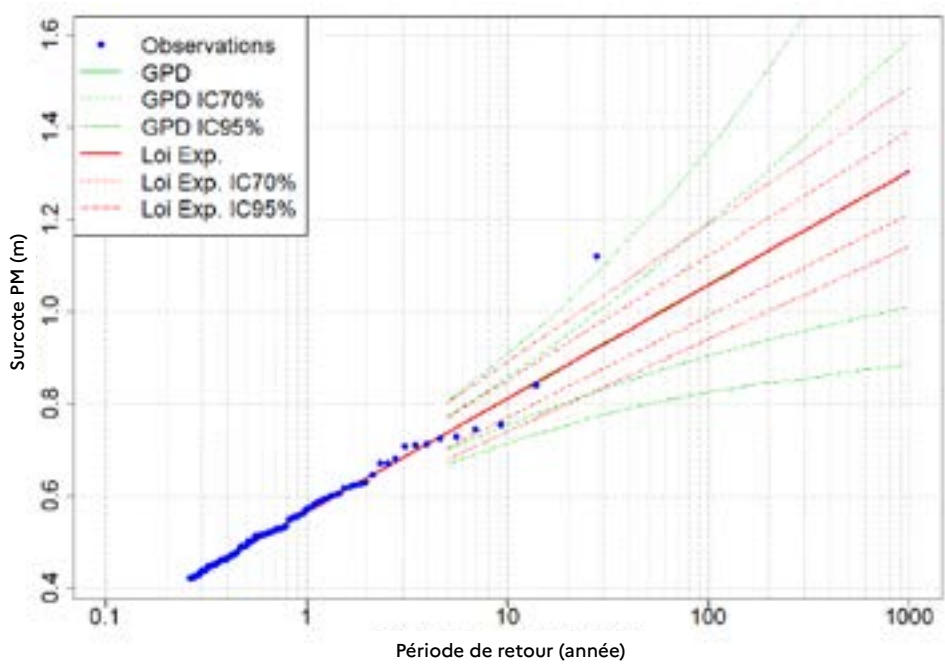
GPD : $Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s_0) \right)^{(1/\xi)}$

Loi Exp. : $Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s_0))$

Saint-Malo – Périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote PM

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,74 m	0,70 m à 0,77 m	0,67 m à 0,81 m	0,74 m	0,70 m à 0,77 m	0,68 m à 0,80 m
10 ans	0,81 m	0,75 m à 0,86 m	0,71 m à 0,91 m	0,81 m	0,77 m à 0,85 m	0,74 m à 0,89 m
20 ans	0,89 m	0,80 m à 0,95 m	0,75 m à 1,04 m	0,89 m	0,84 m à 0,93 m	0,80 m à 0,98 m
50 ans	0,98 m	0,86 m à 1,09 m	0,79 m à 1,22 m	0,98 m	0,93 m à 1,04 m	0,88 m à 1,10 m
100 ans	1,06 m	0,90 m à 1,19 m	0,81 m à 1,39 m	1,06 m	0,99 m à 1,12 m	0,94 m à 1,19 m
200 ans	1,13 m	0,94 m à 1,31 m	0,83 m à 1,57 m	1,13 m	1,06 m à 1,20 m	1,00 m à 1,28 m
500 ans	1,23 m	0,98 m à 1,48 m	0,85 m à 1,86 m	1,23 m	1,15 m à 1,31 m	1,08 m à 1,40 m
1 000 ans	1,30 m	1,01 m à 1,61 m	0,86 m à 2,10 m	1,30 m	1,22 m à 1,39 m	1,15 m à 1,49 m

Saint-Malo – Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM



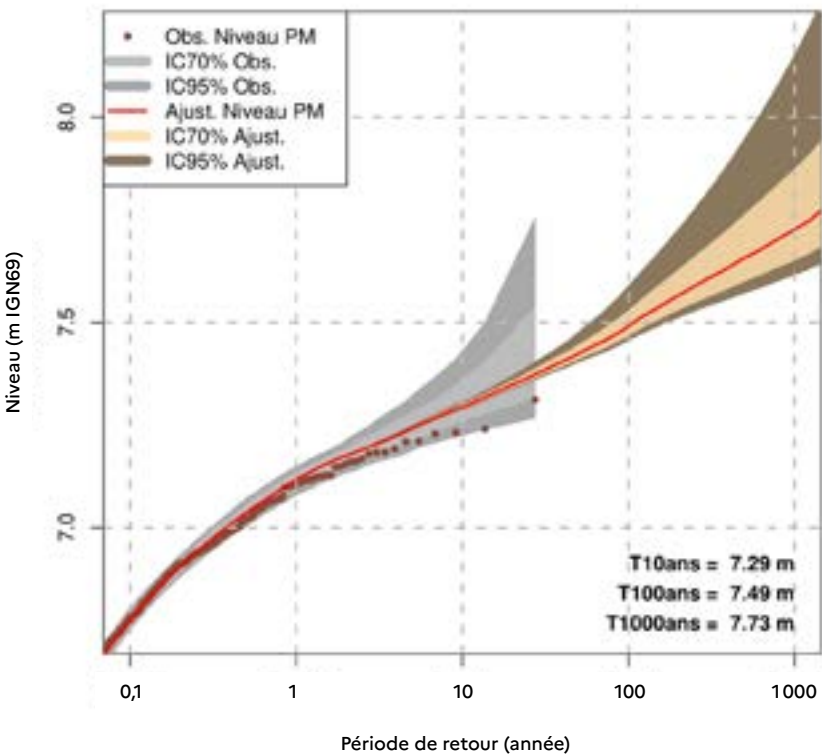
Niveau moyen pris en référence : 0,51 m IGN69.

Pour les calculs sur Saint-Malo il a été introduit un modèle de dépendance marée-surcote (voir annexe 2).

Saint-Malo – Périodes de retour des valeurs extrêmes de niveaux PM

Période de retour	Niveau PM (IGN69)		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	7,24 m	7,24 m à 7,24 m	7,24 m à 7,25 m
10 ans	7,29 m	7,29 m à 7,30 m	7,29 m à 7,31 m
20 ans	7,35 m	7,34 m à 7,36 m	7,34 m à 7,37 m
50 ans	7,42 m	7,41 m à 7,44 m	7,40 m à 7,48 m
100 ans	7,49 m	7,47 m à 7,53 m	7,46 m à 7,59 m
200 ans	7,57 m	7,53 m à 7,63 m	7,51 m à 7,73 m
500 ans	7,66 m	7,60 m à 7,76 m	7,57 m à 7,95 m
1 000 ans	7,73 m	7,65 m à 7,87 m	7,62 m à 8,15 m

Saint-Malo – Valeurs extrêmes de niveau PM estimées par la convolution marée-surcote



3.1.8 - ROSCOFF

La durée d’observation cumulée est de 46,17 années, s’étalant du 06/04/1973 au 31/12/2021.

Roscoff – Paramètres d’ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,37 m	s0 =	0,37 m
n =	6,050685	n =	6,050685
σ =	0,084383	ρ =	13,091944
ξ =	-0,104600		

Rappel
Pour la surcote *s* associée à la période de retour *Tret* :

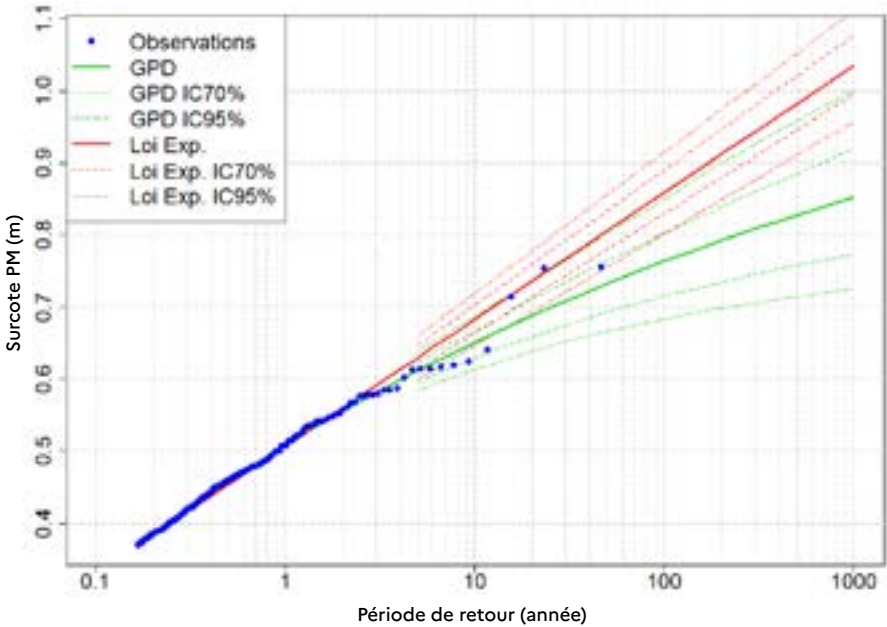
$$\text{GPD : } Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s_0) \right)^{(1/\xi)}$$

$$\text{Loi Exp. : } Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s_0))$$

Roscoff – Périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote PM

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,61 m	0,60 m à 0,63 m	0,58 m à 0,64 m	0,63 m	0,62 m à 0,65 m	0,60 m à 0,66 m
10 ans	0,65 m	0,63 m à 0,67 m	0,61 m à 0,69 m	0,68 m	0,67 m à 0,71 m	0,65 m à 0,72 m
20 ans	0,69 m	0,66 m à 0,71 m	0,64 m à 0,74 m	0,74 m	0,72 m à 0,76 m	0,70 m à 0,78 m
50 ans	0,73 m	0,69 m à 0,76 m	0,66 m à 0,80 m	0,81 m	0,78 m à 0,84 m	0,76 m à 0,86 m
100 ans	0,76 m	0,71 m à 0,80 m	0,68 m à 0,86 m	0,86 m	0,83 m à 0,89 m	0,81 m à 0,92 m
200 ans	0,79 m	0,73 m à 0,84 m	0,69 m à 0,91 m	0,91 m	0,88 m à 0,95 m	0,85 m à 0,98 m
500 ans	0,83 m	0,76 m à 0,89 m	0,71 m à 0,98 m	0,98 m	0,95 m à 1,03 m	0,91 m à 1,06 m
1 000 ans	0,85 m	0,77 m à 0,92 m	0,71 m à 1,03 m	1,04 m	1,00 m à 1,08 m	0,96 m à 1,12 m

Roscoff – Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

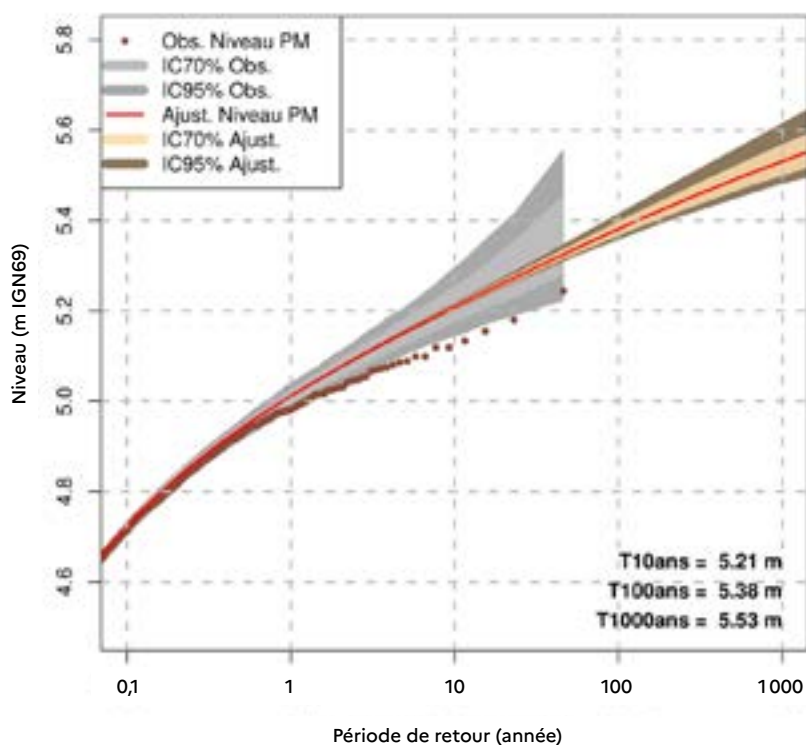


Niveau moyen pris en référence : 0,53 m IGN69.

Roscoff – Périodes de retour des valeurs extrêmes de niveaux PM

Période de retour	Niveau PM (IGN69)	Niveau PM (IGN69)	
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	5,15 m	5,15 m à 5,16 m	5,15 m à 5,16 m
10 ans	5,21 m	5,20 m à 5,21 m	5,20 m à 5,22 m
20 ans	5,26 m	5,26 m à 5,27 m	5,25 m à 5,27 m
50 ans	5,33 m	5,32 m à 5,34 m	5,32 m à 5,35 m
100 ans	5,38 m	5,37 m à 5,40 m	5,36 m à 5,41 m
200 ans	5,43 m	5,41 m à 5,45 m	5,40 m à 5,48 m
500 ans	5,49 m	5,46 m à 5,52 m	5,45 m à 5,55 m
1 000 ans	5,53 m	5,50 m à 5,57 m	5,48 m à 5,61 m

Roscoff – Valeurs extrêmes de niveau PM estimées par la convolution marée-surcote



3.1.9 - BREST

La durée d'observation cumulée est de 159,82 années, s'étalant du 04/01/1846 au 31/12/2021.

Brest – Paramètres d'ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,39 m	s0 =	0,39 m
n =	8,073188	n =	8,073188
σ =	0,093068	ρ =	10,799808
ξ =	-0,005148		

Rappel

Pour la surcote s associée à la période de retour T_{ret} :

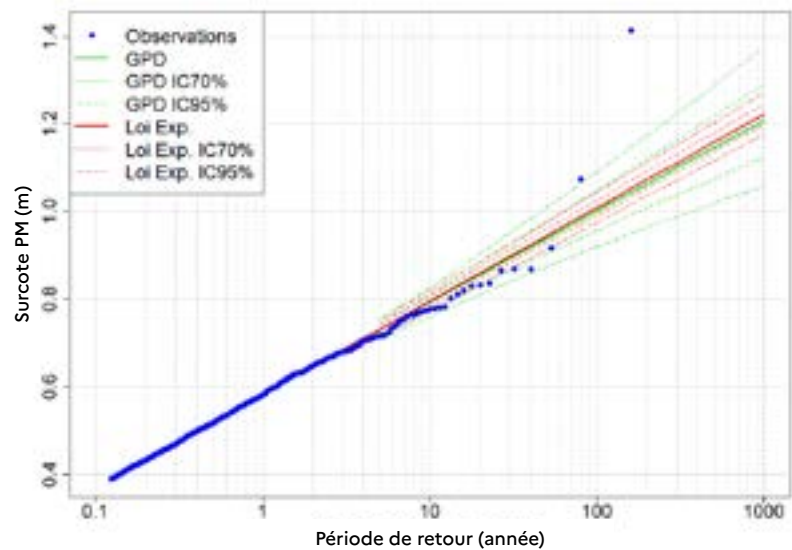
$$\text{GPD : } T_{ret} = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s_0) \right)^{(1/\xi)}$$

$$\text{Loi Exp. : } T_{ret} = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s_0))$$

Brest – Périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote PM

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,73 m	0,72 m à 0,74 m	0,71 m à 0,75 m	0,73 m	0,72 m à 0,74 m	0,72 m à 0,75 m
10 ans	0,79 m	0,78 m à 0,81 m	0,76 m à 0,83 m	0,8 m	0,79 m à 0,81 m	0,78 m à 0,82 m
20 ans	0,86 m	0,83 m à 0,88 m	0,81 m à 0,9 m	0,86 m	0,85 m à 0,87 m	0,84 m à 0,89 m
50 ans	0,94 m	0,9 m à 0,97 m	0,88 m à 1,01 m	0,95 m	0,93 m à 0,96 m	0,92 m à 0,98 m
100 ans	1 m	0,96 m à 1,04 m	0,92 m à 1,09 m	1,01 m	0,99 m à 1,03 m	0,98 m à 1,04 m
200 ans	1,06 m	1,01 m à 1,11 m	0,97 m à 1,18 m	1,07 m	1,06 m à 1,09 m	1,04 m à 1,11 m
500 ans	1,15 m	1,08 m à 1,21 m	1,02 m à 1,3 m	1,16 m	1,14 m à 1,18 m	1,12 m à 1,2 m
1 000 ans	1,21 m	1,13 m à 1,28 m	1,06 m à 1,39 m	1,22 m	1,2 m à 1,25 m	1,18 m à 1,27 m

Brest – Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

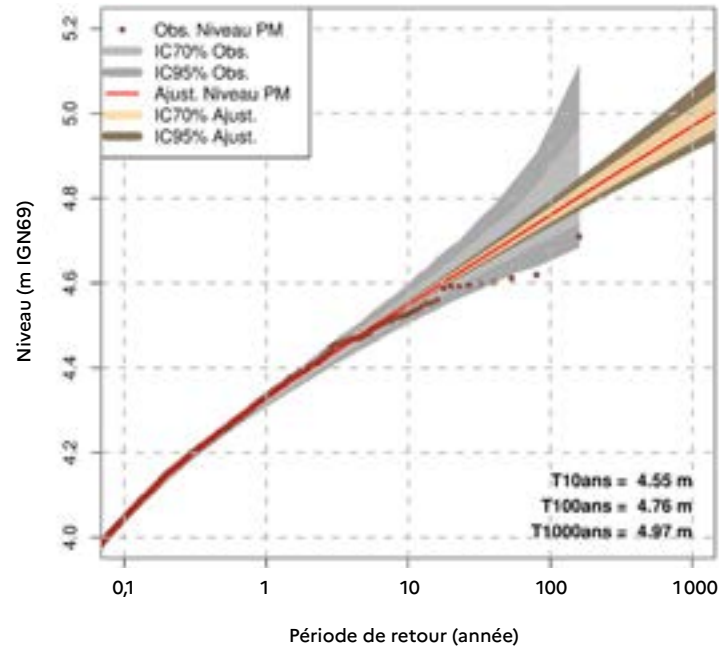


Niveau moyen pris en référence : 0,55 m IGN69.

Brest – Périodes de retour des valeurs extrêmes de niveaux PM

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 – Valeurs extrêmes de niveau PM estimées par la convolution marée-surcote



3.1.10 - LE CONQUET

La durée d'observation cumulée est de 49,16 années, s'étalant du 21/12/1970 au 31/12/2021.

Le Conquet – Paramètres d'ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,38 m	s0 =	0,38 m
n =	6,514418	n =	6,514418
σ =	0,073960	ρ =	12,793049
ξ =	0,053478		

Rappel

Pour la surcote s associée à la période de retour $Tret$:

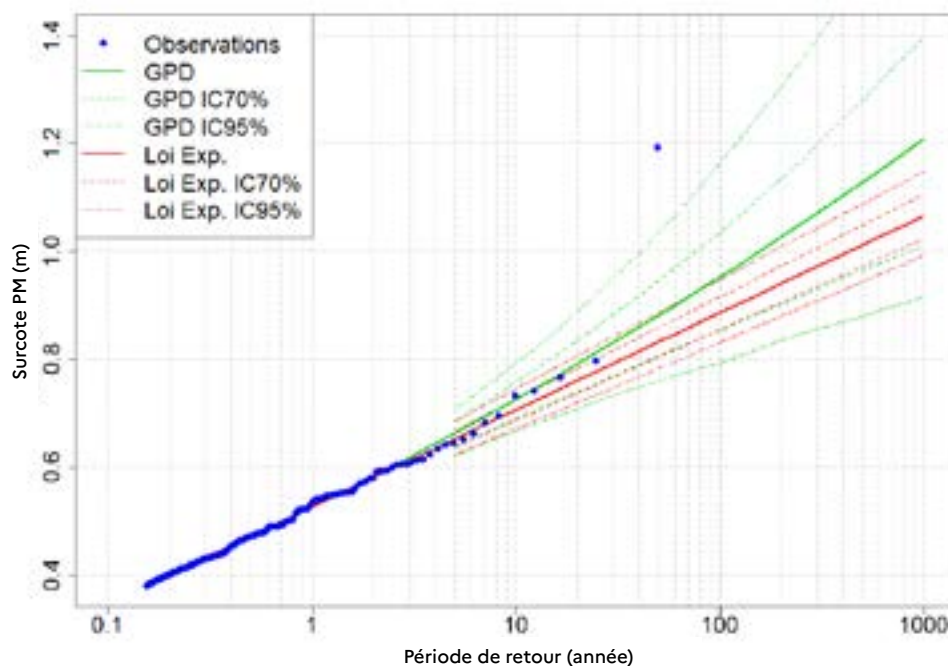
$$GPD : Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s_0) \right)^{(1/\xi)}$$

$$Loi Exp. : Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s_0))$$

Le Conquet – Périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote PM

Période de retour	GPD			Loi Exp.	Loi Exp.	
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,66 m	0,64 m à 0,69 m	0,62 m à 0,71 m	0,65 m	0,64 m à 0,67 m	0,62 m à 0,68 m
10 ans	0,73 m	0,69 m à 0,76 m	0,67 m à 0,80 m	0,71 m	0,69 m à 0,73 m	0,67 m à 0,74 m
20 ans	0,79 m	0,74 m à 0,84 m	0,71 m à 0,89 m	0,76 m	0,74 m à 0,78 m	0,72 m à 0,80 m
50 ans	0,88 m	0,81 m à 0,95 m	0,76 m à 1,04 m	0,83 m	0,81 m à 0,86 m	0,78 m à 0,88 m
100 ans	0,95 m	0,86 m à 1,04 m	0,80 m à 1,16 m	0,89 m	0,86 m à 0,92 m	0,83 m à 0,94 m
200 ans	1,03 m	0,90 m à 1,14 m	0,83 m à 1,30 m	0,94 m	0,91 m à 0,97 m	0,88 m à 1,00 m
500 ans	1,13 m	0,97 m à 1,29 m	0,88 m à 1,52 m	1,01 m	0,97 m à 1,05 m	0,94 m à 1,08 m
1 000 ans	1,21 m	1,01 m à 1,41 m	0,91 m à 1,72 m	1,07 m	1,03 m à 1,11 m	0,99 m à 1,14 m

Le Conquet – Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

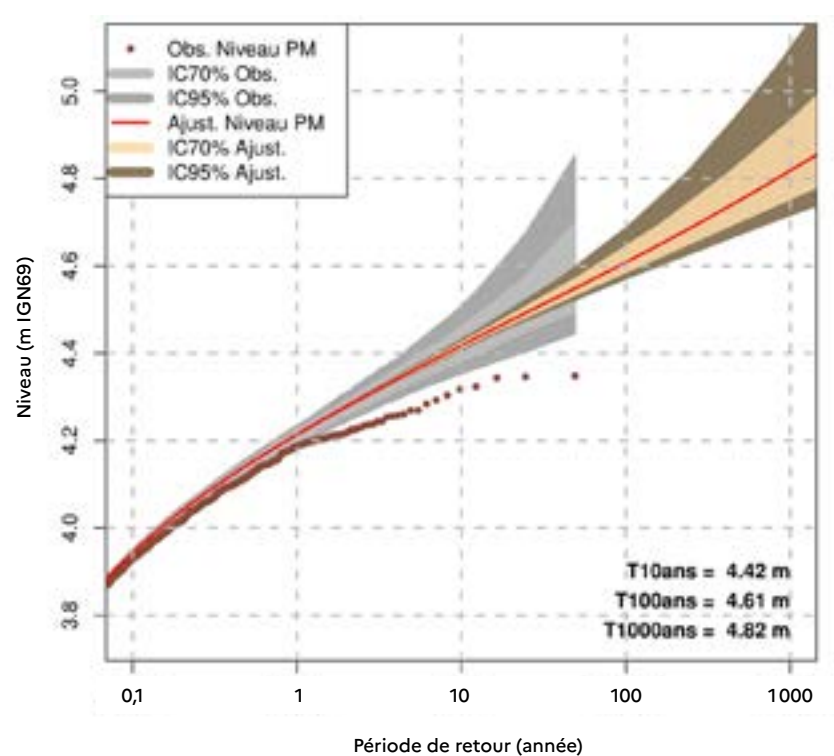


Niveau moyen pris en référence : 0,49 m IGN69.

Le Conquet – Périodes de retour des valeurs extrêmes de niveaux PM

Période de retour	Niveau PM (IGN69)		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	4,36 m	4,35 m à 4,36 m	4,35 m à 4,37 m
10 ans	4,42 m	4,41 m à 4,43 m	4,41 m à 4,43 m
20 ans	4,48 m	4,47 m à 4,49 m	4,46 m à 4,50 m
50 ans	4,55 m	4,53 m à 4,57 m	4,52 m à 4,60 m
100 ans	4,61 m	4,59 m à 4,65 m	4,57 m à 4,69 m
200 ans	4,67 m	4,64 m à 4,72 m	4,61 m à 4,79 m
500 ans	4,75 m	4,70 m à 4,84 m	4,67 m à 4,96 m
1 000 ans	4,82 m	4,75 m à 4,93 m	4,72 m à 5,10 m

Le Conquet – Valeurs extrêmes de niveau PM estimées par la convolution marée-surcote



3.1.11 - CONCARNEAU

La durée d’observation cumulée est de 22,02 années, s’étalant du 28/06/1999 au 24/09/2021.

Concarneau – Paramètres d’ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,47 m	s0 =	0,47 m
n =	3,635427	n =	3,635427
σ =	0,068895	ρ =	13,828616
ξ =	0,047867		

Rappel
Pour la surcote *s* associée à la période de retour *Tret* :

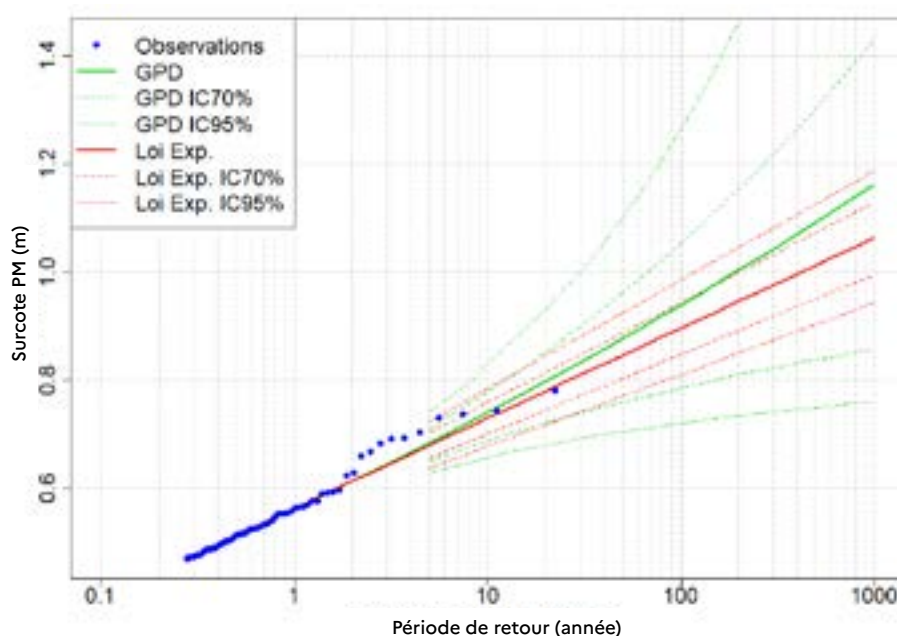
GPD : $Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s0) \right)^{(1/\xi)}$

Loi Exp. : $Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s0))$

Concarneau – Périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote PM

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,68 m	0,65 m à 0,71 m	0,63 m à 0,74 m	0,68 m	0,66 m à 0,70 m	0,64 m à 0,73 m
10 ans	0,74 m	0,69 m à 0,78 m	0,66 m à 0,84 m	0,73 m	0,70 m à 0,76 m	0,68 m à 0,79 m
20 ans	0,80 m	0,72 m à 0,85 m	0,68 m à 0,94 m	0,78 m	0,74 m à 0,82 m	0,72 m à 0,86 m
50 ans	0,88 m	0,77 m à 0,96 m	0,71 m à 1,10 m	0,85 m	0,80 m à 0,89 m	0,77 m à 0,94 m
100 ans	0,94 m	0,79 m à 1,06 m	0,72 m à 1,26 m	0,90 m	0,85 m à 0,95 m	0,81 m à 1,00 m
200 ans	1,00 m	0,82 m à 1,16 m	0,74 m à 1,47 m	0,95 m	0,89 m à 1,00 m	0,85 m à 1,06 m
500 ans	1,09 m	0,85 m à 1,32 m	0,75 m à 1,76 m	1,01 m	0,95 m à 1,08 m	0,91 m à 1,15 m
1 000 ans	1,16 m	0,87 m à 1,45 m	0,76 m à 2,04 m	1,06 m	0,99 m à 1,13 m	0,95 m à 1,21 m

Concarneau – Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

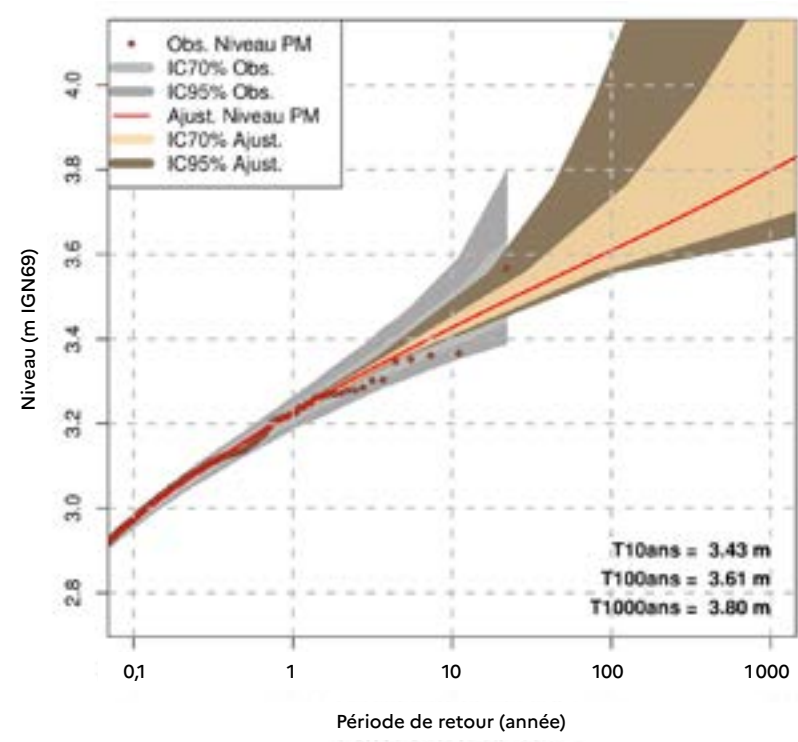


Niveau moyen pris en référence : 0,49 m IGN69.

Concarneau – Périodes de retour des valeurs extrêmes de niveaux PM

Période de retour	Niveau PM (IGN69)		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	3,37 m	3,36 m à 3,38 m	3,36 m à 3,41 m
10 ans	3,43 m	3,41 m à 3,45 m	3,40 m à 3,49 m
20 ans	3,48 m	3,46 m à 3,52 m	3,45 m à 3,59 m
50 ans	3,55 m	3,52 m à 3,63 m	3,51 m à 3,81 m
100 ans	3,61 m	3,57 m à 3,73 m	3,55 m à 4,07 m
200 ans	3,66 m	3,60 m à 3,86 m	3,58 m à 4,42 m
500 ans	3,74 m	3,65 m à 4,06 m	3,61 m à 5,06 m
1 000 ans	3,80 m	3,68 m à 4,25 m	3,63 m à 5,82 m

Concarneau – Valeurs extrêmes de niveau PM estimées par la convolution marée-surcote



3.1.12 - PORT-TUDY

La durée d’observation cumulée est de 46,28 années, s’étalant du 10/08/1966 au 31/12/2021.

Port-Tudy – Paramètres d’ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,37 m	s0 =	0,37 m
n =	9,367757	n =	9,367757
σ =	0,086624	ρ =	11,579434
ξ =	-0,003108		

Rappel
Pour la surcote s associée à la période de retour $Tret$:

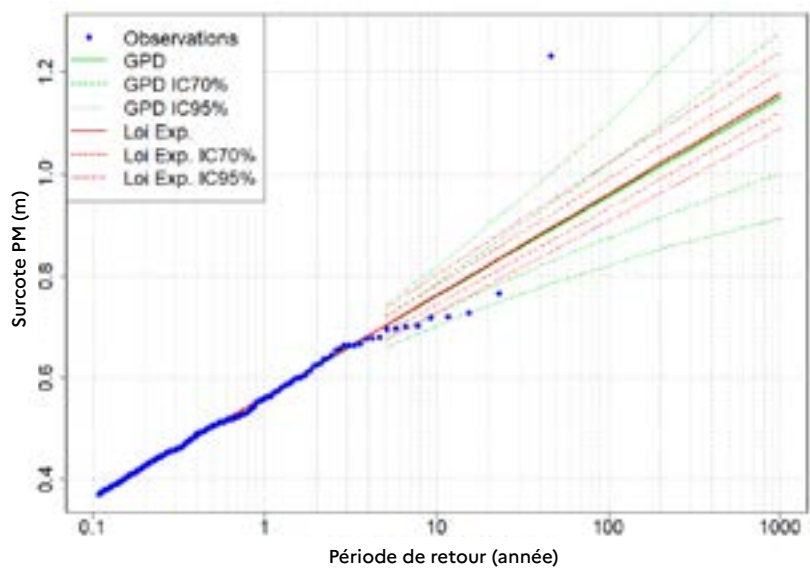
GPD : $Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s0) \right)^{1/\xi}$

Loi Exp. : $Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s0))$

Port-Tudy – Périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote PM

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,70 m	0,68 m à 0,72 m	0,66 m à 0,75 m	0,70 m	0,69 m à 0,72 m	0,67 m à 0,74 m
10 ans	0,76 m	0,73 m à 0,79 m	0,70 m à 0,82 m	0,76 m	0,74 m à 0,78 m	0,73 m à 0,80 m
20 ans	0,82 m	0,77 m à 0,86 m	0,75 m à 0,91 m	0,82 m	0,80 m à 0,84 m	0,78 m à 0,87 m
50 ans	0,90 m	0,83 m à 0,95 m	0,79 m à 1,02 m	0,90 m	0,88 m à 0,93 m	0,85 m à 0,96 m
100 ans	0,96 m	0,87 m à 1,03 m	0,83 m à 1,12 m	0,96 m	0,93 m à 0,99 m	0,91 m à 1,02 m
200 ans	1,02 m	0,91 m à 1,11 m	0,86 m à 1,22 m	1,02 m	0,99 m à 1,05 m	0,96 m à 1,09 m
500 ans	1,09 m	0,96 m à 1,21 m	0,90 m à 1,38 m	1,10 m	1,07 m à 1,14 m	1,03 m à 1,18 m
1 000 ans	1,15 m	1,00 m à 1,29 m	0,93 m à 1,51 m	1,16 m	1,12 m à 1,20 m	1,09 m à 1,24 m

Port-Tudy – Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

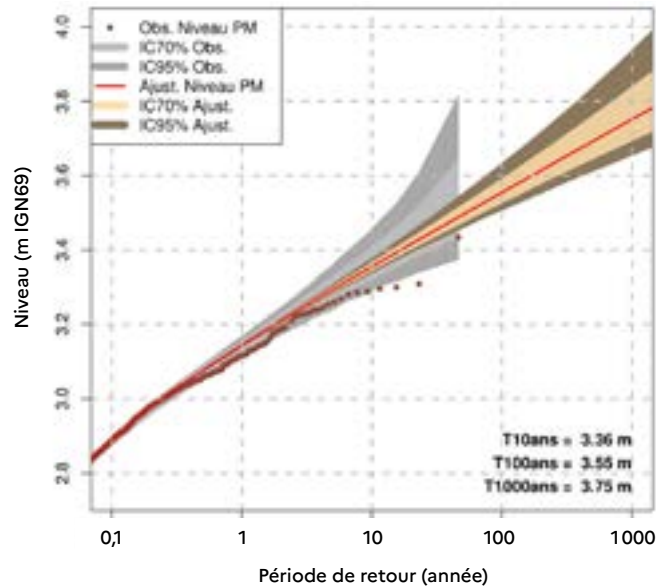


Niveau moyen pris en référence : 0,43 m IGN69.

Port-Tudy – Périodes de retour des valeurs extrêmes de niveaux PM

Période de retour	Niveau PM (IGN69)		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	3,29 m	3,29 m à 3,30 m	3,28 m à 3,31 m
10 ans	3,36 m	3,35 m à 3,37 m	3,34 m à 3,38 m
20 ans	3,42 m	3,40 m à 3,43 m	3,39 m à 3,45 m
50 ans	3,49 m	3,47 m à 3,52 m	3,46 m à 3,55 m
100 ans	3,55 m	3,53 m à 3,59 m	3,51 m à 3,63 m
200 ans	3,61 m	3,58 m à 3,66 m	3,55 m à 3,72 m
500 ans	3,69 m	3,64 m à 3,76 m	3,61 m à 3,84 m
1 000 ans	3,75 m	3,69 m à 3,84 m	3,65 m à 3,94 m

Port-Tudy – Valeurs extrêmes de niveau PM estimées par la convolution marée-surcote



3.1.13 - LE CROUESTY

La durée d'observation cumulée est de 17,04 années, s'étalant du 14/03/1966 au 04/10/2021.

Le Crouesty – Paramètres d’ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,43 m	s0 =	0,43 m
n =	6,226475	n =	6,226475
σ =	0,093844	ρ =	11,270272
ξ =	-0,057238		

Rappel
Pour la surcote s associée à la période de retour $Tret$:

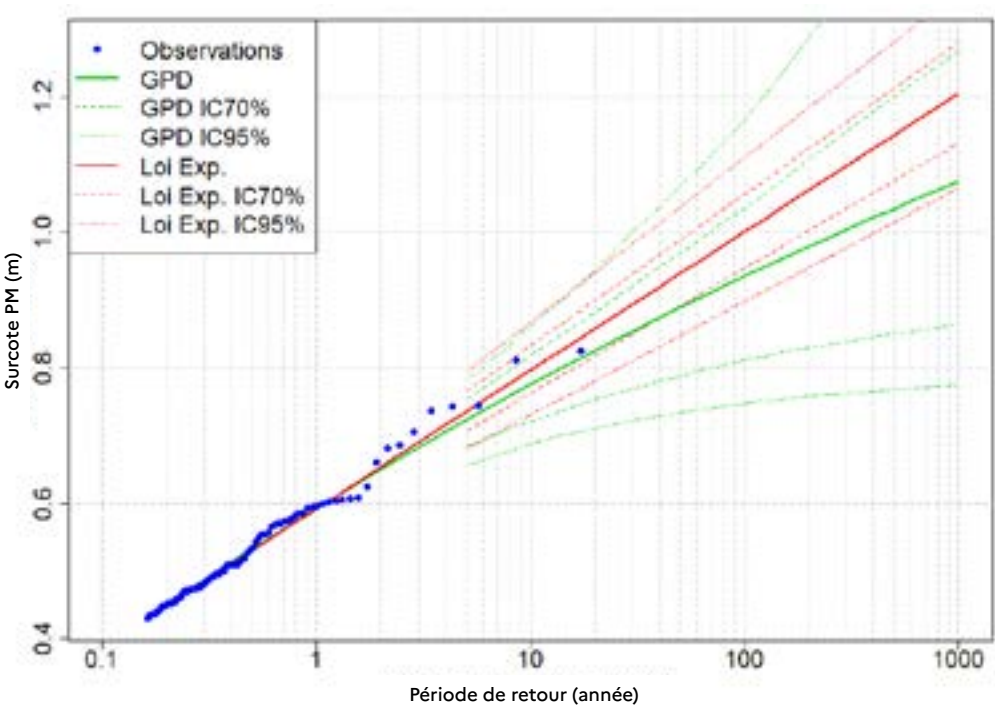
GPD : $Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s_0) \right)^{(1/\xi)}$

Loi Exp. : $Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s_0))$

Le Crouesty – Périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote PM

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,72 m	0,68 m à 0,75 m	0,66 m à 0,79 m	0,74 m	0,71 m à 0,77 m	0,68 m à 0,79 m
10 ans	0,78 m	0,72 m à 0,81 m	0,69 m à 0,86 m	0,80 m	0,76 m à 0,83 m	0,73 m à 0,86 m
20 ans	0,83 m	0,75 m à 0,88 m	0,71 m à 0,94 m	0,86 m	0,82 m à 0,90 m	0,78 m à 0,94 m
50 ans	0,89 m	0,79 m à 0,97 m	0,73 m à 1,07 m	0,94 m	0,89 m à 0,99 m	0,84 m à 1,03 m
100 ans	0,94 m	0,81 m à 1,03 m	0,75 m à 1,18 m	1,00 m	0,95 m à 1,06 m	0,89 m à 1,10 m
200 ans	0,98 m	0,83 m à 1,10 m	0,76 m à 1,29 m	1,06 m	1,00 m à 1,13 m	0,94 m à 1,18 m
500 ans	1,03 m	0,85 m à 1,19 m	0,77 m à 1,45 m	1,14 m	1,08 m à 1,22 m	1,01 m à 1,27 m
1 000 ans	1,08 m	0,86 m à 1,26 m	0,78 m à 1,58 m	1,21 m	1,13 m à 1,28 m	1,06 m à 1,35 m

Le Crouesty – Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

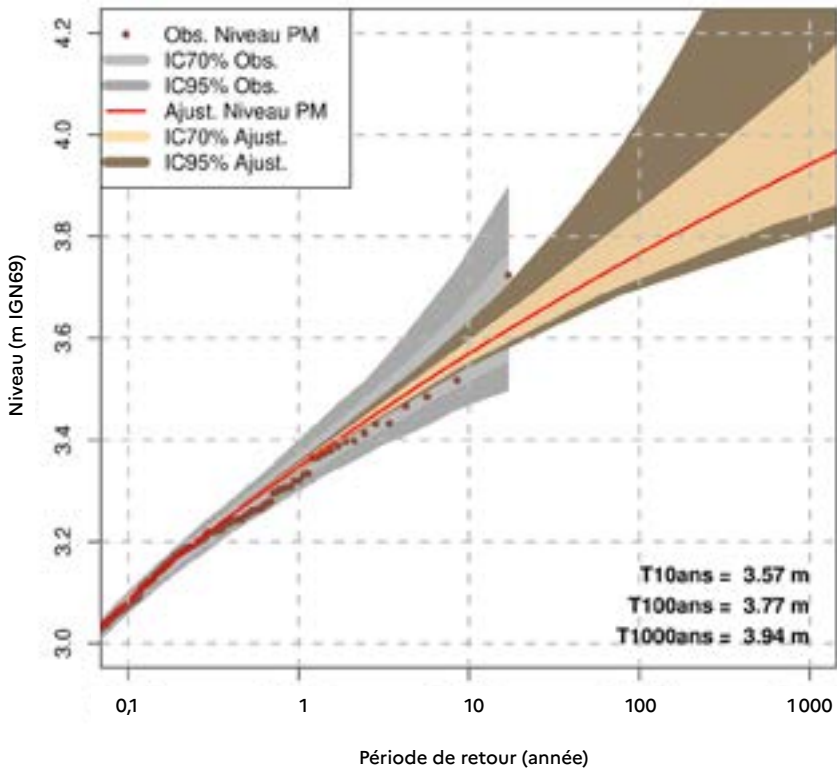


Niveau moyen pris en référence : 0,47 m IGN69.

Le Croesty – Périodes de retour des valeurs extrêmes de niveaux PM

Période de retour	Niveau PM (IGN69)		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	3,51 m	3,49 m à 3,52 m	3,49 m à 3,54 m
10 ans	3,57 m	3,55 m à 3,60 m	3,54 m à 3,63 m
20 ans	3,63 m	3,61 m à 3,67 m	3,59 m à 3,73 m
50 ans	3,71 m	3,67 m à 3,77 m	3,66 m à 3,89 m
100 ans	3,77 m	3,72 m à 3,85 m	3,70 m à 4,03 m
200 ans	3,82 m	3,76 m à 3,93 m	3,73 m à 4,20 m
500 ans	3,89 m	3,81 m à 4,04 m	3,77 m à 4,45 m
1 000 ans	3,94 m	3,85 m à 4,13 m	3,81 m à 4,65 m

Le Croesty – Valeurs extrêmes de niveau PM estimées par la convolution marée-surcote



3.1.14 - SAINT-NAZAIRE

La durée d’observation cumulée est de 116,57 années, s’étalant du 25/05/1821 au 31/12/2021.

Saint-Nazaire – Paramètres d’ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,60 m	s0 =	0,60 m
n =	3,287271	n =	3,287271
σ =	0,122407	ρ =	7,972793
ξ =	0,024098		

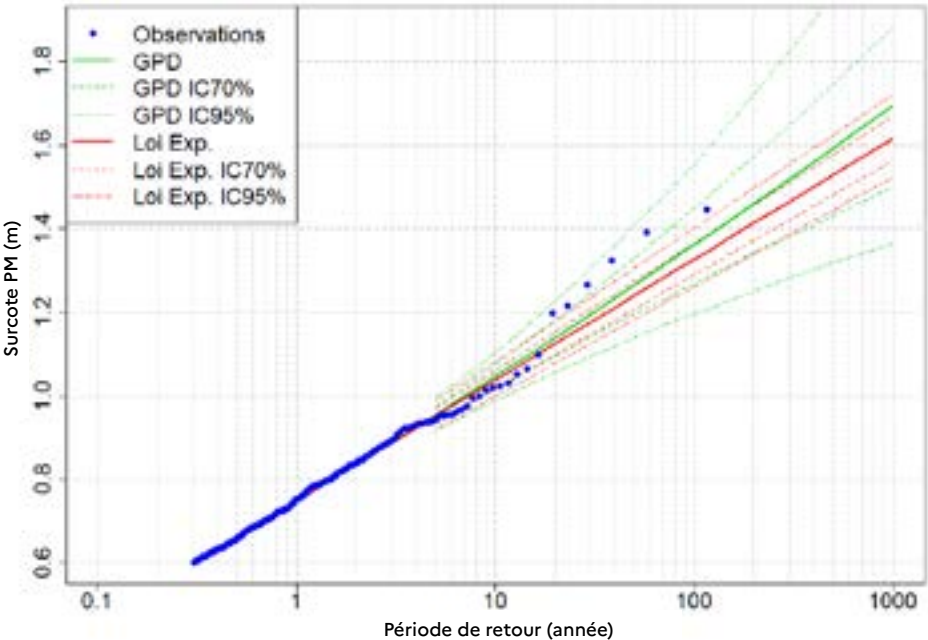
Rappel
Pour la surcote s associée à la période de retour $Tret$:
$$GPD : Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s_0) \right)^{1/\xi}$$

Loi Exp. :
$$Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s_0))$$

Saint-Nazaire – Périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote PM

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,95 m	0,93 m à 0,98 m	0,91 m à 1,00 m	0,95 m	0,93 m à 0,97 m	0,92 m à 0,99 m
10 ans	1,05 m	1,01 m à 1,08 m	0,99 m à 1,11 m	1,04 m	1,01 m à 1,06 m	1,00 m à 1,08 m
20 ans	1,14 m	1,09 m à 1,18 m	1,06 m à 1,23 m	1,13 m	1,10 m à 1,15 m	1,08 m à 1,18 m
50 ans	1,26 m	1,19 m à 1,33 m	1,14 m à 1,40 m	1,24 m	1,21 m à 1,27 m	1,18 m à 1,30 m
100 ans	1,36 m	1,26 m à 1,45 m	1,20 m à 1,55 m	1,33 m	1,29 m à 1,37 m	1,26 m à 1,40 m
200 ans	1,46 m	1,34 m à 1,58 m	1,25 m à 1,71 m	1,41 m	1,37 m à 1,46 m	1,34 m à 1,49 m
500 ans	1,59 m	1,43 m à 1,75 m	1,31 m à 1,95 m	1,53 m	1,48 m à 1,58 m	1,44 m à 1,62 m
1 000 ans	1,69 m	1,49 m à 1,90 m	1,36 m à 2,15 m	1,62 m	1,56 m à 1,67 m	1,52 m à 1,72 m

Saint-Nazaire – Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

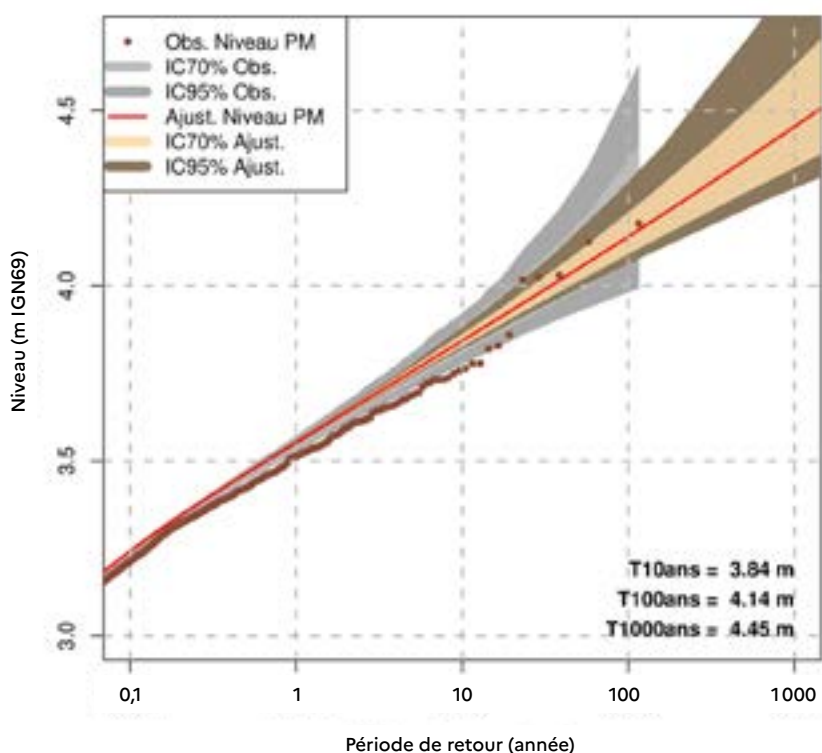


Niveau moyen pris en référence : 0,46 m IGN69.

Saint-Nazaire – Périodes de retour des valeurs extrêmes de niveaux PM

Période de retour	Niveau PM (IGN69)		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	3,76 m	3,75 m à 3,77 m	3,74 m à 3,78 m
10 ans	3,84 m	3,83 m à 3,86 m	3,82 m à 3,88 m
20 ans	3,93 m	3,91 m à 3,96 m	3,90 m à 3,99 m
50 ans	4,05 m	4,01 m à 4,09 m	3,99 m à 4,16 m
100 ans	4,14 m	4,09 m à 4,21 m	4,06 m à 4,30 m
200 ans	4,23 m	4,17 m à 4,33 m	4,13 m à 4,45 m
500 ans	4,36 m	4,27 m à 4,49 m	4,22 m à 4,69 m
1 000 ans	4,45 m	4,34 m à 4,63 m	4,28 m à 4,89 m

Saint-Nazaire – Valeurs extrêmes de niveau PM estimées par la convolution marée-surcote



3.1.15 - SAINT-GILDAS

La durée d'observation cumulée est de 45,68 années, s'étalant du 06/06/1962 au 27/06/2017.

Saint-Gildas – Paramètres d'ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,38 m	s0 =	0,38 m
n =	9,970573	n =	9,970573
σ =	0,101657	ρ =	9,966812
ξ =	-0,013127		

Rappel

Pour la surcote s associée à la période de retour T_{ret} :

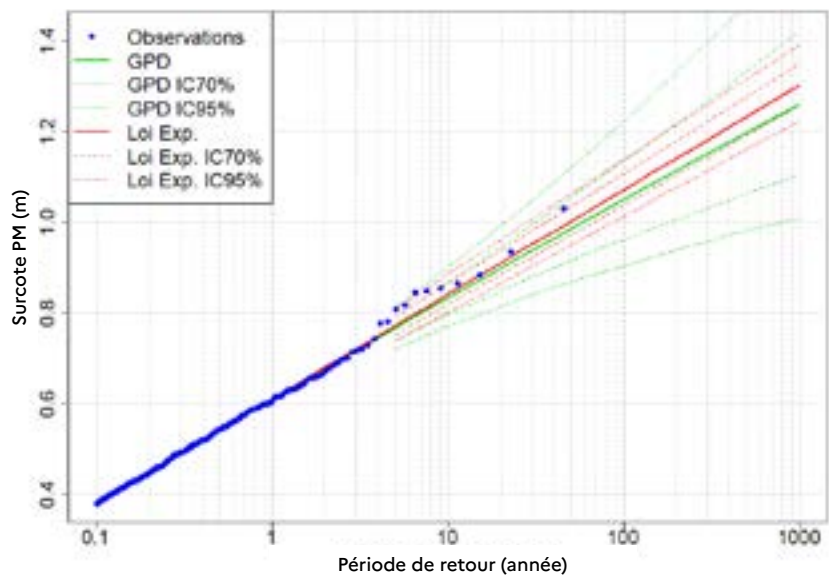
$$\text{GPD : } T_{ret} = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s - s_0) \right)^{1/\xi}$$

$$\text{Loi Exp. : } T_{ret} = \frac{1}{n} \exp(\rho(s - s_0))$$

Saint-Gildas – Périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote PM

Période de retour	GPD			Loi Exp.	Loi Exp.	
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,77 m	0,74 m à 0,79 m	0,72 m à 0,82 m	0,77 m	0,75 m à 0,79 m	0,74 m à 0,81 m
10 ans	0,83 m	0,80 m à 0,87 m	0,77 m à 0,91 m	0,84 m	0,82 m à 0,86 m	0,80 m à 0,89 m
20 ans	0,90 m	0,85 m à 0,95 m	0,81 m à 1,00 m	0,91 m	0,88 m à 0,94 m	0,87 m à 0,96 m
50 ans	0,99 m	0,92 m à 1,05 m	0,87 m à 1,13 m	1,00 m	0,97 m à 1,03 m	0,95 m à 1,06 m
100 ans	1,05 m	0,97 m à 1,13 m	0,90 m à 1,23 m	1,07 m	1,04 m à 1,11 m	1,01 m à 1,14 m
200 ans	1,12 m	1,01 m à 1,22 m	0,94 m à 1,35 m	1,14 m	1,10 m à 1,18 m	1,08 m à 1,21 m
500 ans	1,20 m	1,07 m à 1,33 m	0,98 m à 1,51 m	1,23 m	1,19 m à 1,27 m	1,16 m à 1,32 m
1 000 ans	1,26 m	1,11 m à 1,42 m	1,00 m à 1,63 m	1,30 m	1,26 m à 1,35 m	1,22 m à 1,39 m

Saint-Gildas – Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

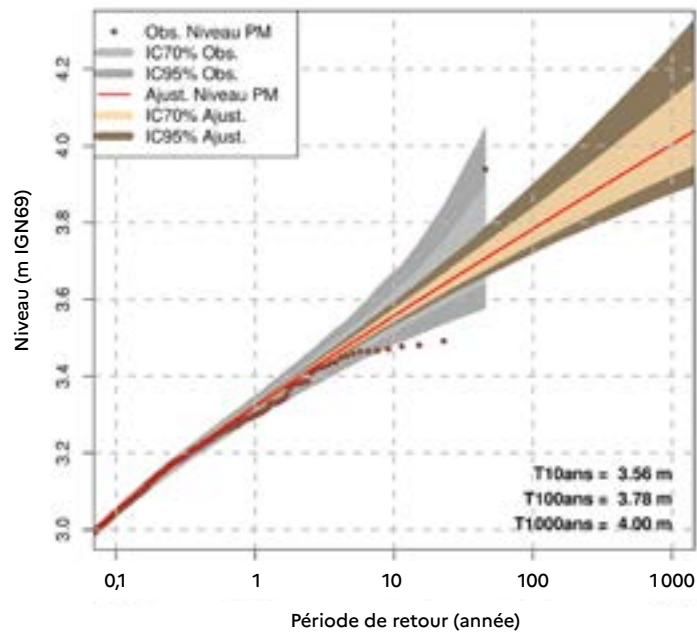


Niveau moyen pris en référence : 0,40 m IGN69.

Saint-Gildas – Périodes de retour des valeurs extrêmes de niveaux PM

Période de retour	Niveau PM (IGN69)		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	3,49 m	3,48 m à 3,50 m	3,47 m à 3,51 m
10 ans	3,56 m	3,54 m à 3,57 m	3,53 m à 3,59 m
20 ans	3,63 m	3,61 m à 3,65 m	3,59 m à 3,68 m
50 ans	3,72 m	3,69 m à 3,76 m	3,67 m à 3,80 m
100 ans	3,78 m	3,75 m à 3,84 m	3,72 m à 3,90 m
200 ans	3,85 m	3,80 m à 3,92 m	3,77 m à 4,00 m
500 ans	3,94 m	3,87 m à 4,04 m	3,83 m à 4,15 m
1 000 ans	4,00 m	3,92 m à 4,12 m	3,88 m à 4,26 m

Saint-Gildas – Valeurs extrêmes de niveau PM estimées par la convolution marée-surcote



3.1.16 - LES SABLES-D'OLONNE

La durée d'observation cumulée est de 31,48 années, s'étalant du 05/07/1965 au 31/12/2021.

Les Sables-d'Olonne – Paramètres d'ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,51 m	s0 =	0,51 m
n =	2,957967	n =	2,957967
σ =	0,074563	ρ =	13,610247
ξ =	-0,014679		

Rappel
Pour la surcote s associée à la période de retour $Tret$:

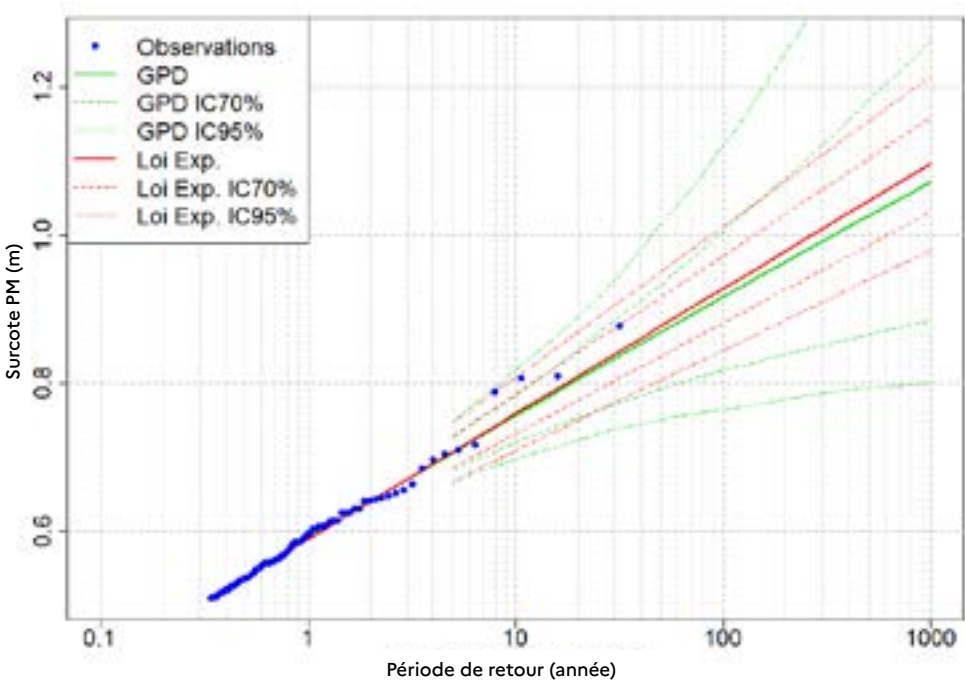
GPD : $Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s_0)\right)^{1/\xi}$

Loi Exp. : $Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s_0))$

Les Sables-d'Olonne – Périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote PM

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,71 m	0,68 m à 0,72 m	0,67 m à 0,75 m	0,71 m	0,69 m à 0,73 m	0,67 m à 0,75 m
10 ans	0,76 m	0,72 m à 0,78 m	0,70 m à 0,82 m	0,76 m	0,73 m à 0,78 m	0,71 m à 0,81 m
20 ans	0,81 m	0,76 m à 0,84 m	0,72 m à 0,89 m	0,81 m	0,78 m à 0,84 m	0,75 m à 0,87 m
50 ans	0,87 m	0,79 m à 0,93 m	0,75 m à 1,01 m	0,88 m	0,84 m à 0,91 m	0,81 m à 0,95 m
100 ans	0,92 m	0,82 m à 0,99 m	0,76 m à 1,11 m	0,93 m	0,88 m à 0,97 m	0,85 m à 1,02 m
200 ans	0,96 m	0,84 m à 1,07 m	0,77 m à 1,22 m	0,98 m	0,93 m à 1,03 m	0,89 m à 1,08 m
500 ans	1,03 m	0,87 m à 1,16 m	0,79 m à 1,39 m	1,05 m	0,99 m à 1,10 m	0,94 m à 1,16 m
1 000 ans	1,07 m	0,88 m à 1,24 m	0,79 m à 1,55 m	1,10 m	1,03 m à 1,16 m	0,99 m à 1,22 m

Les Sables-d'Olonne – Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

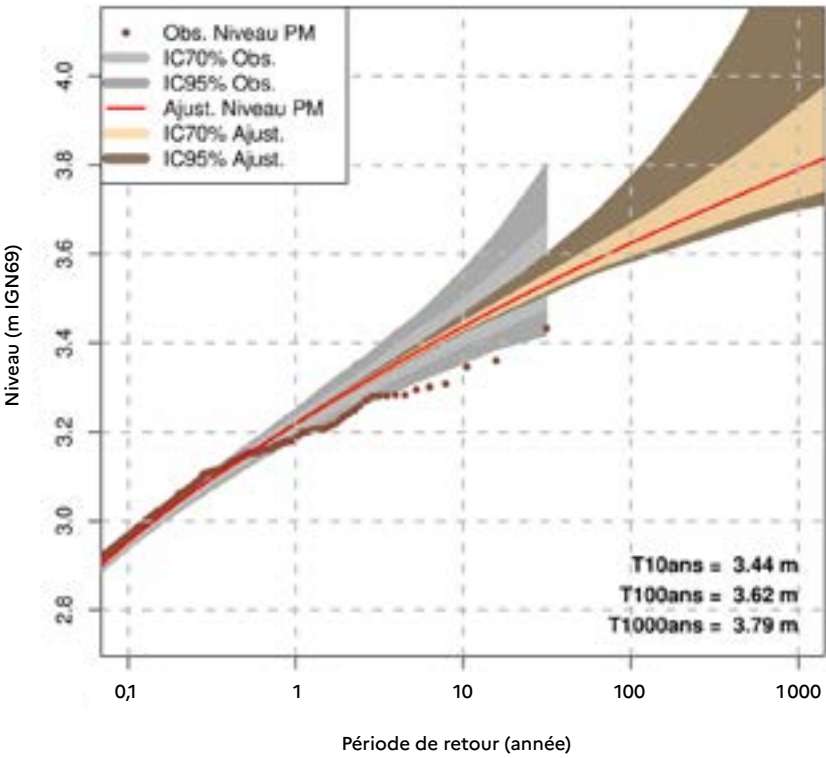


Niveau moyen pris en référence : 0,47 m IGN69.

Les Sables-d'Olonne – Périodes de retour des valeurs extrêmes de niveaux PM

Période de retour	Niveau PM (IGN69)		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	3,37 m	3,37 m à 3,38 m	3,36 m à 3,39 m
10 ans	3,44 m	3,43 m à 3,45 m	3,42 m à 3,47 m
20 ans	3,50 m	3,48 m à 3,51 m	3,48 m à 3,54 m
50 ans	3,57 m	3,55 m à 3,60 m	3,54 m à 3,66 m
100 ans	3,62 m	3,60 m à 3,67 m	3,58 m à 3,77 m
200 ans	3,68 m	3,64 m à 3,74 m	3,62 m à 3,91 m
500 ans	3,74 m	3,69 m à 3,84 m	3,67 m à 4,14 m
1 000 ans	3,79 m	3,73 m à 3,93 m	3,70 m à 4,37 m

Les Sables-d'Olonne – Valeurs extrêmes de niveau PM estimées par la convolution marée-surcote



3.1.17 - LA ROCHELLE LA PALLICE

La durée d'observation cumulée est de 37,60 années, s'étalant du 18/05/1941 au 31/12/2021.

La Rochelle La Pallice – Paramètres d'ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,44 m	s0 =	0,44 m
n =	6,243790	n =	6,243790
σ =	0,099510	ρ =	9,492307
ξ =	0,054997		

Rappel
Pour la surcote s associée à la période de retour $Tret$:

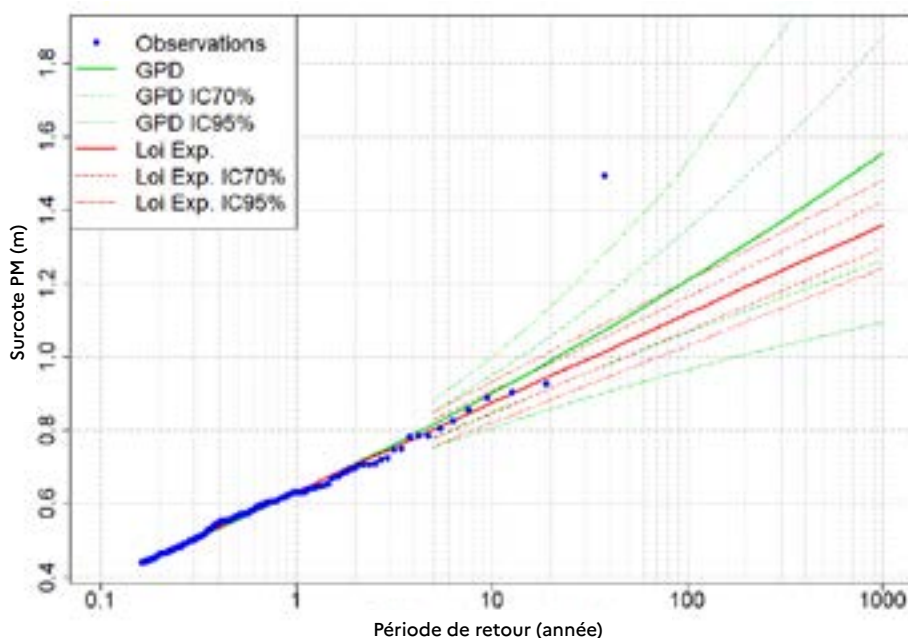
GPD : $Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s_0) \right)^{(1/\xi)}$

Loi Exp. : $Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s_0))$

La Rochelle La Pallice – Périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote PM

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,82 m	0,78 m à 0,85 m	0,75 m à 0,88 m	0,80 m	0,78 m à 0,83 m	0,76 m à 0,85 m
10 ans	0,90 m	0,85 m à 0,95 m	0,80 m à 1,00 m	0,88 m	0,85 m à 0,91 m	0,82 m à 0,93 m
20 ans	0,99 m	0,91 m à 1,06 m	0,86 m à 1,14 m	0,95 m	0,91 m à 0,98 m	0,88 m à 1,02 m
50 ans	1,11 m	1,00 m à 1,22 m	0,92 m à 1,34 m	1,05 m	1,00 m à 1,09 m	0,97 m à 1,13 m
100 ans	1,21 m	1,06 m à 1,35 m	0,96 m à 1,53 m	1,12 m	1,07 m à 1,16 m	1,03 m à 1,21 m
200 ans	1,31 m	1,12 m à 1,50 m	1,00 m à 1,74 m	1,19 m	1,14 m à 1,24 m	1,09 m à 1,29 m
500 ans	1,45 m	1,20 m à 1,71 m	1,05 m à 2,08 m	1,29 m	1,23 m à 1,35 m	1,18 m à 1,40 m
1 000 ans	1,56 m	1,25 m à 1,89 m	1,08 m à 2,36 m	1,36 m	1,30 m à 1,42 m	1,24 m à 1,48 m

La Rochelle La Pallice – Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

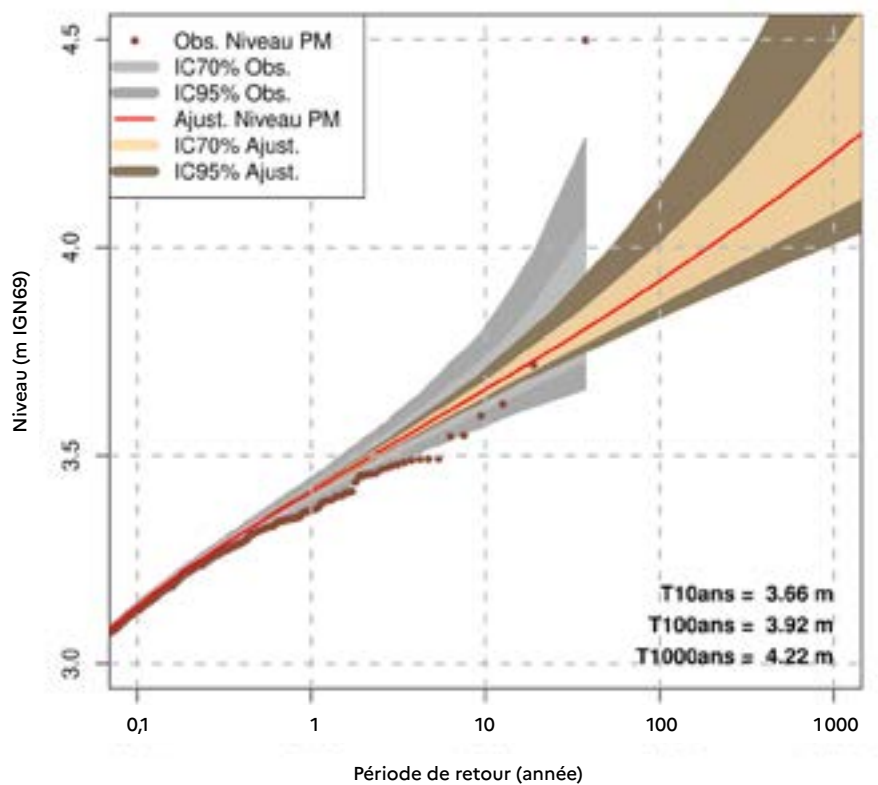


Niveau moyen pris en référence : 0,42 m IGN69.

La Rochelle La Pallice – Périodes de retour des valeurs extrêmes de niveaux PM

Période de retour	Niveau PM (IGN69)		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	3,59 m	3,58 m à 3,60 m	3,57 m à 3,62 m
10 ans	3,66 m	3,64 m à 3,68 m	3,63 m à 3,71 m
20 ans	3,73 m	3,71 m à 3,77 m	3,70 m à 3,82 m
50 ans	3,84 m	3,80 m à 3,90 m	3,77 m à 3,99 m
100 ans	3,92 m	3,86 m à 4,01 m	3,83 m à 4,15 m
200 ans	4,01 m	3,93 m à 4,13 m	3,89 m à 4,33 m
500 ans	4,13 m	4,02 m à 4,32 m	3,96 m à 4,61 m
1 000 ans	4,22 m	4,08 m à 4,48 m	4,01 m à 4,87 m

La Rochelle La Pallice – Valeurs extrêmes de niveau PM estimées par la convolution marée-surcote



3.1.18 - ILE D'AIX

La durée d'observation cumulée est de 9,99 années, s'étalant du 08/01/1973 au 31/12/2021.

Ile d'Aix – Paramètres d'ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,40 m	s0 =	0,40 m
n =	4,153537	n =	4,153537
σ =	0,106049	ρ =	10,407262
ξ =	-0,102925		

Rappel
Pour la surcote s associée à la période de retour $Tret$:

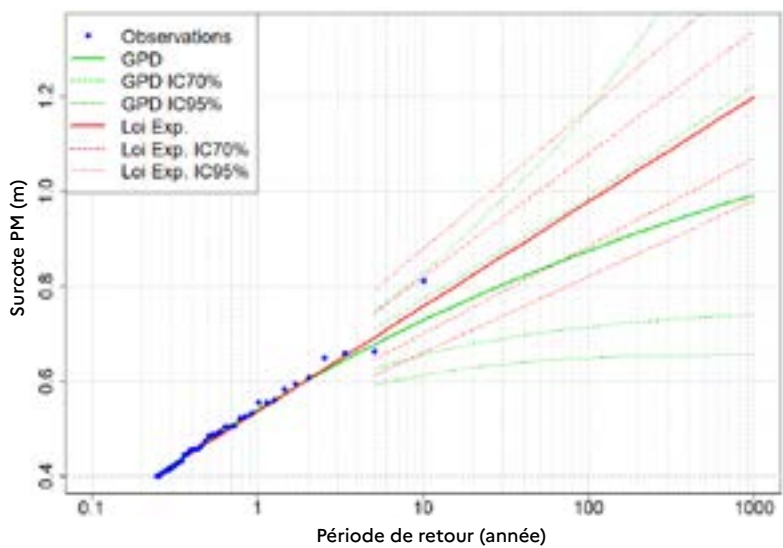
GPD : $Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s_0) \right)^{(1/\xi)}$

Loi Exp. : $Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s_0))$

Ile d'Aix – Périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote PM

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,68 m	0,62 m à 0,71 m	0,60 m à 0,75 m	0,69 m	0,65 m à 0,74 m	0,61 m à 0,78 m
10 ans	0,73 m	0,65 m à 0,77 m	0,62 m à 0,84 m	0,76 m	0,70 m à 0,82 m	0,66 m à 0,87 m
20 ans	0,78 m	0,68 m à 0,84 m	0,63 m à 0,93 m	0,82 m	0,76 m à 0,89 m	0,71 m à 0,96 m
50 ans	0,84 m	0,70 m à 0,92 m	0,64 m à 1,08 m	0,91 m	0,83 m à 1,00 m	0,77 m à 1,07 m
100 ans	0,88 m	0,71 m à 0,99 m	0,64 m à 1,20 m	0,98 m	0,89 m à 1,07 m	0,82 m à 1,16 m
200 ans	0,91 m	0,72 m à 1,06 m	0,65 m à 1,36 m	1,05 m	0,94 m à 1,15 m	0,87 m à 1,25 m
500 ans	0,96 m	0,73 m à 1,15 m	0,65 m à 1,57 m	1,13 m	1,02 m à 1,25 m	0,93 m à 1,36 m
1 000 ans	0,99 m	0,73 m à 1,22 m	0,65 m à 1,74 m	1,20 m	1,07 m à 1,33 m	0,98 m à 1,45 m

Ile d'Aix – Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

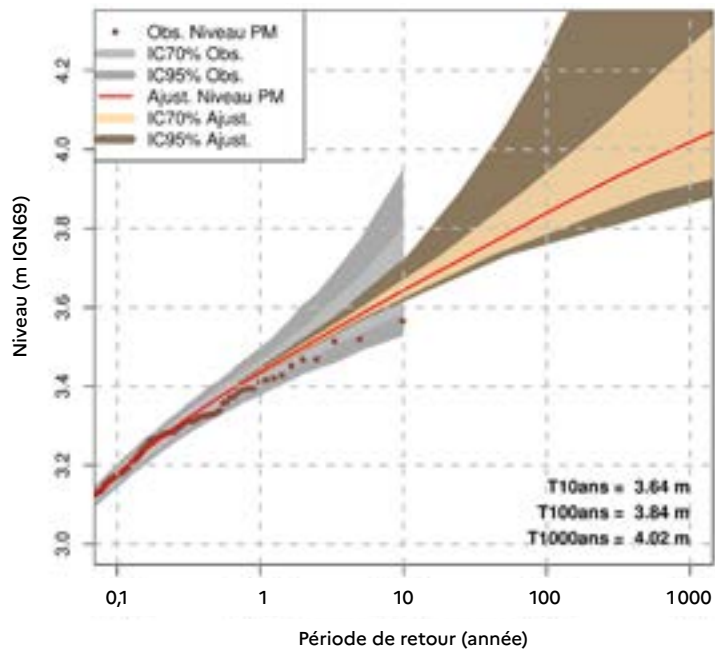


Niveau moyen pris en référence : 0,45 m IGN69.

Ile d'Aix – Périodes de retour des valeurs extrêmes de niveaux PM

Période de retour	Niveau PM (IGN69)		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	3,58 m	3,57 m à 3,60 m	3,57 m à 3,63 m
10 ans	3,64 m	3,63 m à 3,67 m	3,62 m à 3,72 m
20 ans	3,70 m	3,68 m à 3,74 m	3,66 m à 3,85 m
50 ans	3,78 m	3,74 m à 3,85 m	3,73 m à 4,05 m
100 ans	3,84 m	3,79 m à 3,94 m	3,76 m à 4,24 m
200 ans	3,90 m	3,83 m à 4,03 m	3,79 m à 4,45 m
500 ans	3,97 m	3,89 m à 4,16 m	3,83 m à 4,75 m
1 000 ans	4,02 m	3,91 m à 4,26 m	3,86 m à 5,09 m

Ile d'Aix – Valeurs extrêmes de niveau PM estimées par la convolution marée-surcote



3.1.19 - PORT-BLOC

La durée d'observation cumulée est de 32,98 années, s'étalant du 18/04/1959 au 31/12/2021.

Port-Bloc – Paramètres d’ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,49 m	s0 =	0,49 m
n =	6,313599	n =	6,313599
σ =	0,096680	ρ =	10,204952
ξ =	0,013384		

Rappel
Pour la surcote s associée à la période de retour $Tret$:

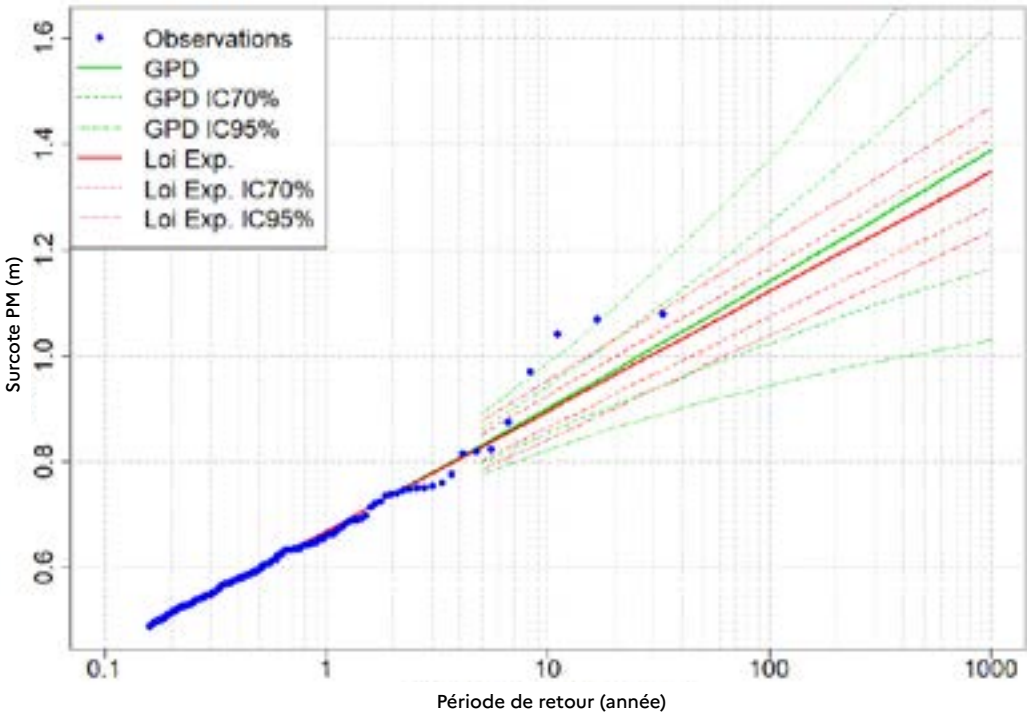
GPD : $Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s_0) \right)^{(1/\xi)}$

Loi Exp. : $Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s_0))$

Port-Bloc – Périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote PM

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,83 m	0,80 m à 0,86 m	0,78 m à 0,89 m	0,83 m	0,80 m à 0,85 m	0,78 m à 0,88 m
10 ans	0,90 m	0,86 m à 0,94 m	0,82 m à 0,99 m	0,90 m	0,87 m à 0,93 m	0,84 m à 0,95 m
20 ans	0,97 m	0,91 m à 1,02 m	0,87 m à 1,10 m	0,96 m	0,93 m à 1,00 m	0,90 m à 1,03 m
50 ans	1,07 m	0,97 m à 1,15 m	0,91 m à 1,26 m	1,05 m	1,01 m à 1,10 m	0,98 m à 1,13 m
100 ans	1,14 m	1,02 m à 1,25 m	0,95 m à 1,40 m	1,12 m	1,08 m à 1,17 m	1,04 m à 1,21 m
200 ans	1,21 m	1,06 m à 1,36 m	0,98 m à 1,54 m	1,19 m	1,14 m à 1,24 m	1,10 m à 1,29 m
500 ans	1,31 m	1,12 m à 1,51 m	1,01 m à 1,77 m	1,28 m	1,22 m à 1,34 m	1,18 m à 1,39 m
1 000 ans	1,39 m	1,15 m à 1,62 m	1,03 m à 1,95 m	1,35 m	1,29 m à 1,41 m	1,24 m à 1,47 m

Port-Bloc – Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

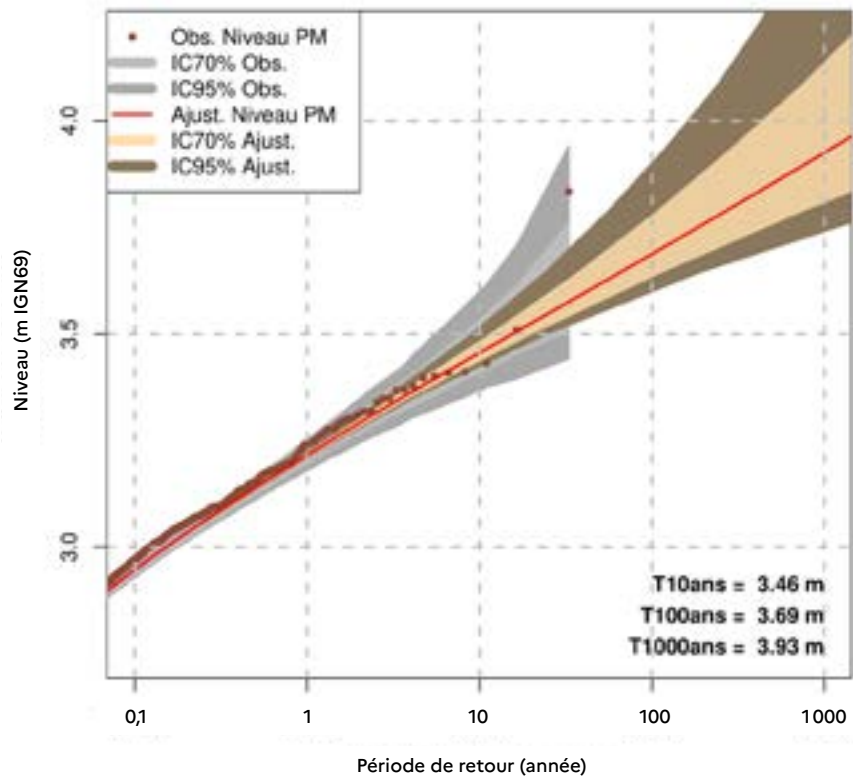


Niveau moyen pris en référence : 0,47 m IGN69.

Port-Bloc – Périodes de retour des valeurs extrêmes de niveaux PM

Période de retour	Niveau PM (IGN69)		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	3,39 m	3,37 m à 3,40 m	3,37 m à 3,42 m
10 ans	3,46 m	3,44 m à 3,48 m	3,42 m à 3,52 m
20 ans	3,53 m	3,50 m à 3,57 m	3,48 m à 3,62 m
50 ans	3,62 m	3,58 m à 3,68 m	3,55 m à 3,77 m
100 ans	3,69 m	3,63 m à 3,78 m	3,60 m à 3,90 m
200 ans	3,76 m	3,69 m à 3,88 m	3,65 m à 4,05 m
500 ans	3,85 m	3,76 m à 4,02 m	3,70 m à 4,28 m
1 000 ans	3,93 m	3,81 m à 4,14 m	3,74 m à 4,49 m

Port-Bloc – Valeurs extrêmes de niveau PM estimées par la convolution marée-surcote



3.1.20 - ARCACHON

La durée d’observation cumulée est de 21,05 années, s’étalant du 27/11/1967 au 31/12/2021.

Arcachon – Paramètres d’ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,51 m	s0 =	0,51 m
n =	5,469550	n =	5,469550
σ =	0,103708	ρ =	9,026738
ξ =	0,064349		

Rappel
Pour la surcote s associée à la période de retour T_{ret} :

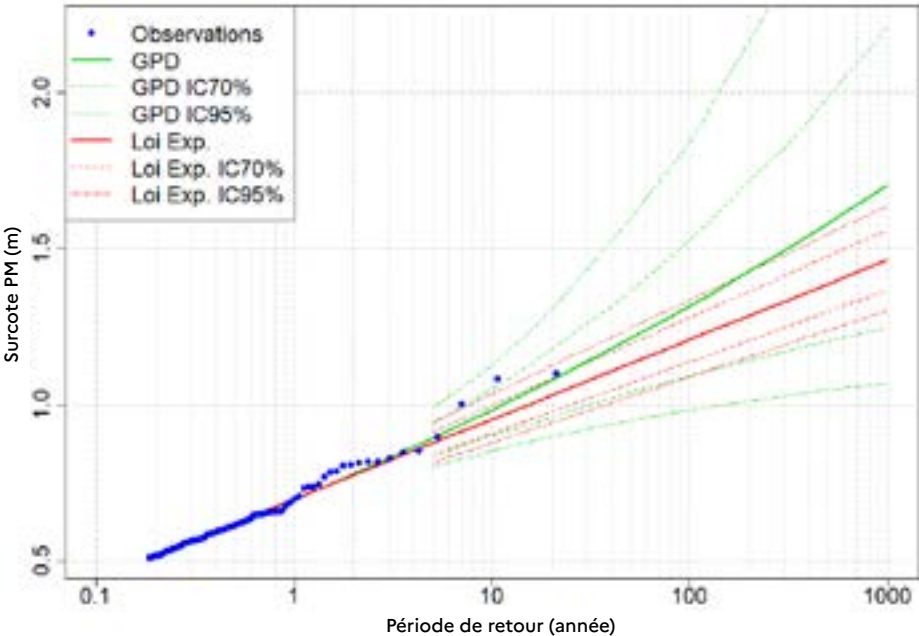
GPD : $T_{ret} = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s0) \right)^{(1/\xi)}$

Loi Exp. : $T_{ret} = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s0))$

Arcachon – Périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote PM

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,89 m	0,84 m à 0,94 m	0,80 m à 0,99 m	0,88 m	0,84 m à 0,91 m	0,82 m à 0,95 m
10 ans	0,98 m	0,90 m à 1,05 m	0,85 m à 1,13 m	0,95 m	0,91 m à 1,00 m	0,88 m à 1,04 m
20 ans	1,08 m	0,96 m à 1,18 m	0,89 m à 1,31 m	1,03 m	0,98 m à 1,08 m	0,94 m à 1,14 m
50 ans	1,21 m	1,03 m à 1,37 m	0,94 m à 1,57 m	1,13 m	1,07 m à 1,19 m	1,03 m à 1,26 m
100 ans	1,32 m	1,08 m à 1,54 m	0,97 m à 1,83 m	1,21 m	1,14 m à 1,28 m	1,09 m à 1,35 m
200 ans	1,43 m	1,13 m à 1,71 m	1,00 m à 2,13 m	1,29 m	1,21 m à 1,36 m	1,16 m à 1,44 m
500 ans	1,58 m	1,19 m à 1,97 m	1,03 m à 2,62 m	1,39 m	1,30 m à 1,47 m	1,24 m à 1,56 m
1 000 ans	1,70 m	1,24 m à 2,20 m	1,04 m à 3,07 m	1,46 m	1,37 m à 1,56 m	1,30 m à 1,66 m

Arcachon – Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

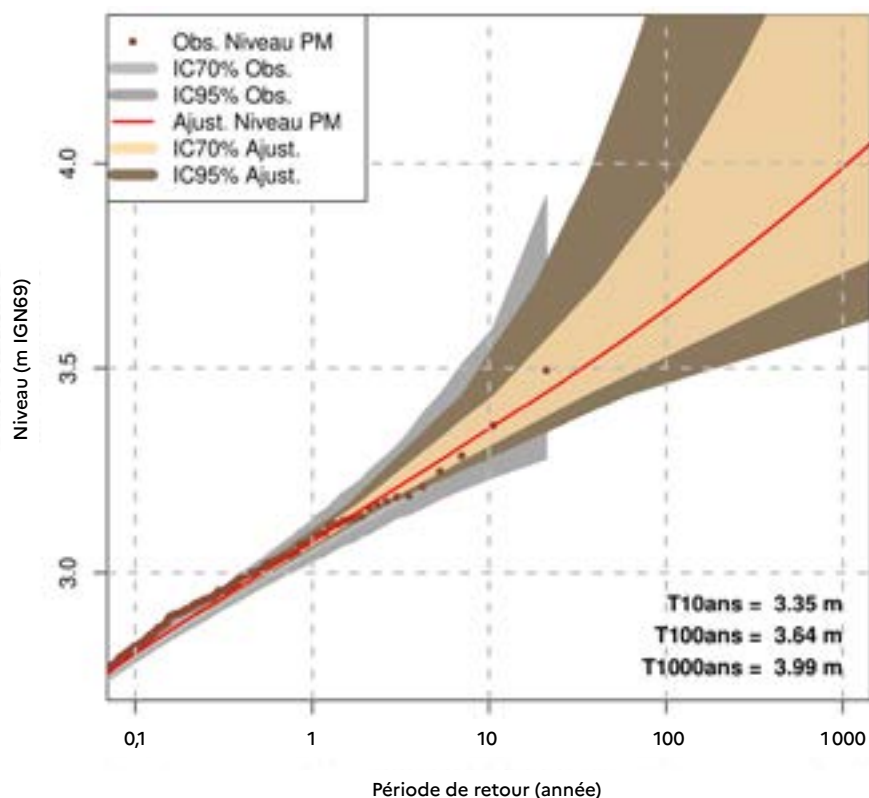


Niveau moyen pris en référence : 0,50 m IGN69.

Arcachon – Périodes de retour des valeurs extrêmes de niveaux PM

Période de retour	Niveau PM (IGN69)	Niveau PM	
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	3,27 m	3,24 m à 3,32 m	3,22 m à 3,37 m
10 ans	3,35 m	3,31 m à 3,42 m	3,28 m à 3,53 m
20 ans	3,43 m	3,38 m à 3,56 m	3,34 m à 3,74 m
50 ans	3,55 m	3,47 m à 3,75 m	3,42 m à 4,13 m
100 ans	3,64 m	3,53 m à 3,93 m	3,46 m à 4,51 m
200 ans	3,74 m	3,59 m à 4,14 m	3,50 m à 4,98 m
500 ans	3,88 m	3,67 m à 4,47 m	3,56 m à 5,86 m
1 000 ans	3,99 m	3,73 m à 4,76 m	3,60 m à NA

Arcachon – Valeurs extrêmes de niveau PM estimées par la convolution marée-surcote



3.1.21 - BAYONNE BOUCAU

La durée d'observation cumulée est de 42,72 années, s'étalant du 22/05/1967 au 02/07/2021.

Bayonne Boucau – Paramètres d'ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,46 m	s0 =	0,46 m
n =	3,716774	n =	3,716774
σ =	0,085148	ρ =	12,484790
ξ =	-0,062545		

Rappel

Pour la surcote s associée à la période de retour T_{ret} :

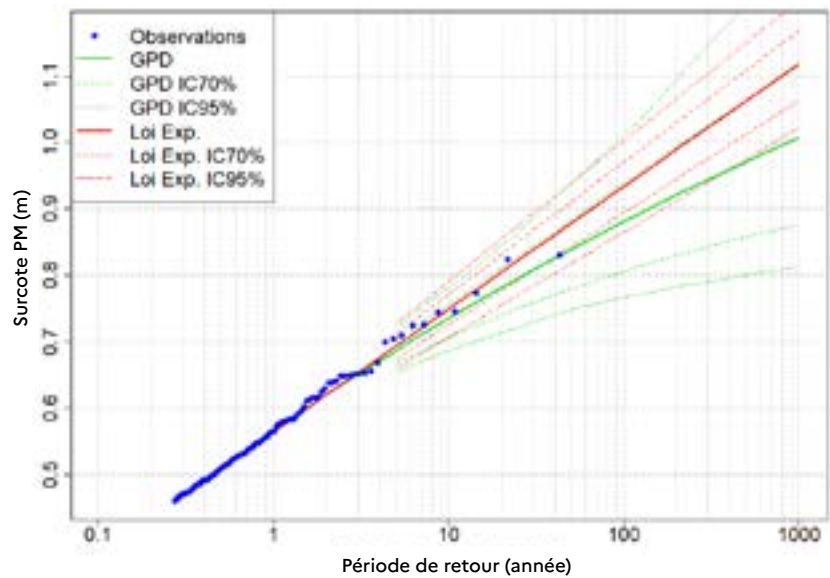
$$\text{GPD : } T_{ret} = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s_0) \right)^{(1/\xi)}$$

$$\text{Loi Exp. : } T_{ret} = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s_0))$$

Bayonne Boucau – Périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote PM

Période de retour	GPD			Loi Exp.	Loi Exp.	
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,69 m	0,67 m à 0,70 m	0,65 m à 0,72 m	0,69 m	0,67 m à 0,71 m	0,66 m à 0,73 m
10 ans	0,74 m	0,71 m à 0,76 m	0,69 m à 0,79 m	0,75 m	0,72 m à 0,77 m	0,71 m à 0,80 m
20 ans	0,78 m	0,74 m à 0,81 m	0,71 m à 0,85 m	0,81 m	0,78 m à 0,83 m	0,75 m à 0,86 m
50 ans	0,84 m	0,78 m à 0,88 m	0,74 m à 0,95 m	0,88 m	0,84 m à 0,91 m	0,81 m à 0,94 m
100 ans	0,88 m	0,81 m à 0,94 m	0,76 m à 1,02 m	0,93 m	0,89 m à 0,97 m	0,86 m à 1,01 m
200 ans	0,92 m	0,83 m à 0,99 m	0,78 m à 1,10 m	0,99 m	0,94 m à 1,03 m	0,91 m à 1,07 m
500 ans	0,97 m	0,86 m à 1,06 m	0,79 m à 1,23 m	1,06 m	1,01 m à 1,11 m	0,97 m à 1,16 m
1 000 ans	1,01 m	0,88 m à 1,12 m	0,80 m à 1,31 m	1,12 m	1,06 m à 1,17 m	1,02 m à 1,22 m

Bayonne Boucau – Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

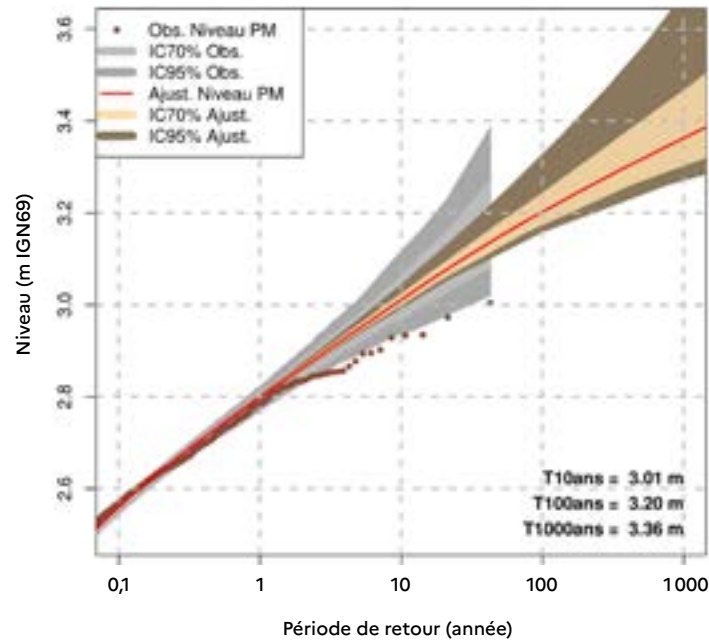


Niveau moyen pris en référence : 0,44 m IGN69.

Bayonne Boucau – Périodes de retour des valeurs extrêmes de niveaux PM

Période de retour	Niveau PM (IGN69)		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	2,95 m	2,94 m à 2,96 m	2,94 m à 2,97 m
10 ans	3,01 m	3,00 m à 3,02 m	2,99 m à 3,04 m
20 ans	3,07 m	3,06 m à 3,09 m	3,05 m à 3,12 m
50 ans	3,15 m	3,13 m à 3,18 m	3,11 m à 3,24 m
100 ans	3,20 m	3,17 m à 3,24 m	3,16 m à 3,33 m
200 ans	3,25 m	3,22 m à 3,31 m	3,19 m à 3,42 m
500 ans	3,32 m	3,27 m à 3,40 m	3,24 m à 3,56 m
1 000 ans	3,36 m	3,30 m à 3,47 m	3,27 m à 3,68 m

Bayonne Boucau – Valeurs extrêmes de niveau PM estimées par la convolution marée-surcote



3.1.22 - SAINT-JEAN-DE-LUZ SOCCOA

La durée d’observation cumulée est de 46,48 années, s’étalant du 20/11/1942 au 04/10/2021.

Saint-Jean-de-Luz Soccoa – Paramètres d’ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,34 m	s0 =	0,34 m
v =	3,002339	v =	3,002339
σ =	0,050566	ρ =	22,253515
ξ =	-0,127470		

Rappel
Pour la surcote s associée à la période de retour $Tret$:

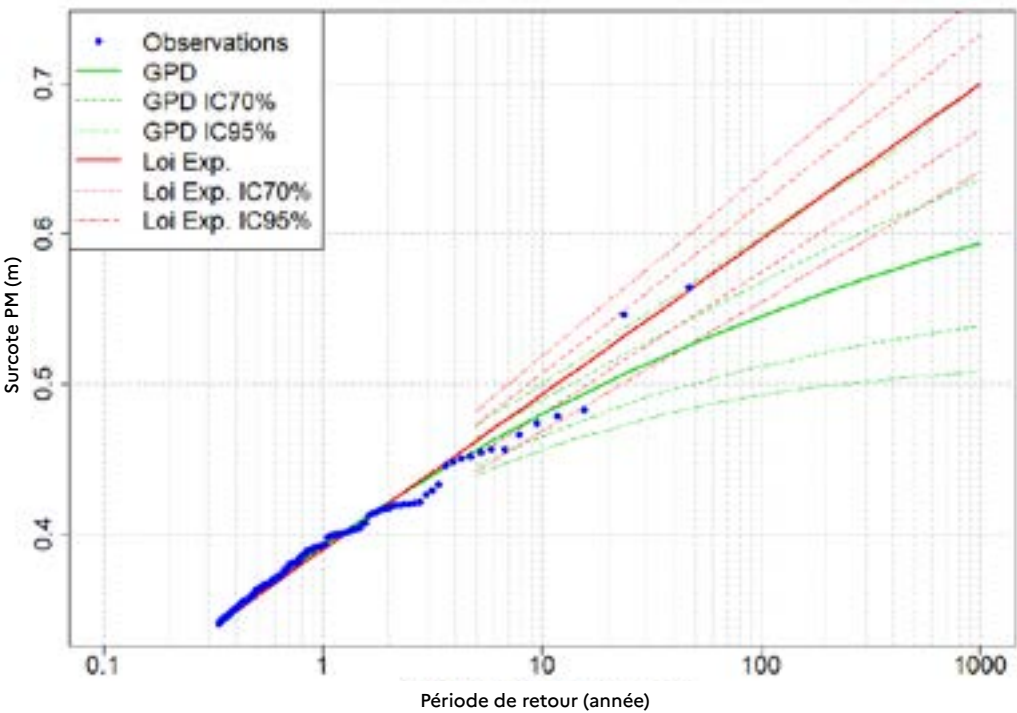
GPD : $Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s0) \right)^{(1/\xi)}$

Loi Exp. : $Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s0))$

Saint-Jean-de-Luz Soccoa – Périodes de retour des valeurs extrêmes de surcote PM

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,46 m	0,45 m à 0,46 m	0,44 m à 0,47 m	0,46 m	0,45 m à 0,47 m	0,44 m à 0,48 m
10 ans	0,48 m	0,47 m à 0,49 m	0,46 m à 0,50 m	0,49 m	0,48 m à 0,51 m	0,47 m à 0,52 m
20 ans	0,50 m	0,48 m à 0,51 m	0,47 m à 0,53 m	0,52 m	0,51 m à 0,54 m	0,50 m à 0,56 m
50 ans	0,53 m	0,50 m à 0,54 m	0,49 m à 0,57 m	0,57 m	0,55 m à 0,59 m	0,53 m à 0,60 m
100 ans	0,54 m	0,51 m à 0,56 m	0,49 m à 0,59 m	0,60 m	0,57 m à 0,62 m	0,56 m à 0,64 m
200 ans	0,56 m	0,52 m à 0,59 m	0,50 m à 0,62 m	0,63 m	0,60 m à 0,65 m	0,58 m à 0,68 m
500 ans	0,58 m	0,53 m à 0,61 m	0,51 m à 0,66 m	0,67 m	0,64 m à 0,70 m	0,62 m à 0,73 m
1 000 ans	0,59 m	0,54 m à 0,63 m	0,51 m à 0,68 m	0,70 m	0,67 m à 0,73 m	0,65 m à 0,76 m

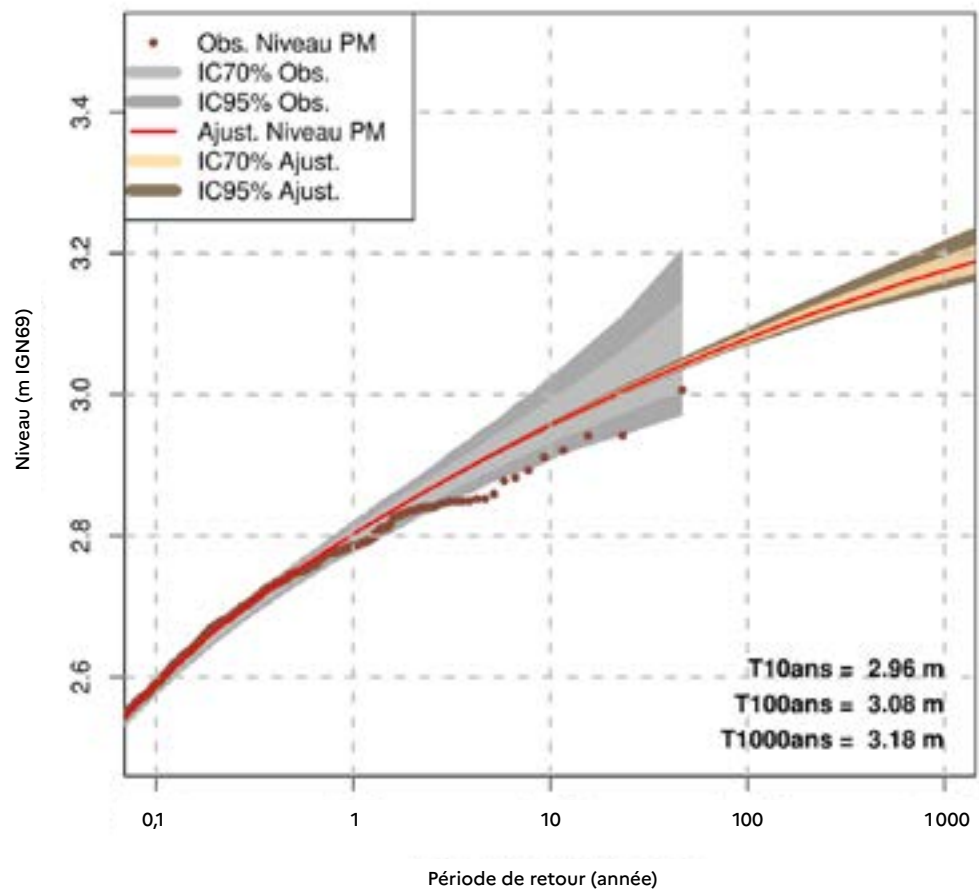
Saint-Jean-de-Luz Soccoa – Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote PM



Niveau moyen pris en référence : 0,36 m IGN69.

Saint-Jean-de-Luz Soccoa – Périodes de retour des valeurs extrêmes de niveaux PM

Période de retour	Niveau PM (IGN69)		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	2,91 m	2,91 m à 2,91 m	2,91 m à 2,92 m
10 ans	2,96 m	2,95 m à 2,96 m	2,95 m à 2,96 m
20 ans	3,00 m	2,99 m à 3,00 m	2,99 m à 3,00 m
50 ans	3,05 m	3,04 m à 3,05 m	3,04 m à 3,06 m
100 ans	3,08 m	3,07 m à 3,09 m	3,07 m à 3,09 m
200 ans	3,11 m	3,10 m à 3,12 m	3,10 m à 3,13 m
500 ans	3,15 m	3,14 m à 3,16 m	3,13 m à 3,18 m
1 000 ans	3,18 m	3,16 m à 3,19 m	3,15 m à 3,22 m



3.2 - RÉSULTAT LE LONG DU LINÉAIRE CÔTIER

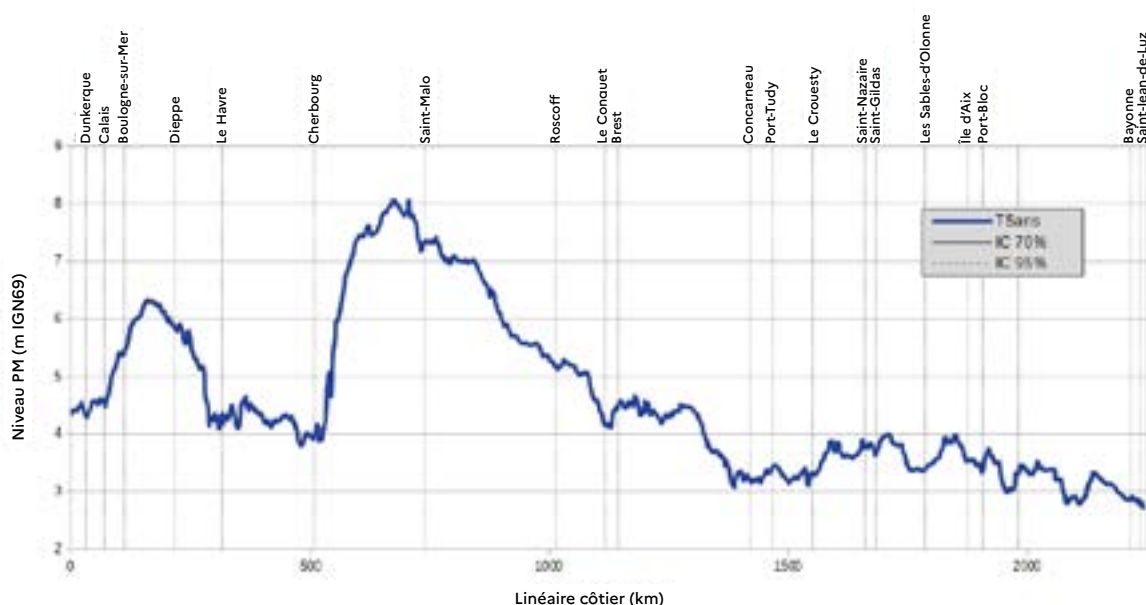
Sont présentées ci-après les estimations des valeurs extrêmes de niveau d'eau en Manche-Atlantique le long du linéaire côtier. À titre d'information sont présentées en annexe les variations le long du linéaire côtier :

- des marées de PM en Manche-Atlantique (annexe 6) ;
- des profils de surcotes horaires en Manche-Atlantique (annexe 7).

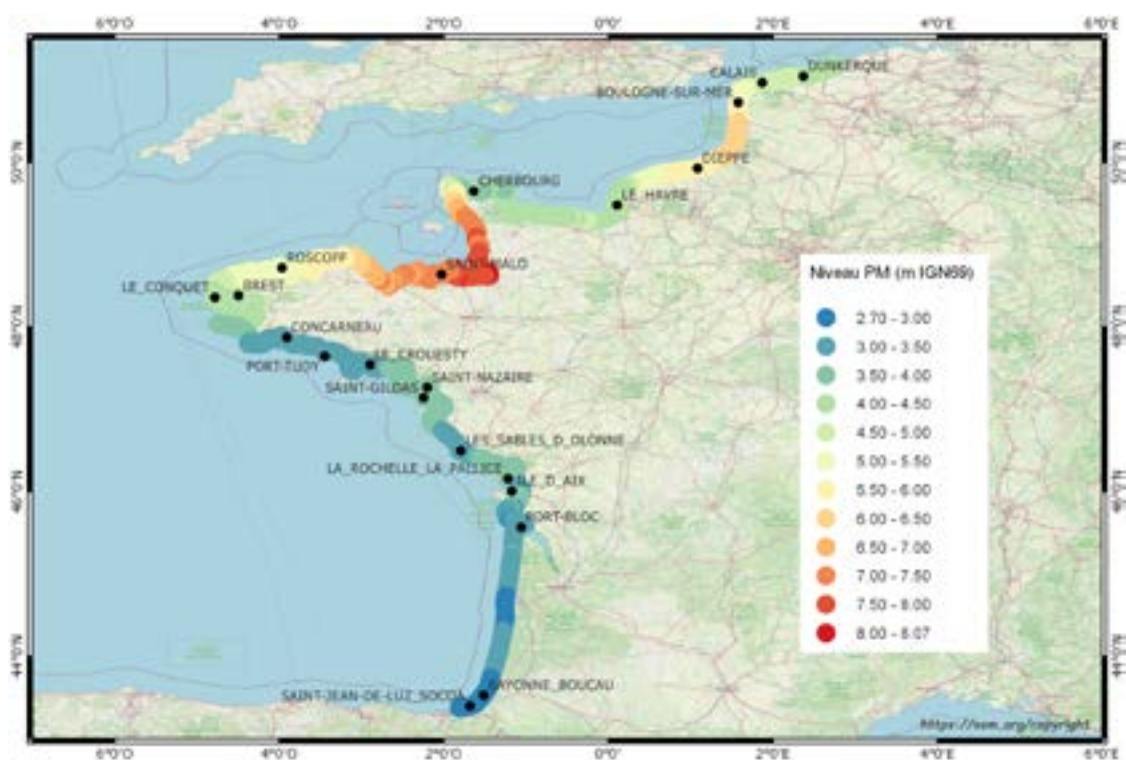
Attention aux échelles de couleurs qui sont variables d'une figure à l'autre.

3.2.1 - NIVEAUX DE PÉRIODE DE RETOUR 5 ANS

Variation des niveaux PM de période de retour 5 ans le long du littoral (représentation 2D)

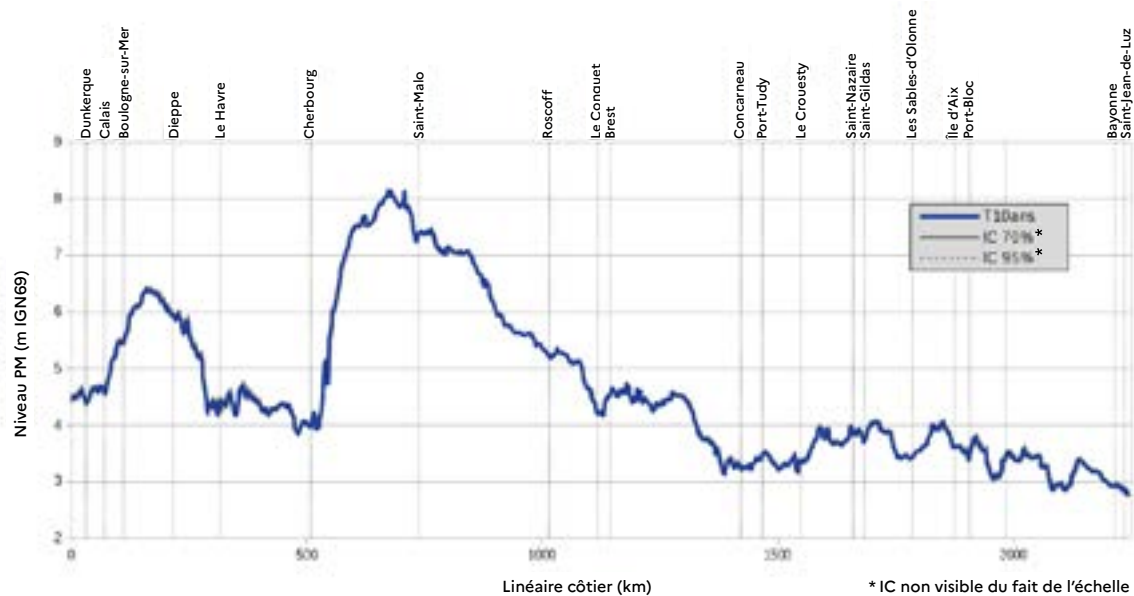


Variation des niveaux PM de période de retour 5 ans le long du littoral (représentation cartographique)

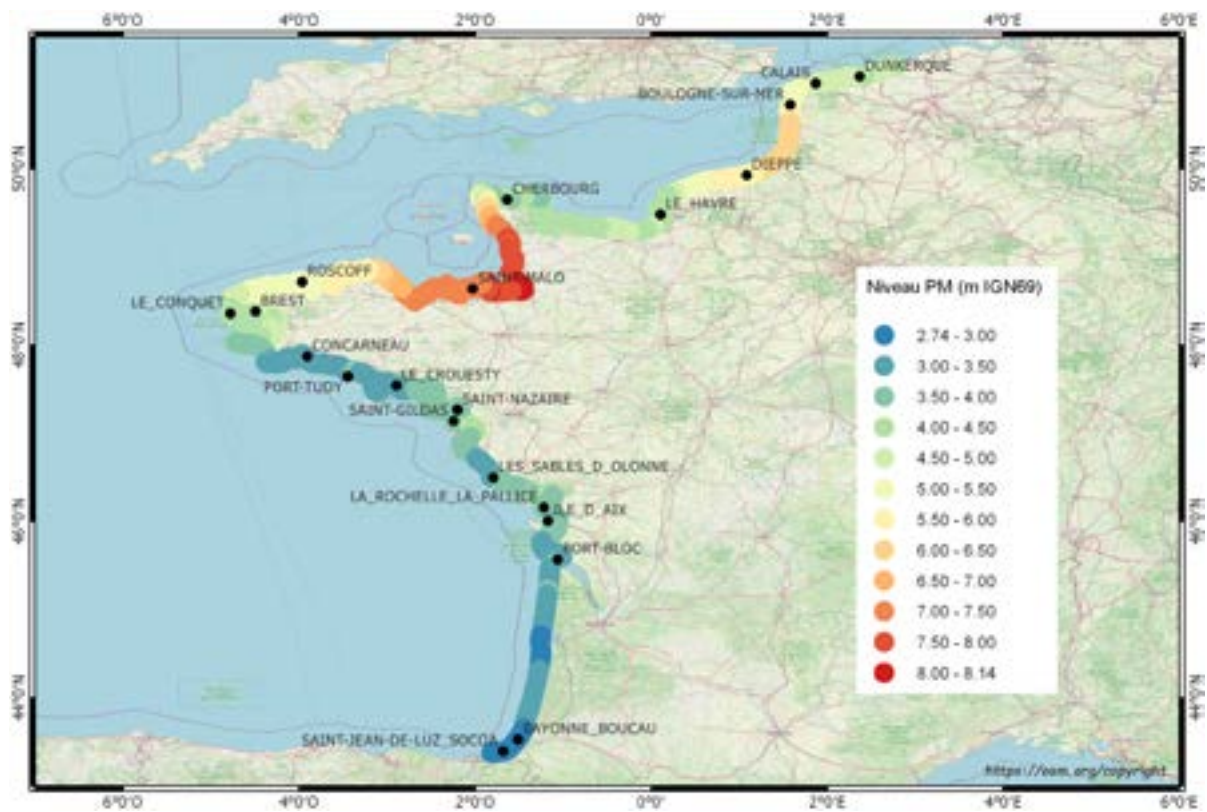


3.2.2 - NIVEAUX DE PÉRIODE DE RETOUR 10 ANS

Variation des niveaux PM de période de retour 10 ans le long du littoral (représentation 2D)

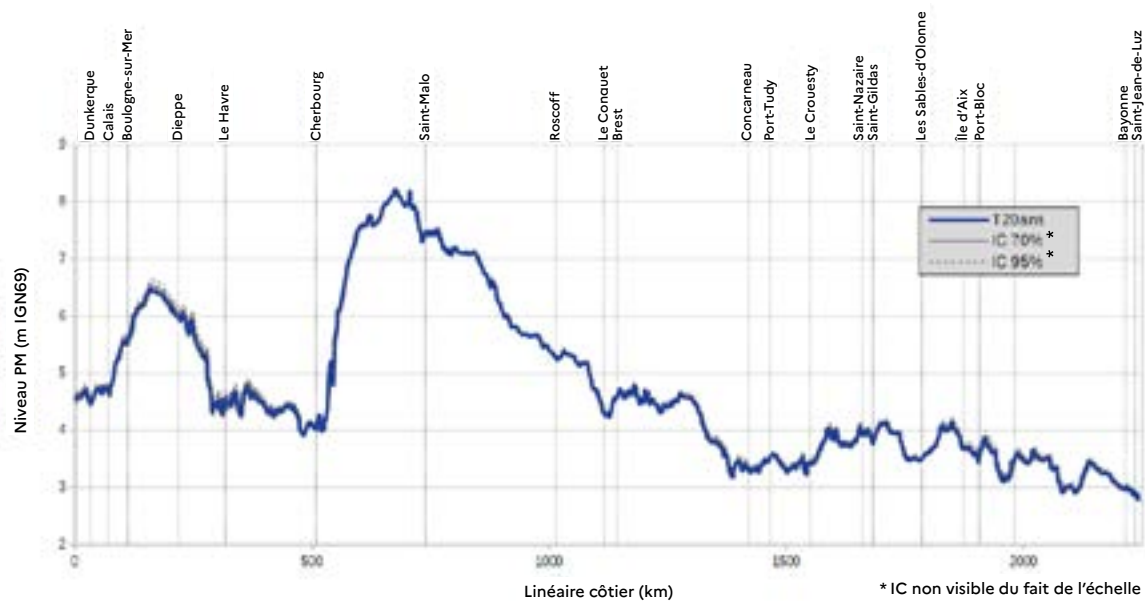


Variation des niveaux PM de période de retour 10 ans le long du littoral (représentation cartographique)

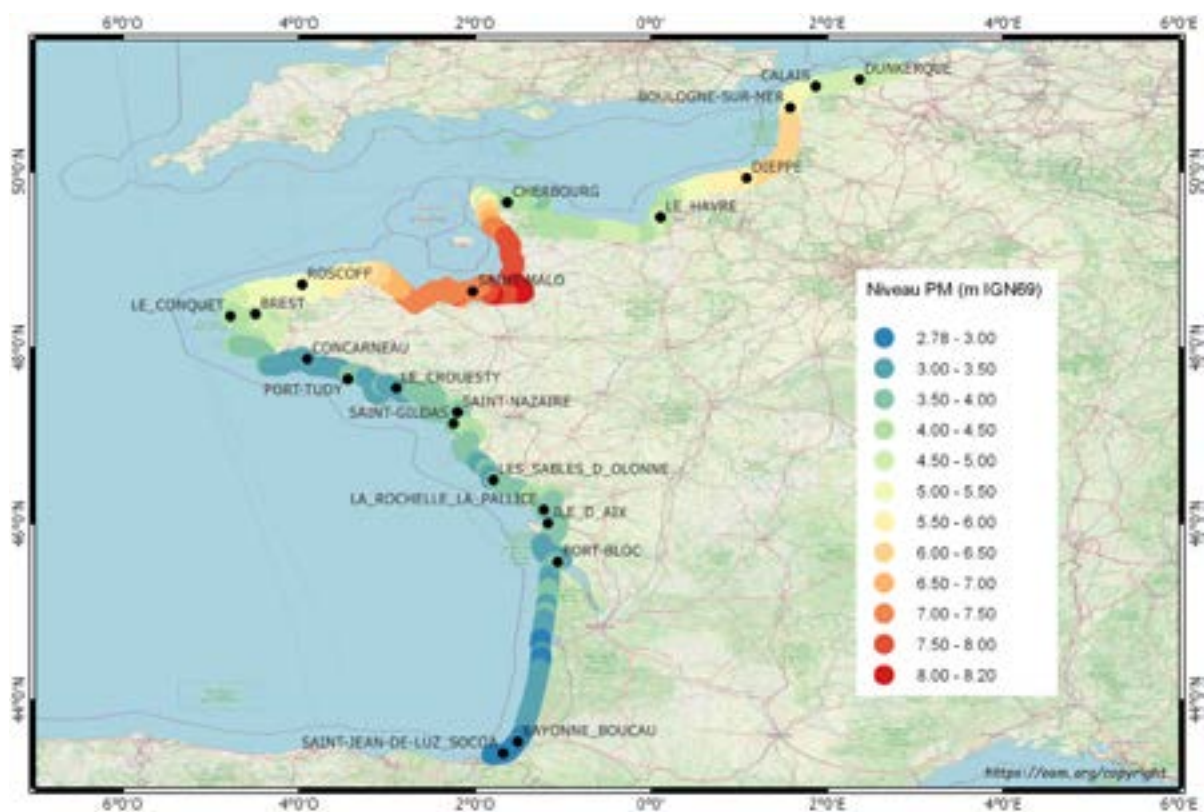


3.2.3 - NIVEAUX DE PÉRIODE DE RETOUR 20 ANS

Variation des niveaux PM de période de retour 20 ans le long du littoral (représentation 2D)

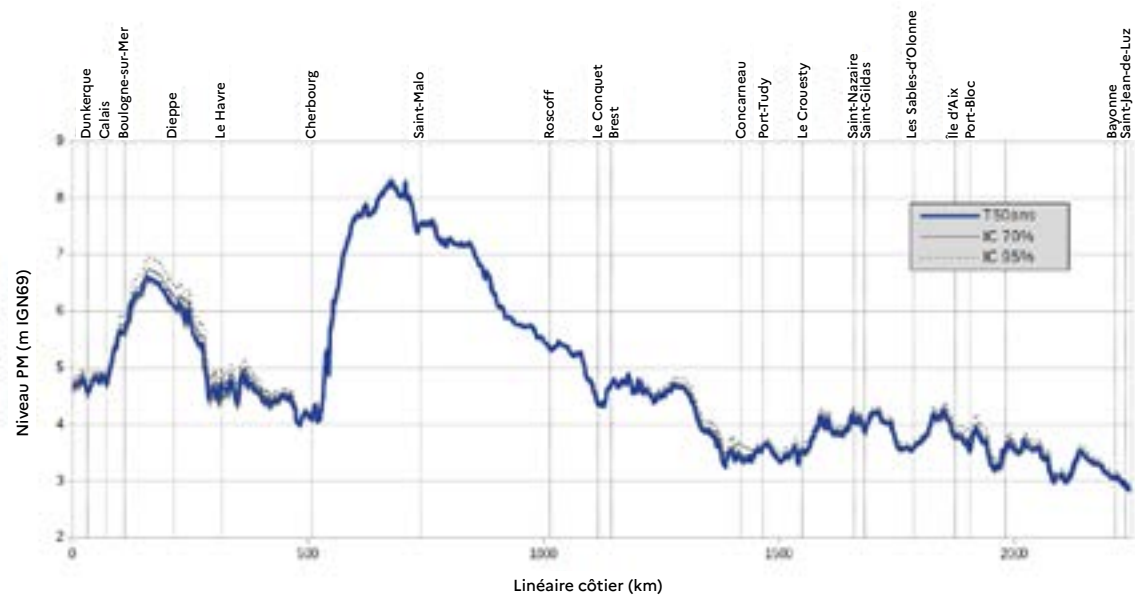


Variation des niveaux PM de période de retour 20 ans le long du littoral (représentation cartographique)

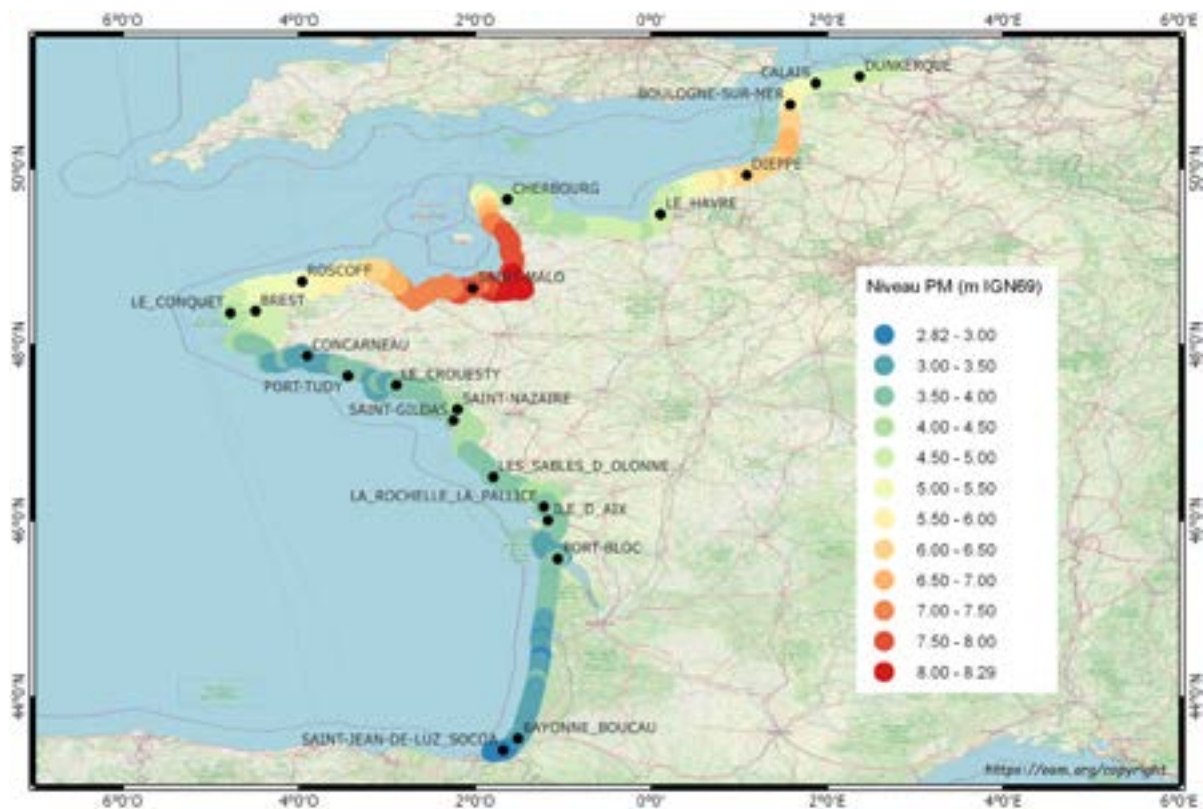


3.2.4 - NIVEAUX DE PÉRIODE DE RETOUR 50 ANS

Variation des niveaux PM de période de retour 50 ans le long du littoral (représentation 2D)

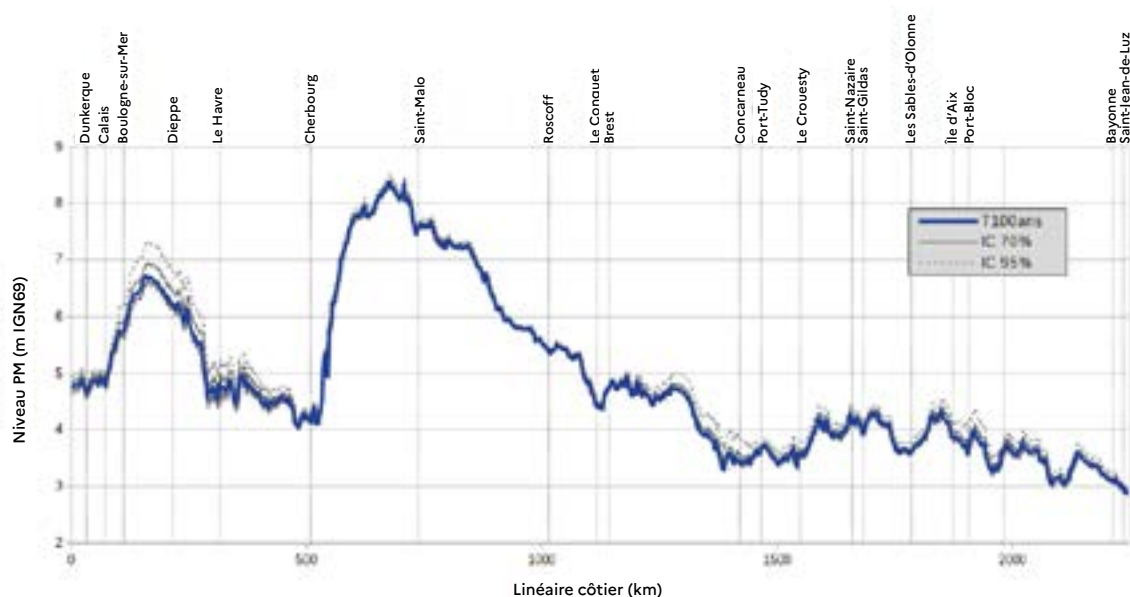


Variation des niveaux PM de période de retour 50 ans le long du littoral (représentation cartographique)

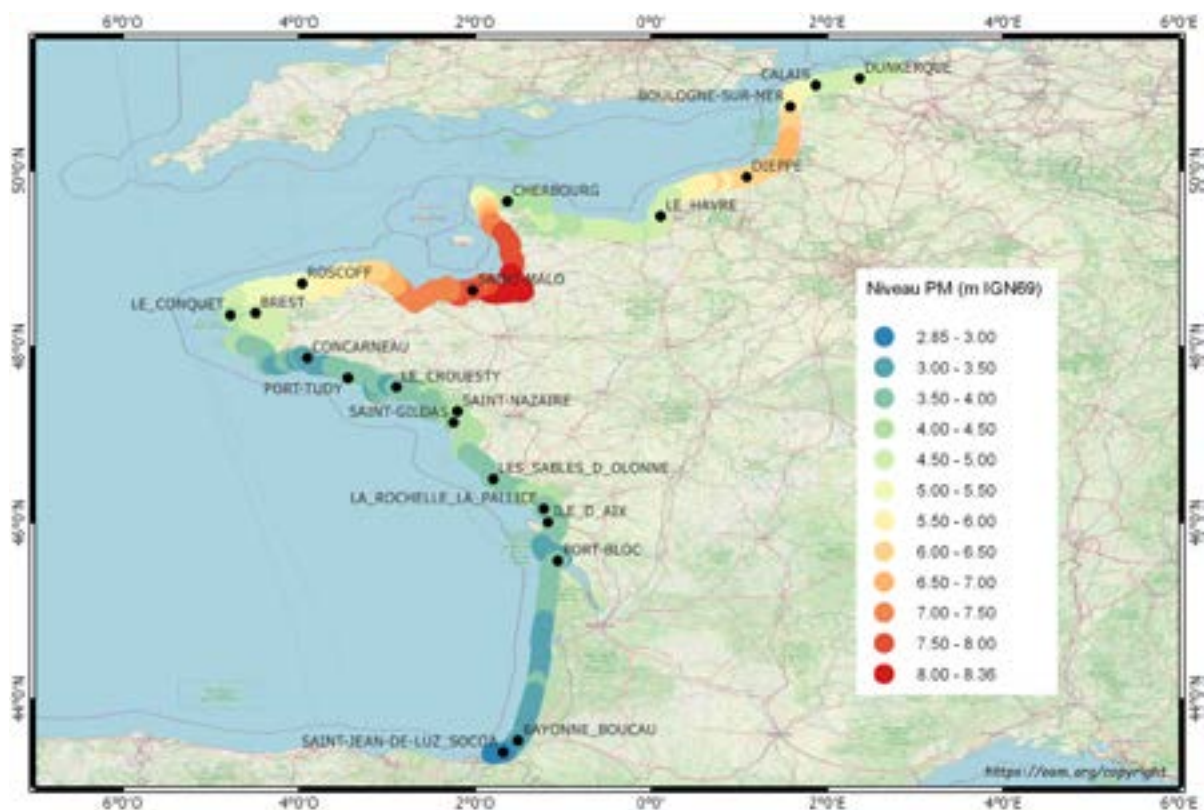


3.2.5 - NIVEAUX DE PÉRIODE DE RETOUR 100 ANS

Variation des niveaux PM de période de retour 100 ans le long du littoral (représentation 2D)



Variation des niveaux PM de période de retour 100 ans le long du littoral (représentation cartographique)





© Terra - Laurent Mignaux

CHAPITRE 4

Résultats en Méditerranée

MÉDITERRANÉE

4.1 - RÉSULTAT PAR PORT

4.1.1 - PORT- VENDRES

La durée d'observation cumulée est de 28,40 années, s'étalant du 28/12/1981 au 02/07/2021.

Port-Vendres – Paramètres d'ajustement statistique des niveaux horaires

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,50 m	s0 =	0,49 m
n =	3,310277	n =	3,768081
σ =	0,057571	ρ =	15,65721
ξ =	0,072544		

Rappel
Pour la surcote s associée à la période de retour $Tret$:

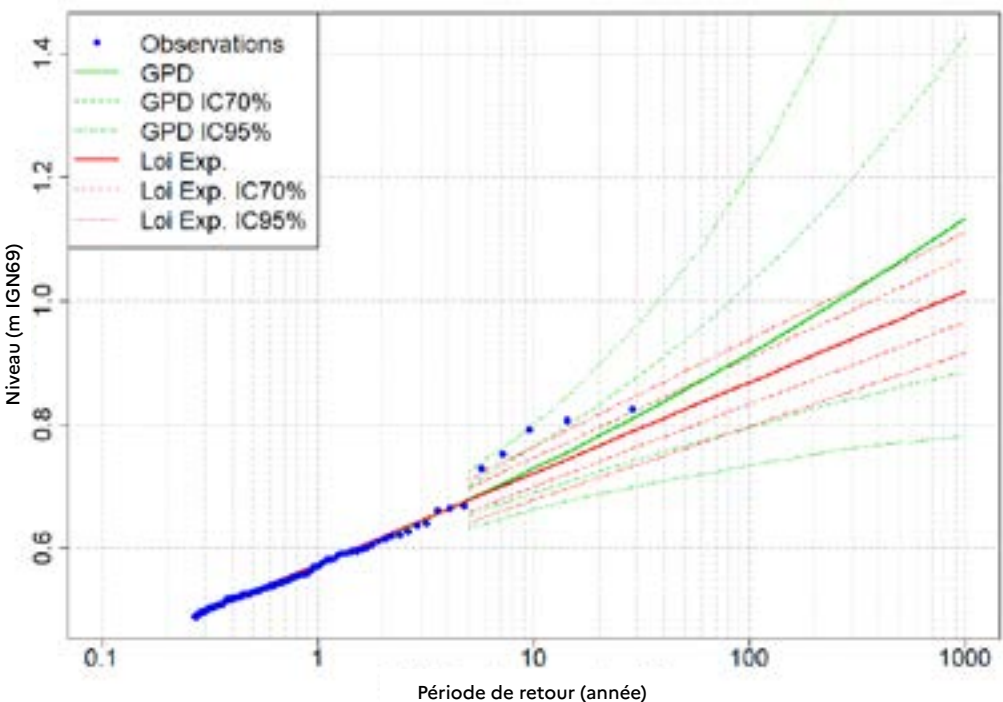
$$GPD : Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s_0) \right)^{1/\xi}$$

$$Loi Exp. : Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s_0))$$

Port-Vendres – Périodes de retour des valeurs extrêmes des niveaux horaires

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,68 m	0,65 m à 0,70 m	0,64 m à 0,73 m	0,68 m	0,66 m à 0,70 m	0,65 m à 0,72 m
10 ans	0,73 m	0,69 m à 0,76 m	0,67 m à 0,80 m	0,72 m	0,70 m à 0,75 m	0,68 m à 0,77 m
20 ans	0,78 m	0,72 m à 0,83 m	0,69 m à 0,89 m	0,77 m	0,74 m à 0,80 m	0,72 m à 0,82 m
50 ans	0,86 m	0,77 m à 0,94 m	0,72 m à 1,06 m	0,82 m	0,79 m à 0,86 m	0,77 m à 0,89 m
100 ans	0,92 m	0,80 m à 1,03 m	0,73 m à 1,20 m	0,87 m	0,83 m à 0,91 m	0,80 m à 0,95 m
200 ans	0,98 m	0,82 m à 1,13 m	0,75 m à 1,37 m	0,91 m	0,87 m à 0,96 m	0,84 m à 1,00 m
500 ans	1,07 m	0,86 m à 1,29 m	0,77 m à 1,68 m	0,97 m	0,93 m à 1,03 m	0,89 m à 1,07 m
1 000 ans	1,14 m	0,88 m à 1,43 m	0,78 m à 1,96 m	1,02 m	0,97 m à 1,07 m	0,93 m à 1,12 m

Port-Vendres – Ajustement statistique des valeurs extrêmes des niveaux horaires



4.1.2 - SÈTE

La durée d'observation cumulée est de 41,88 années, s'étalant du 23/04/1956 au 31/03/2022.

Sète – Paramètres d'ajustement statistique des niveaux horaires

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,54 m	s0 =	0,54 m
n =	4,728864	n =	4,728864
σ =	0,073424	ρ =	13,413813
ξ =	0,015100		

Rappel

Pour la surcote s associée à la période de retour $Tret$:

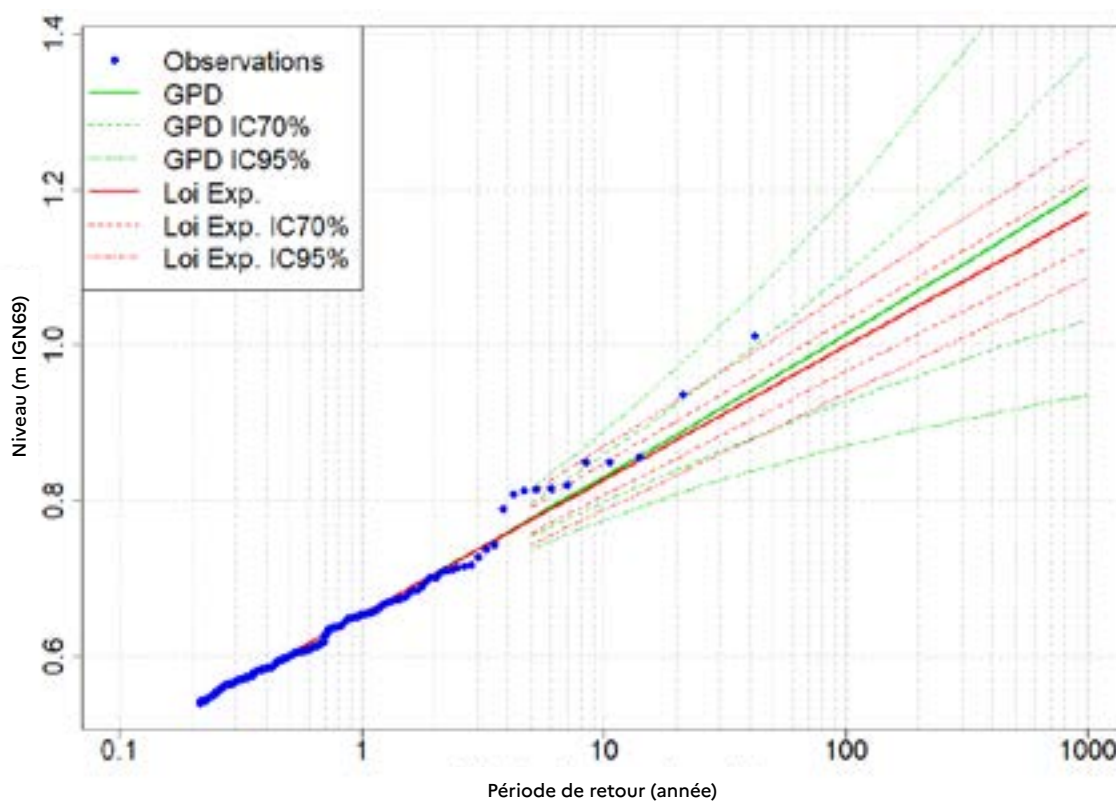
$$\text{GPD : } Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s - s_0) \right)^{(1/\xi)}$$

$$\text{Loi Exp. : } Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s - s_0))$$

Sète – Périodes de retour des valeurs extrêmes des niveaux horaires

Période de retour	GPD			Loi Exp.	Loi Exp.	
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,78 m	0,76 m à 0,80 m	0,74 m à 0,82 m	0,78 m	0,76 m à 0,79 m	0,74 m à 0,81 m
10 ans	0,83 m	0,80 m à 0,86 m	0,77 m à 0,90 m	0,83 m	0,81 m à 0,85 m	0,79 m à 0,87 m
20 ans	0,89 m	0,84 m à 0,93 m	0,81 m à 0,98 m	0,88 m	0,85 m à 0,90 m	0,83 m à 0,93 m
50 ans	0,96 m	0,89 m à 1,02 m	0,85 m à 1,11 m	0,95 m	0,92 m à 0,97 m	0,89 m à 1,00 m
100 ans	1,01 m	0,92 m à 1,10 m	0,87 m à 1,21 m	1,00 m	0,97 m à 1,03 m	0,93 m à 1,06 m
200 ans	1,07 m	0,96 m à 1,18 m	0,90 m à 1,34 m	1,05 m	1,01 m à 1,09 m	0,98 m à 1,12 m
500 ans	1,15 m	1,00 m à 1,29 m	0,93 m à 1,53 m	1,12 m	1,08 m à 1,16 m	1,04 m à 1,20 m
1 000 ans	1,20 m	1,03 m à 1,39 m	0,95 m à 1,68 m	1,17 m	1,12 m à 1,21 m	1,08 m à 1,26 m

Sète – Ajustement statistique des valeurs extrêmes des niveaux horaires



4.1.3 - FOS-SUR-MER

La durée d'observation cumulée est de 11,24 années, s'étalant du 31/01/2006 au 20/09/2021.

Fos-sur-Mer – Paramètres d'ajustement statistique des niveaux horaires

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,56 m	s0 =	0,56 m
n =	5,340075	n =	5,340075
σ =	0,067769	ρ =	16,642592
ξ =	-0,126602		

Rappel
Pour la surcote s associée à la période de retour $Tret$:

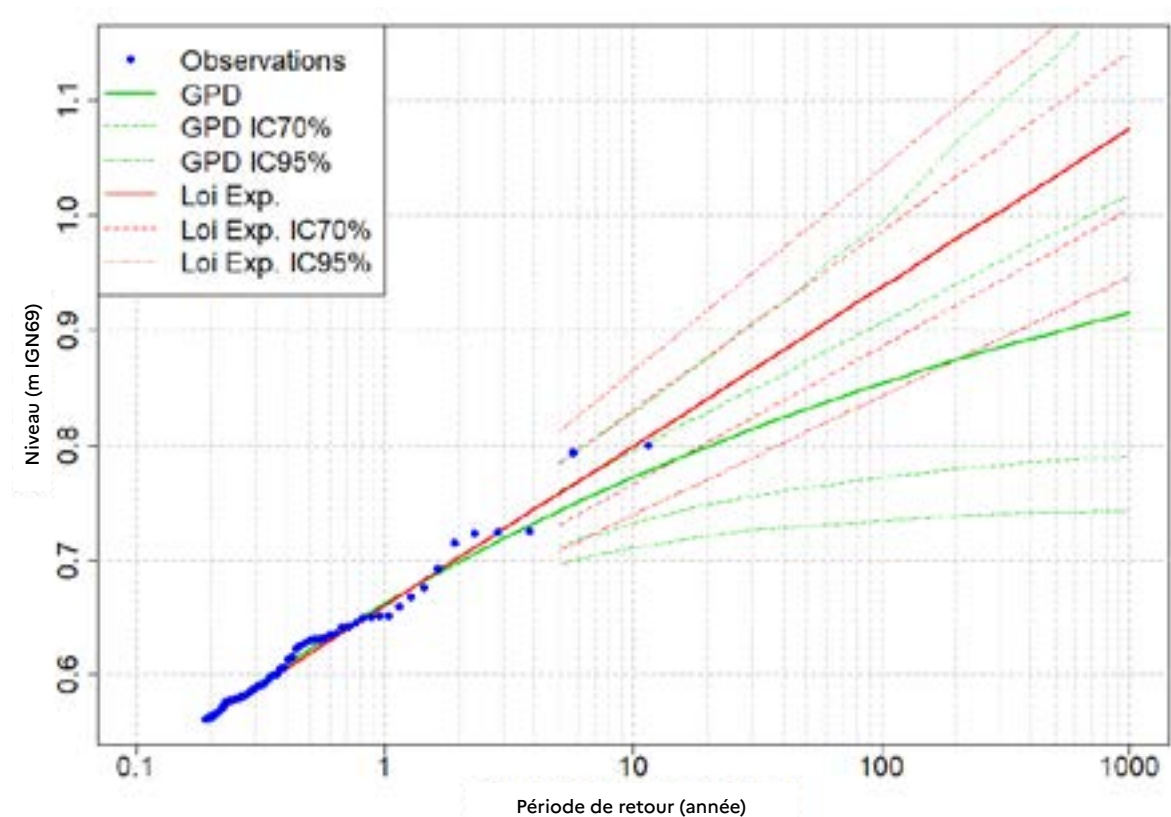
GPD : $Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s_0) \right)^{1/\xi}$

Loi Exp. : $Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s_0))$

Fos-sur-Mer – Périodes de retour des valeurs extrêmes des niveaux horaires

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,74 m	0,71 m à 0,76 m	0,69 m à 0,78 m	0,76 m	0,73 m à 0,78 m	0,71 m à 0,81 m
10 ans	0,77 m	0,73 m à 0,80 m	0,71 m à 0,83 m	0,80 m	0,77 m à 0,83 m	0,74 m à 0,87 m
20 ans	0,80 m	0,75 m à 0,83 m	0,72 m à 0,88 m	0,84 m	0,80 m à 0,88 m	0,77 m à 0,92 m
50 ans	0,83 m	0,76 m à 0,87 m	0,73 m à 0,95 m	0,90 m	0,85 m à 0,94 m	0,81 m à 0,99 m
100 ans	0,85 m	0,77 m à 0,90 m	0,73 m à 1,02 m	0,94 m	0,89 m à 0,99 m	0,84 m à 1,04 m
200 ans	0,87 m	0,78 m à 0,94 m	0,74 m à 1,08 m	0,98 m	0,92 m à 1,04 m	0,88 m à 1,10 m
500 ans	0,90 m	0,79 m à 0,98 m	0,74 m à 1,17 m	1,03 m	0,97 m à 1,10 m	0,92 m à 1,17 m
1 000 ans	0,91 m	0,79 m à 1,01 m	0,74 m à 1,25 m	1,08 m	1,01 m à 1,15 m	0,95 m à 1,22 m

Fos-sur-Mer – Ajustement statistique des valeurs extrêmes des niveaux horaires



4.1.4 - MARSEILLE

La durée d'observation cumulée est de 52,86 années, s'étalant du 01/11/1849 au 31/03/2022.

Marseille – Paramètres d'ajustement statistique des niveaux horaires

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,55 m	s0 =	0,60 m
n =	3,764984	n =	2,497377
σ =	0,135333	ρ =	8,877603
ξ =	-0,162773		

Rappel

Pour la surcote s associée à la période de retour $Tret$:

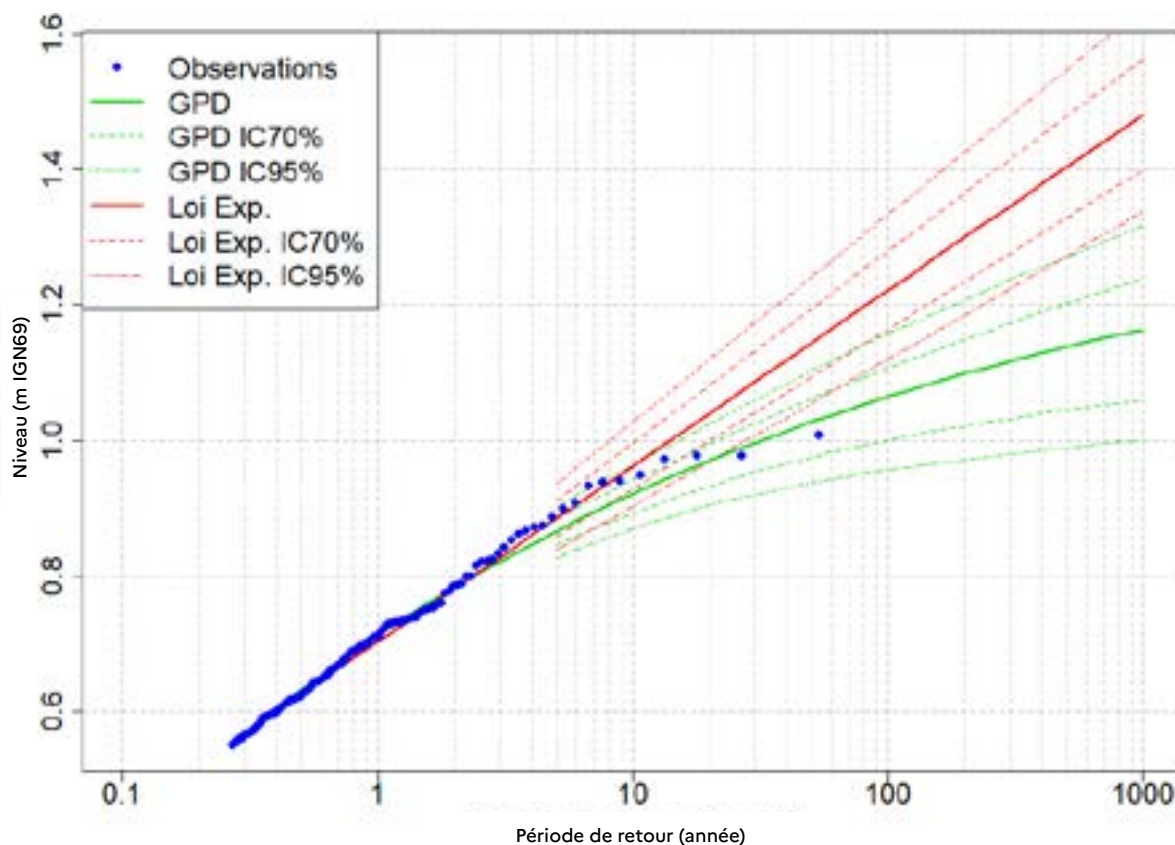
$$\text{GPD : } Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s_0) \right)^{1/\xi}$$

$$\text{Loi Exp. : } Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s_0))$$

Marseille – Périodes de retour des valeurs extrêmes des niveaux horaires

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

Marseille – Ajustement statistique des valeurs extrêmes des niveaux horaires



4.1.5 - TOULON

La durée d'observation cumulée est de 33,65 années, s'étalant du 31/12/1960 au 28/09/2020.

Toulon – Paramètres d’ajustement statistique des niveaux horaires

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,56 m	s0 =	0,56 m
n =	1,931852	n =	1,931852
σ =	0,044921	ρ =	22,784213
ξ =	-0,023234		

Rappel
Pour la surcote *s* associée à la période de retour *Tret* :

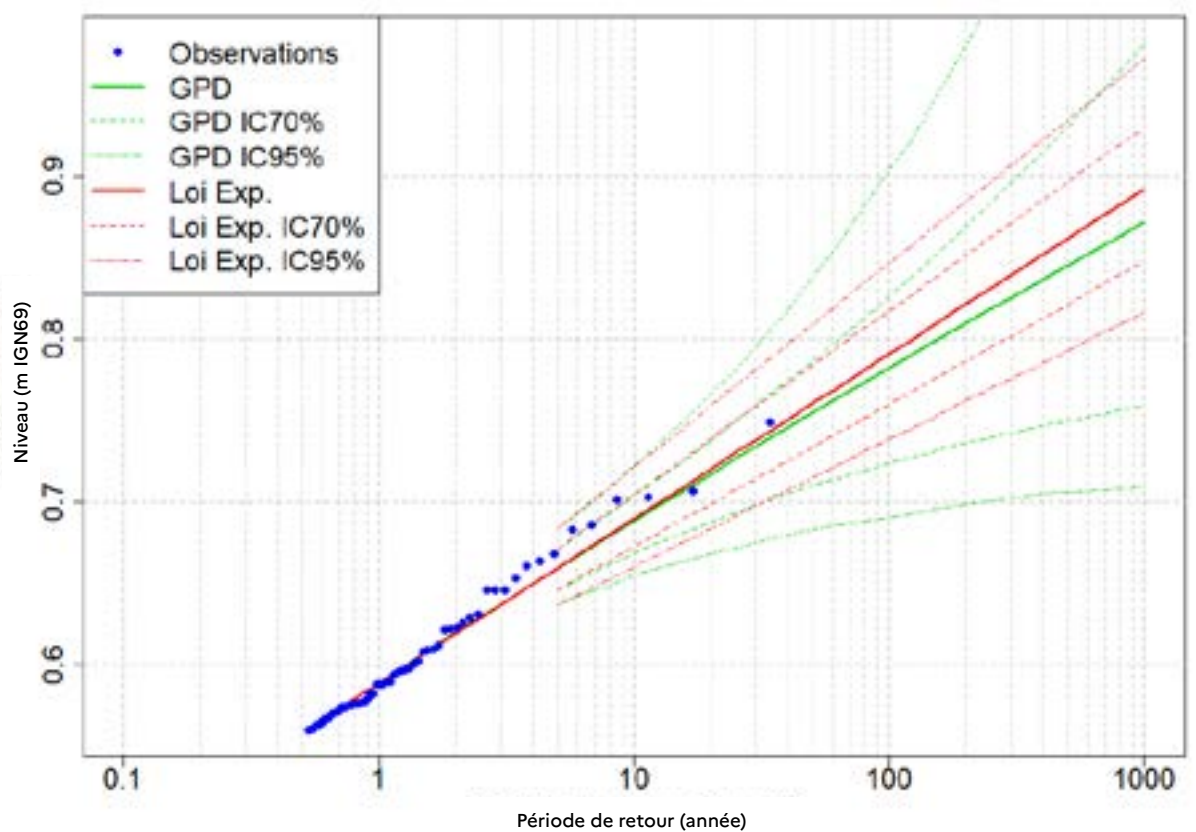
GPD : $Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s_0) \right)^{1/\xi}$

Loi Exp. : $Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s_0))$

Toulon – Périodes de retour des valeurs extrêmes des niveaux horaires

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,66 m	0,65 m à 0,67 m	0,64 m à 0,68 m	0,66 m	0,65 m à 0,67 m	0,64 m à 0,68 m
10 ans	0,69 m	0,67 m à 0,70 m	0,66 m à 0,72 m	0,69 m	0,67 m à 0,71 m	0,66 m à 0,72 m
20 ans	0,72 m	0,69 m à 0,74 m	0,67 m à 0,77 m	0,72 m	0,70 m à 0,74 m	0,68 m à 0,76 m
50 ans	0,75 m	0,71 m à 0,79 m	0,69 m à 0,84 m	0,76 m	0,74 m à 0,79 m	0,72 m à 0,81 m
100 ans	0,78 m	0,73 m à 0,83 m	0,70 m à 0,90 m	0,79 m	0,76 m à 0,82 m	0,74 m à 0,85 m
200 ans	0,81 m	0,74 m à 0,87 m	0,70 m à 0,96 m	0,82 m	0,79 m à 0,86 m	0,76 m à 0,89 m
500 ans	0,85 m	0,75 m à 0,93 m	0,71 m à 1,07 m	0,86 m	0,82 m à 0,90 m	0,79 m à 0,94 m
1 000 ans	0,87 m	0,76 m à 0,98 m	0,71 m à 1,16 m	0,89 m	0,85 m à 0,94 m	0,82 m à 0,98 m

Toulon – Ajustement statistique des valeurs extrêmes des niveaux horaires



4.1.6 - LA FIGUEIRETTE

La durée d'observation cumulée est de 10,12 années, s'étalant du 26/05/2011 au 04/10/2021.

La Figueirette – Paramètres d'ajustement statistique des niveaux horaires

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,54 m	s0 =	0,54 m
n =	4,842493	n =	4,842493
σ =	0,053028	ρ =	20,342040
ξ =	-0,079039		

Rappel

Pour la surcote s associée à la période de retour $Tret$:

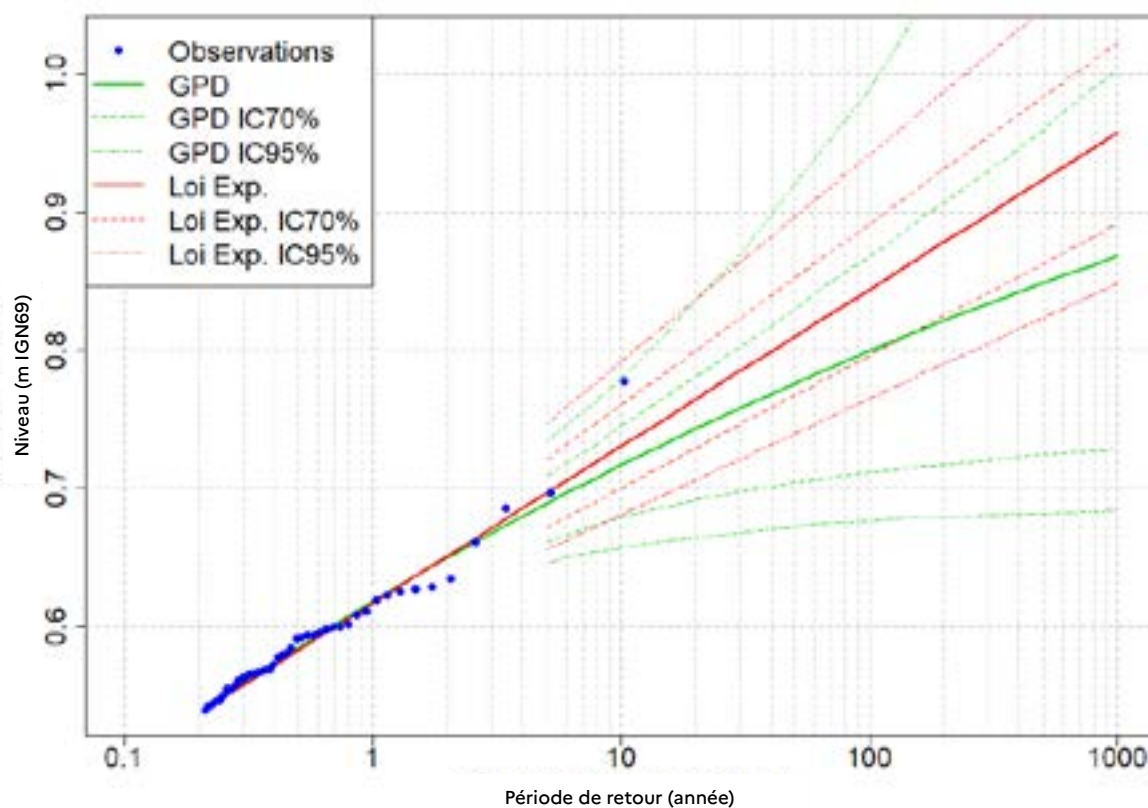
$$\text{GPD : } Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s_0) \right)^{(1/\xi)}$$

$$\text{Loi Exp. : } Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s_0))$$

La Figueirette – Périodes de retour des valeurs extrêmes des niveaux horaires

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,69 m	0,66 m à 0,71 m	0,65 m à 0,73 m	0,70 m	0,68 m à 0,72 m	0,66 m à 0,74 m
10 ans	0,72 m	0,68 m à 0,74 m	0,66 m à 0,78 m	0,73 m	0,70 m à 0,76 m	0,68 m à 0,79 m
20 ans	0,74 m	0,69 m à 0,78 m	0,67 m à 0,83 m	0,76 m	0,73 m à 0,80 m	0,71 m à 0,83 m
50 ans	0,78 m	0,71 m à 0,83 m	0,68 m à 0,91 m	0,81 m	0,77 m à 0,85 m	0,74 m à 0,89 m
100 ans	0,80 m	0,71 m à 0,87 m	0,68 m à 0,97 m	0,84 m	0,80 m à 0,89 m	0,77 m à 0,94 m
200 ans	0,82 m	0,72 m à 0,91 m	0,68 m à 1,05 m	0,88 m	0,83 m à 0,93 m	0,79 m à 0,98 m
500 ans	0,85 m	0,73 m à 0,97 m	0,68 m à 1,16 m	0,92 m	0,87 m à 0,98 m	0,83 m à 1,04 m
1 000 ans	0,87 m	0,73 m à 1,02 m	0,68 m à 1,26 m	0,96 m	0,90 m à 1,02 m	0,85 m à 1,08 m

La Figueirette – Ajustement statistique des valeurs extrêmes des niveaux horaires



4.1.7 - NICE

La durée d'observation cumulée est de 22,74 années, s'étalant du 03/07/1981 au 01/03/2021.

Nice – Paramètres d'ajustement statistique des niveaux horaires

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,48 m	s0 =	0,53 m
n =	5,804541	n =	2,462532
σ =	0,063355	ρ =	21,678864
ξ =	-0,195472		

Rappel
Pour la surcote s associée à la période de retour $Tret$:

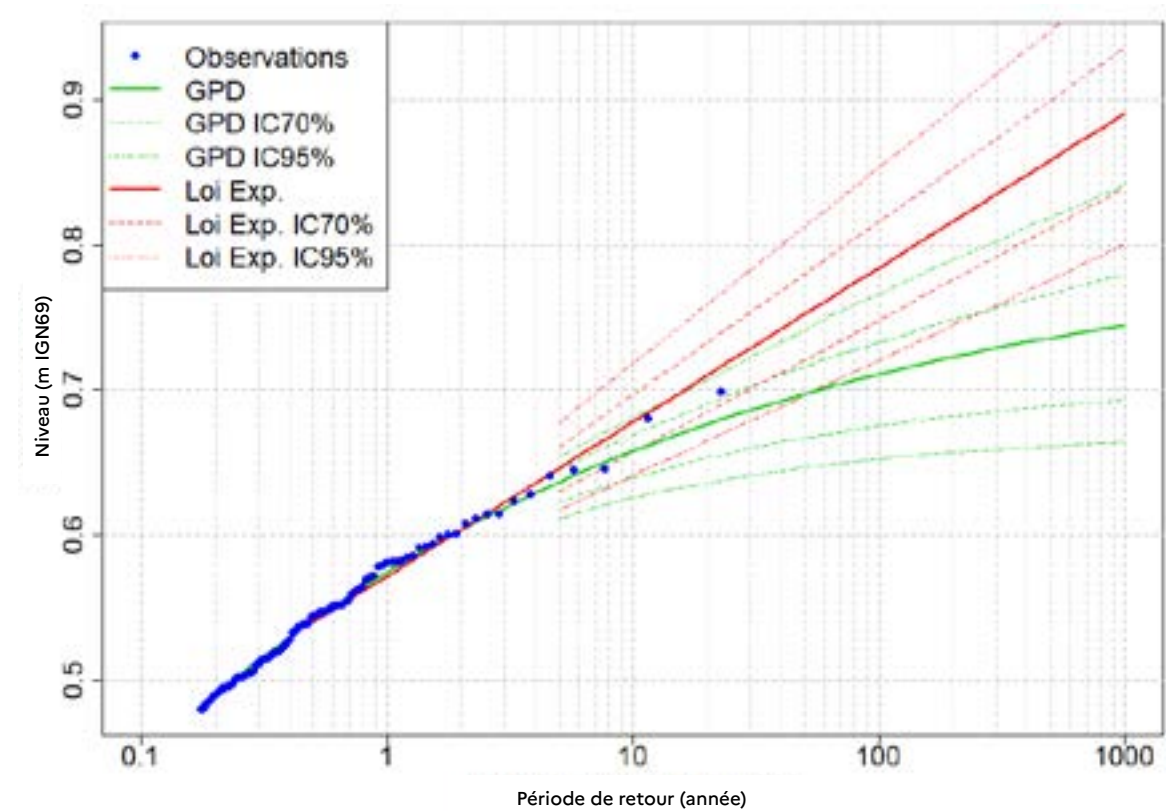
GPD : $Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s_0) \right)^{1/\xi}$

Loi Exp. : $Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s_0))$

Nice – Périodes de retour des valeurs extrêmes des niveaux horaires

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,64 m	0,62 m à 0,64 m	0,61 m à 0,65 m	0,65 m	0,63 m à 0,66 m	0,62 m à 0,68 m
10 ans	0,66 m	0,64 m à 0,67 m	0,63 m à 0,68 m	0,68 m	0,66 m à 0,70 m	0,64 m à 0,72 m
20 ans	0,68 m	0,65 m à 0,69 m	0,64 m à 0,71 m	0,71 m	0,69 m à 0,73 m	0,67 m à 0,76 m
50 ans	0,70 m	0,67 m à 0,71 m	0,65 m à 0,74 m	0,75 m	0,72 m à 0,78 m	0,70 m à 0,81 m
100 ans	0,71 m	0,67 m à 0,73 m	0,65 m à 0,76 m	0,78 m	0,75 m à 0,82 m	0,72 m à 0,85 m
200 ans	0,72 m	0,68 m à 0,75 m	0,66 m à 0,78 m	0,82 m	0,78 m à 0,85 m	0,75 m à 0,89 m
500 ans	0,74 m	0,69 m à 0,76 m	0,66 m à 0,81 m	0,86 m	0,81 m à 0,90 m	0,78 m à 0,94 m
1 000 ans	0,74 m	0,69 m à 0,78 m	0,66 m à 0,83 m	0,89 m	0,84 m à 0,94 m	0,80 m à 0,99 m

Nice – Ajustement statistique des valeurs extrêmes des niveaux horaires



4.1.8 - MONACO-FONTVEILLE

La durée d'observation cumulée est de 29,12 années, s'étalant du 31/12/1959 au 31/03/2022.

Monaco-Fontveille – Paramètres d'ajustement statistique des niveaux horaires

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,52 m	s0 =	0,52 m
n =	2,953666	n =	2,953666
σ =	0,049128	ρ =	22,911457
ξ =	-0,124234		

Rappel

Pour la surcote s associée à la période de retour $Tret$:

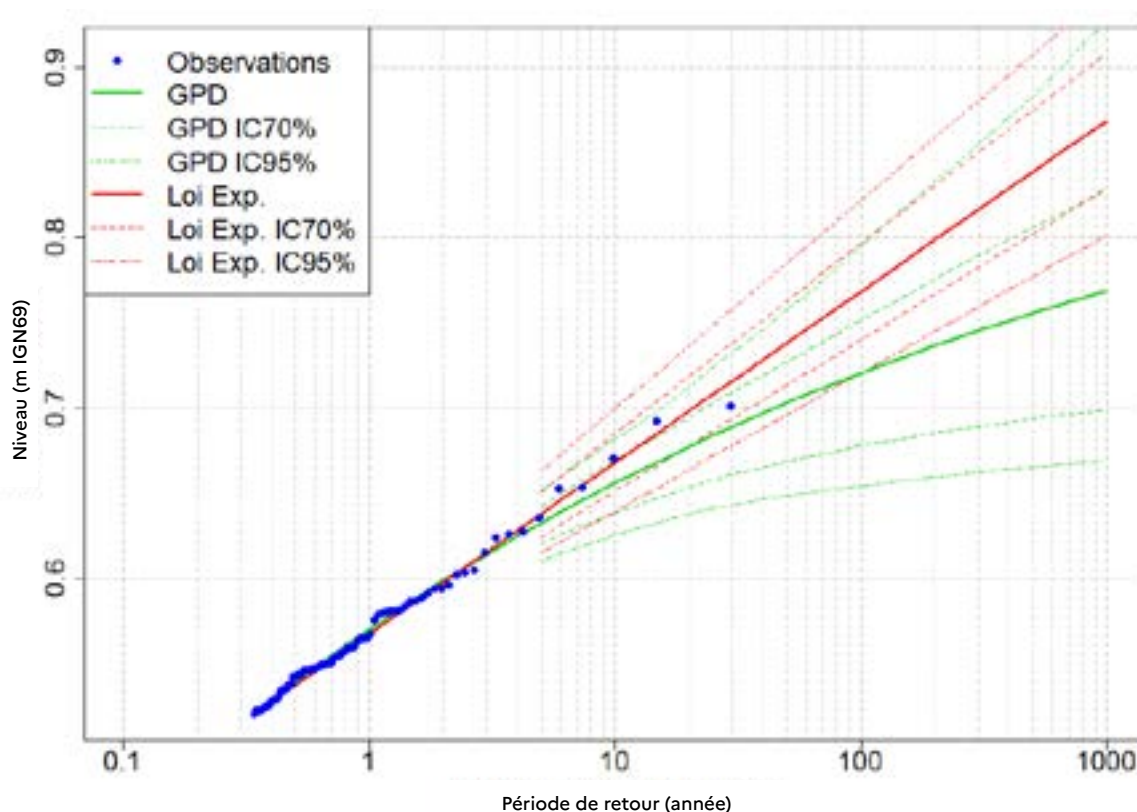
$$\text{GPD : } Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s - s_0) \right)^{(1/\xi)}$$

$$\text{Loi Exp. : } Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s - s_0))$$

Monaco-Fontveille – Périodes de retour des valeurs extrêmes des niveaux horaires

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,63 m	0,62 m à 0,64 m	0,61 m à 0,65 m	0,64 m	0,63 m à 0,65 m	0,62 m à 0,66 m
10 ans	0,66 m	0,64 m à 0,67 m	0,63 m à 0,68 m	0,67 m	0,65 m à 0,68 m	0,64 m à 0,70 m
20 ans	0,68 m	0,65 m à 0,69 m	0,64 m à 0,71 m	0,70 m	0,68 m à 0,72 m	0,66 m à 0,74 m
50 ans	0,70 m	0,67 m à 0,72 m	0,65 m à 0,75 m	0,74 m	0,72 m à 0,76 m	0,70 m à 0,78 m
100 ans	0,72 m	0,68 m à 0,75 m	0,66 m à 0,78 m	0,77 m	0,74 m à 0,79 m	0,72 m à 0,82 m
200 ans	0,74 m	0,68 m à 0,77 m	0,66 m à 0,81 m	0,80 m	0,77 m à 0,83 m	0,75 m à 0,86 m
500 ans	0,76 m	0,69 m à 0,80 m	0,67 m à 0,86 m	0,84 m	0,81 m à 0,87 m	0,78 m à 0,90 m
1 000 ans	0,77 m	0,70 m à 0,82 m	0,67 m à 0,89 m	0,87 m	0,83 m à 0,91 m	0,80 m à 0,94 m

Monaco-Fontveille – Ajustement statistique des valeurs extrêmes des niveaux horaires



4.1.9 - AJACCIO-ASPRETTO

La durée d'observation cumulée est de 21,02 années, s'étalant du 25/07/1981 au 31/03/2022.

Ajaccio-Aspretto – Paramètres d'ajustement statistique des niveaux horaires

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,37 m	s0 =	0,40 m
n =	9,468784	n =	6,090474
σ =	0,060065	ρ =	21,049871
ξ =	-0,103096		

Rappel
Pour la surcote s associée à la période de retour $Tret$:

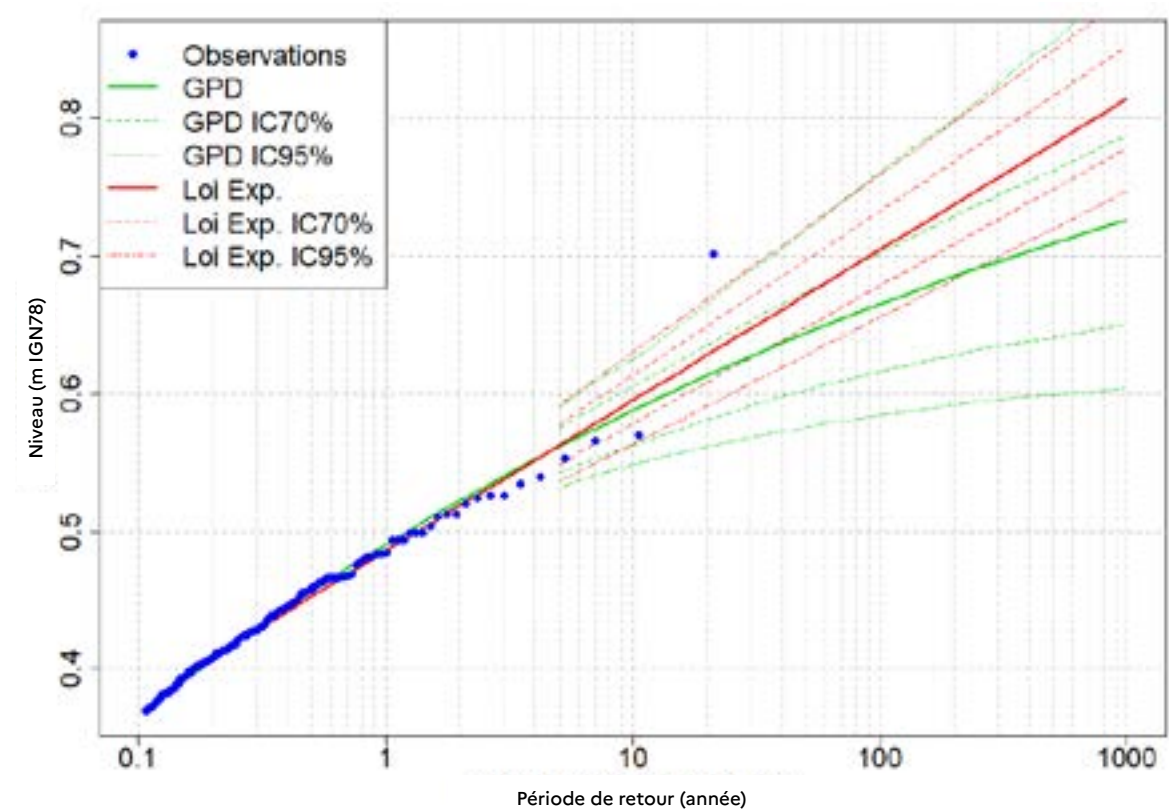
GPD : $Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s0) \right)^{(1/\xi)}$

Loi Exp. : $Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s0))$

Ajaccio-Aspretto – Périodes de retour des valeurs extrêmes des niveaux horaires

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,56 m	0,54 m à 0,57 m	0,53 m à 0,59 m	0,56 m	0,55 m à 0,58 m	0,54 m à 0,59 m
10 ans	0,59 m	0,56 m à 0,60 m	0,55 m à 0,62 m	0,60 m	0,58 m à 0,61 m	0,56 m à 0,63 m
20 ans	0,61 m	0,58 m à 0,63 m	0,56 m à 0,66 m	0,63 m	0,61 m à 0,65 m	0,59 m à 0,67 m
50 ans	0,64 m	0,60 m à 0,67 m	0,58 m à 0,71 m	0,67 m	0,65 m à 0,70 m	0,63 m à 0,72 m
100 ans	0,67 m	0,62 m à 0,70 m	0,59 m à 0,75 m	0,70 m	0,68 m à 0,73 m	0,66 m à 0,76 m
200 ans	0,69 m	0,63 m à 0,72 m	0,60 m à 0,79 m	0,74 m	0,71 m à 0,77 m	0,68 m à 0,80 m
500 ans	0,71 m	0,64 m à 0,76 m	0,61 m à 0,85 m	0,78 m	0,75 m à 0,82 m	0,72 m à 0,85 m
1 000 ans	0,73 m	0,65 m à 0,78 m	0,61 m à 0,89 m	0,81 m	0,78 m à 0,85 m	0,75 m à 0,89 m

Ajaccio-Aspretto – Ajustement statistique des valeurs extrêmes des niveaux horaires



4.1.10 - CENTURI

La durée d'observation cumulée est de 10,20 années, s'étalant du 21/10/2010 au 04/10/21.

Centuri – Paramètres d'ajustement statistique des niveaux horaires

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,50 m	s0 =	0,56 m
n =	5,193941	n =	1,469983
σ =	0,053414	ρ =	12,455951
ξ =	0,103350		

Rappel

Pour la surcote s associée à la période de retour $Tret$:

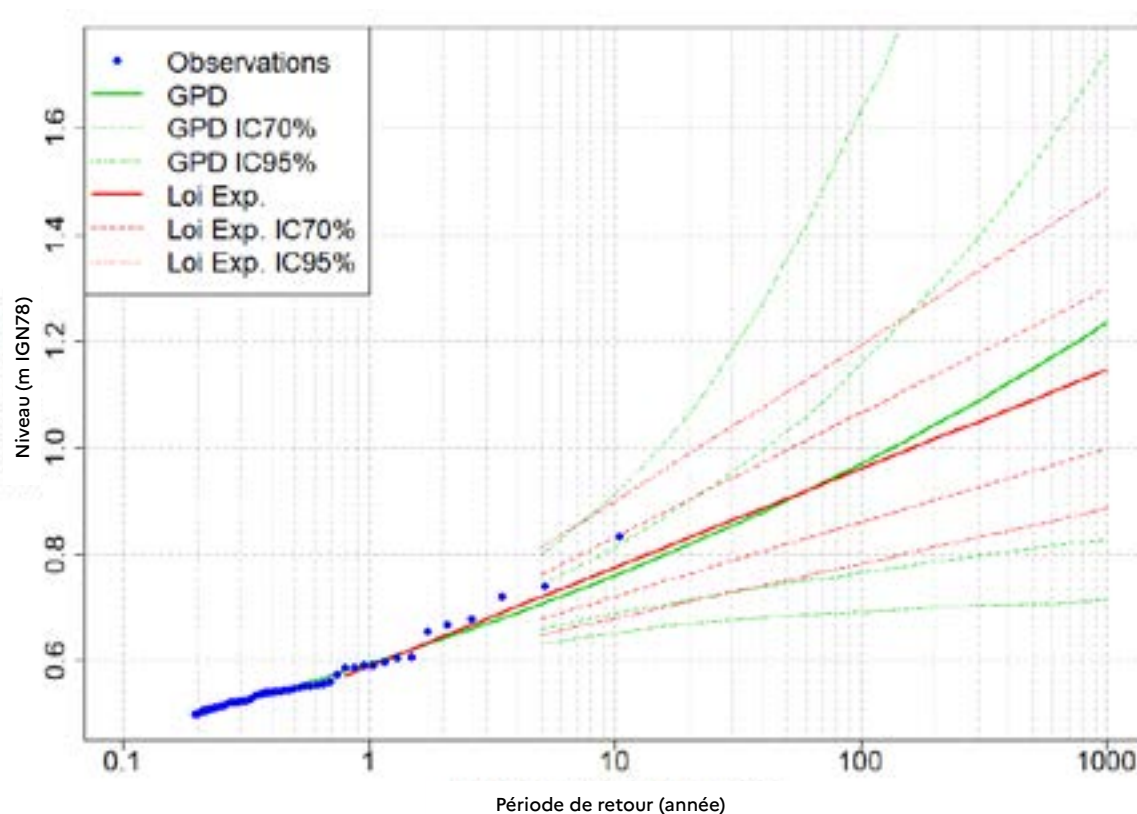
$$GPD : Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s_0) \right)^{(1/\xi)}$$

$$Loi Exp. : Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s_0))$$

Centuri – Périodes de retour des valeurs extrêmes des niveaux horaires

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,71 m	0,66 m à 0,74 m	0,64 m à 0,79 m	0,72 m	0,68 m à 0,76 m	0,65 m à 0,81 m
10 ans	0,76 m	0,69 m à 0,82 m	0,66 m à 0,91 m	0,78 m	0,72 m à 0,83 m	0,68 m à 0,89 m
20 ans	0,82 m	0,72 m à 0,91 m	0,67 m à 1,05 m	0,83 m	0,76 m à 0,90 m	0,72 m à 0,98 m
50 ans	0,90 m	0,75 m à 1,06 m	0,69 m à 1,34 m	0,90 m	0,82 m à 1,00 m	0,76 m à 1,09 m
100 ans	0,97 m	0,78 m à 1,19 m	0,70 m à 1,61 m	0,96 m	0,86 m à 1,07 m	0,79 m à 1,18 m
200 ans	1,04 m	0,79 m à 1,35 m	0,71 m à 1,97 m	1,02 m	0,90 m à 1,14 m	0,82 m à 1,27 m
500 ans	1,15 m	0,82 m à 1,61 m	0,71 m à 2,64 m	1,09 m	0,95 m à 1,23 m	0,86 m à 1,38 m
1 000 ans	1,23 m	0,84 m à 1,86 m	0,72 m à 3,29 m	1,15 m	0,99 m à 1,30 m	0,90 m à 1,47 m

Centuri – Ajustement statistique des valeurs extrêmes des niveaux horaires



4.1.11 - SOLENZARA

La durée d'observation cumulée est de 9,58 années, s'étalant du 16/04/1977 au 31/03/2022.

Solenzara – Paramètres d'ajustement statistique des niveaux horaires

GPD		Loi Exp.	
s0 =	0,42 m	s0 =	0,44 m
n =	5,429609	n =	3,236883
σ =	0,039753	ρ =	20,766201
ξ =	0,100080		

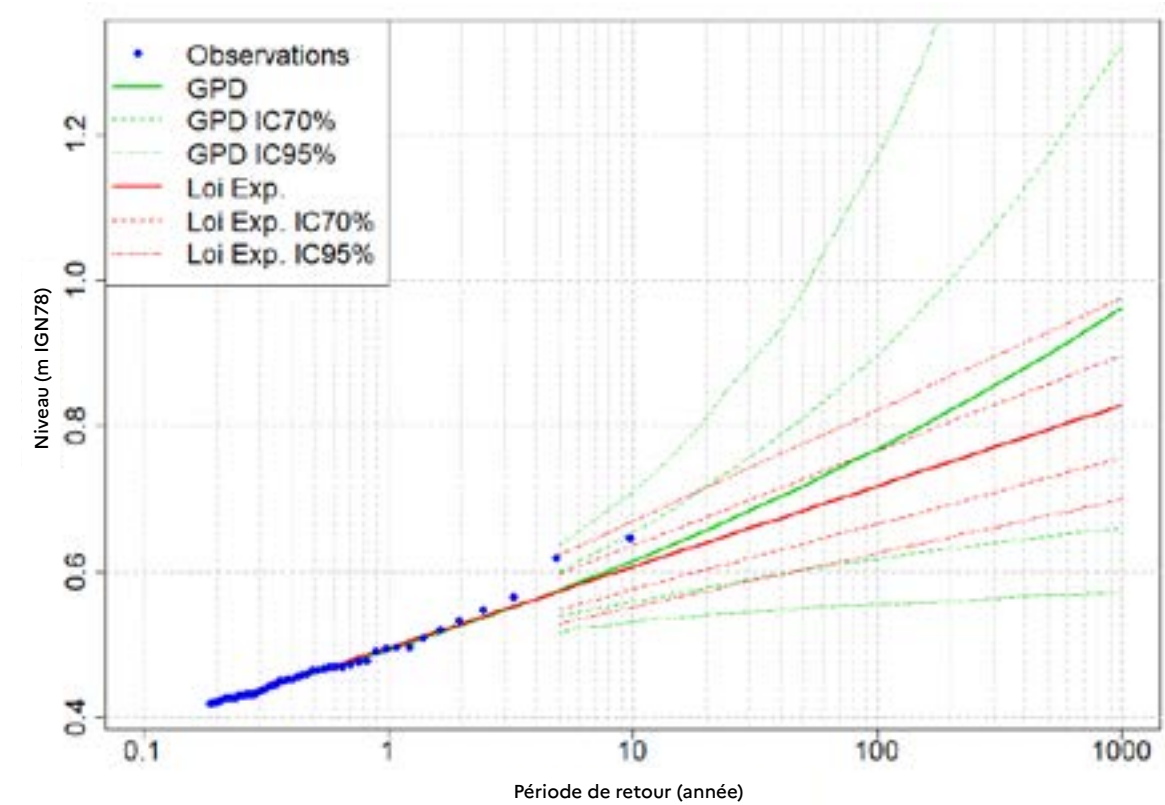
Rappel
Pour la surcote s associée à la période de retour $Tret$:

$$GPD : Tret = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} (s-s_0) \right)^{(1/\xi)}$$
$$Loi Exp. : Tret = \frac{1}{n} \exp(\rho(s-s_0))$$

Solenzara – Périodes de retour des valeurs extrêmes des niveaux horaires

Période de retour	GPD			Loi Exp.		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	0,58 m	0,54 m à 0,60 m	0,52 m à 0,64 m	0,57 m	0,55 m à 0,60 m	0,53 m à 0,63 m
10 ans	0,62 m	0,56 m à 0,66 m	0,53 m à 0,73 m	0,61 m	0,58 m à 0,64 m	0,55 m à 0,67 m
20 ans	0,66 m	0,58 m à 0,73 m	0,55 m à 0,83 m	0,64 m	0,60 m à 0,68 m	0,58 m à 0,72 m
50 ans	0,72 m	0,60 m à 0,83 m	0,56 m à 1,03 m	0,68 m	0,64 m à 0,73 m	0,61 m à 0,78 m
100 ans	0,77 m	0,62 m à 0,93 m	0,56 m à 1,23 m	0,72 m	0,67 m à 0,77 m	0,63 m à 0,83 m
200 ans	0,82 m	0,63 m à 1,05 m	0,57 m à 1,48 m	0,75 m	0,69 m à 0,81 m	0,65 m à 0,87 m
500 ans	0,90 m	0,65 m à 1,23 m	0,57 m à 1,96 m	0,80 m	0,73 m à 0,86 m	0,68 m à 0,93 m
1 000 ans	0,96 m	0,66 m à 1,41 m	0,57 m à 2,43 m	0,83 m	0,76 m à 0,90 m	0,70 m à 0,98 m

Solenzara – Ajustement statistique des valeurs extrêmes des niveaux horaires



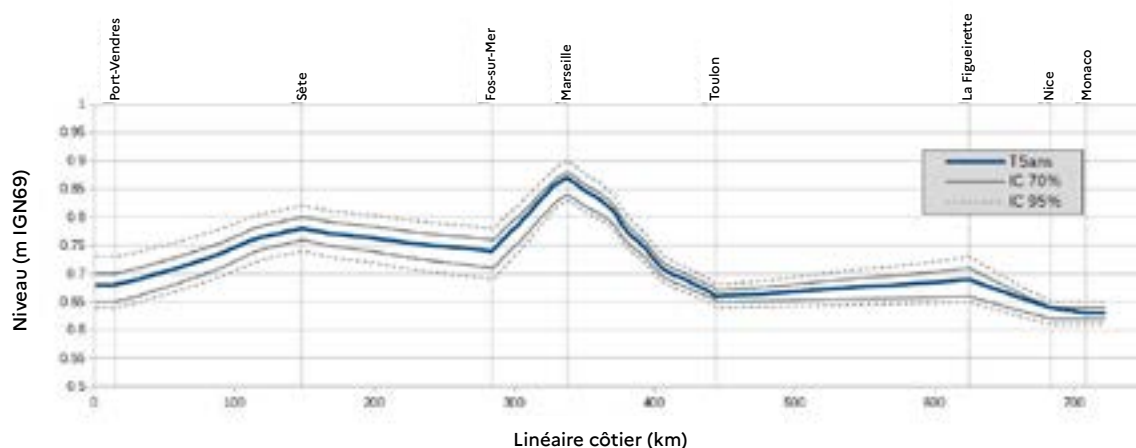
4.2 - RÉSULTAT LE LONG DU LINÉAIRE CÔTIER

Sont présentées ci-après les estimations des valeurs extrêmes de niveau d'eau en Méditerranée le long du linéaire côtier. À titre d'information sont présentées en annexe les variations le long du linéaire côtier des profils de surcotes horaires en Méditerranée (annexe 8).

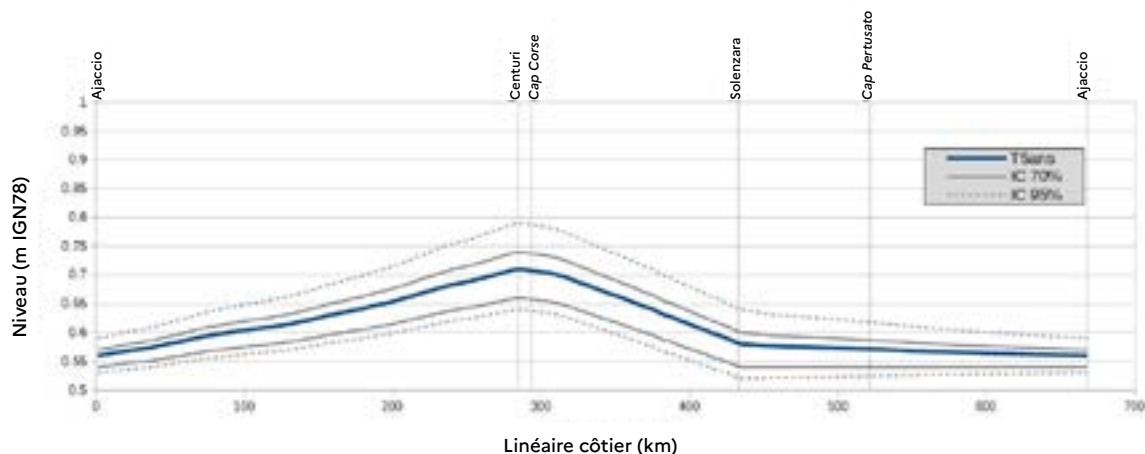
Attention aux échelles de couleurs qui sont variables d'une figure à l'autre.

4.2.1 - NIVEAUX DE PÉRIODE DE RETOUR 5 ANS

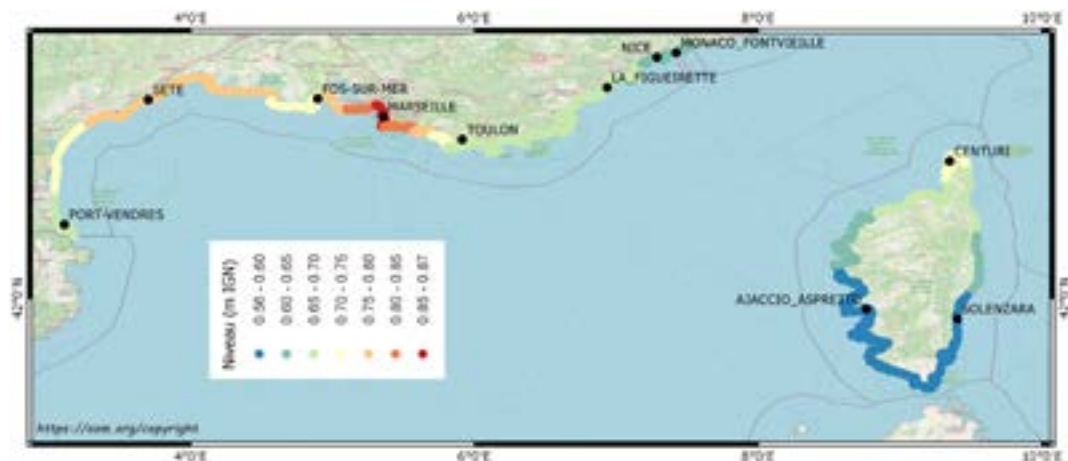
Méditerranée (continent) – Niveaux d'eau de période de retour 5 ans (GPD, représentation 2D)



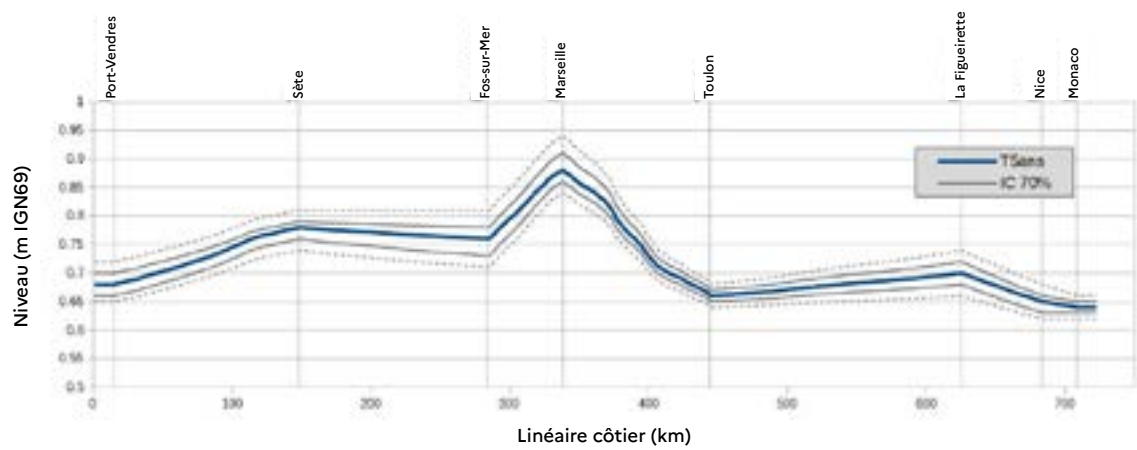
Méditerranée (Corse) – Niveaux d'eau de période de retour 5 ans (GPD, représentation 2D)



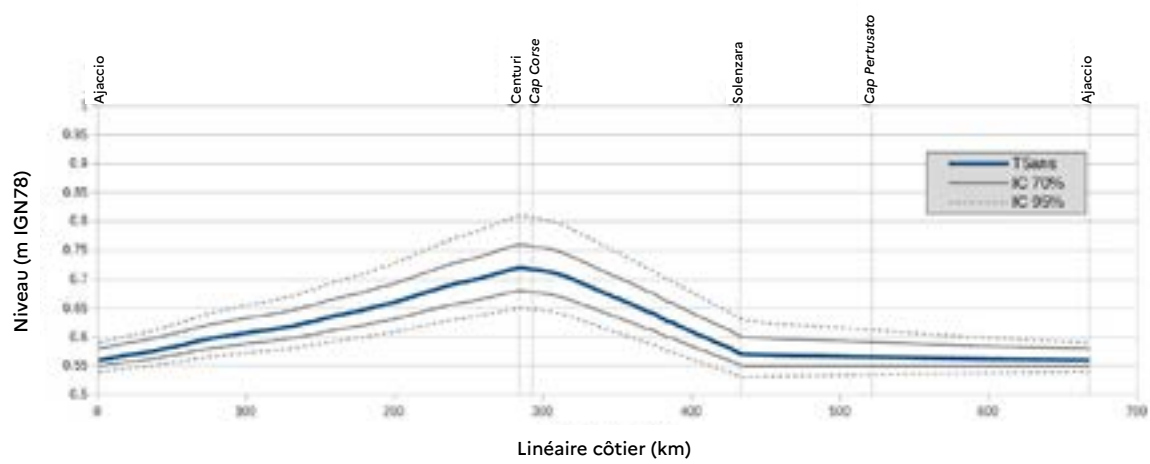
Méditerranée – Niveaux d'eau de période de retour 5 ans (GPD, représentation cartographique)



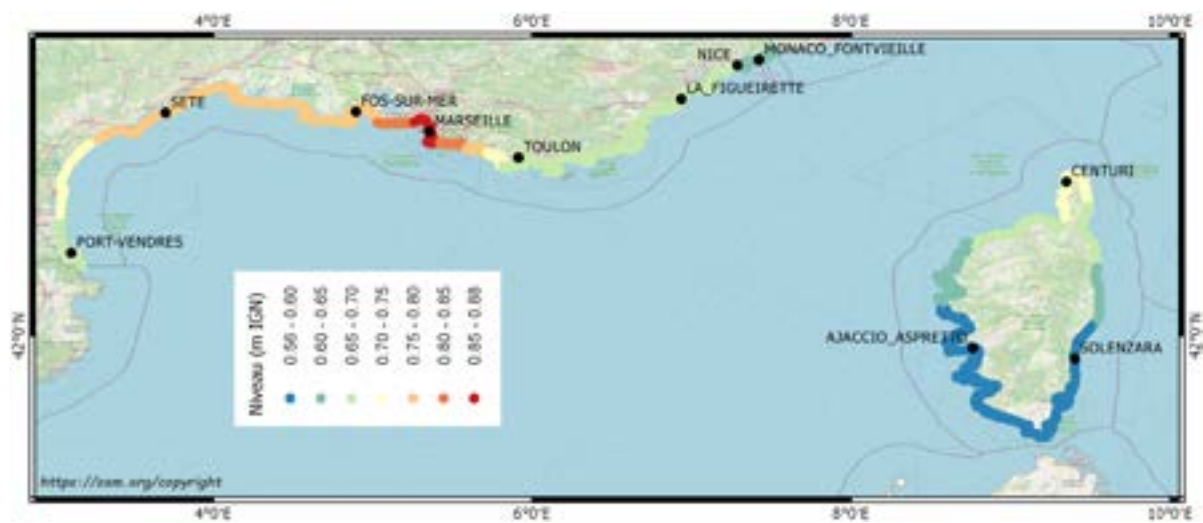
Méditerranée (continent) – Niveaux d’eau de période de retour 5 ans (loi exponentielle, représentation 2D)



Méditerranée (Corse) – Niveaux d’eau de période de retour 5 ans (loi exponentielle, représentation 2D)

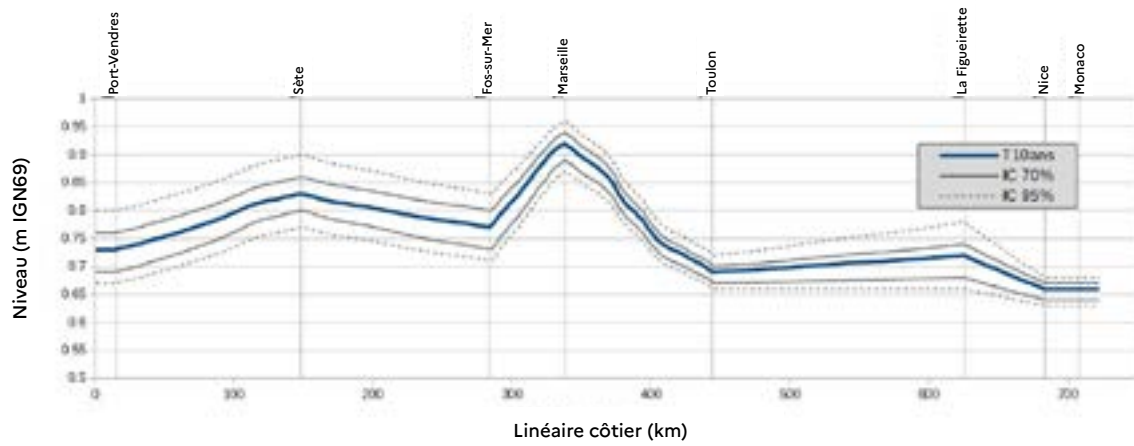


Méditerranée – Niveaux d’eau de période de retour 5 ans (loi exponentielle, représentation cartographique)

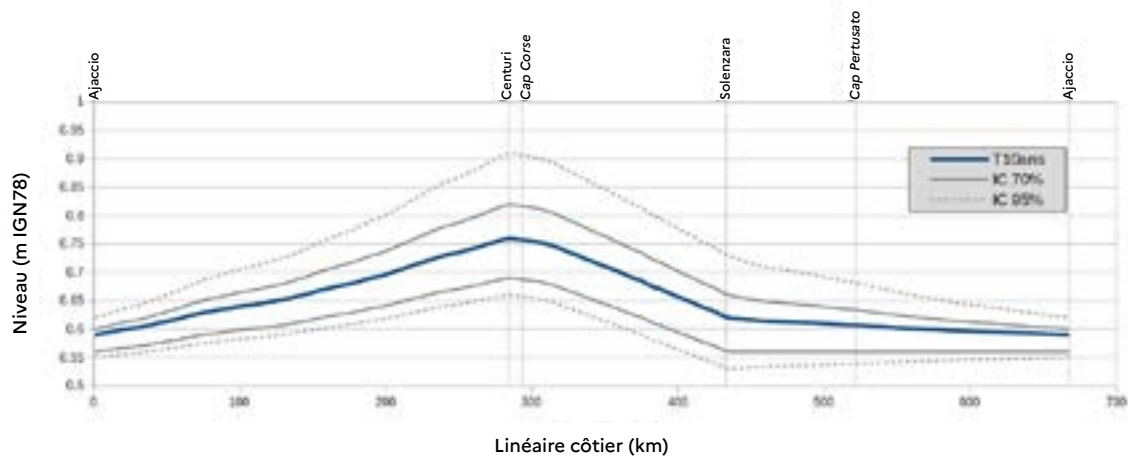


4.2.2 - NIVEAUX DE PÉRIODE DE RETOUR 10 ANS

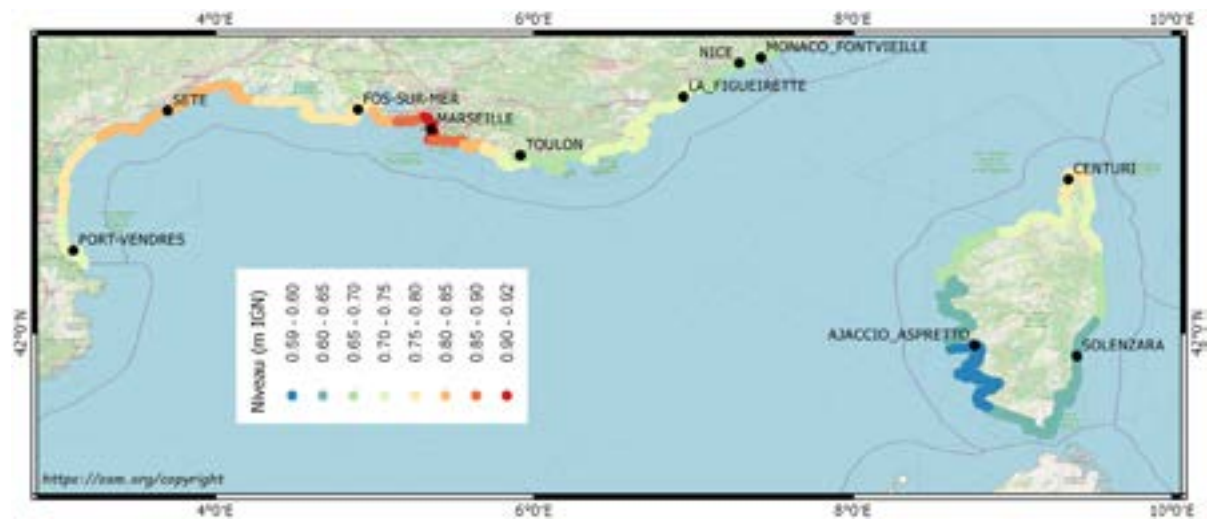
Méditerranée (continent) – Niveaux d'eau de période de retour 10 ans (GPD, représentation 2D)



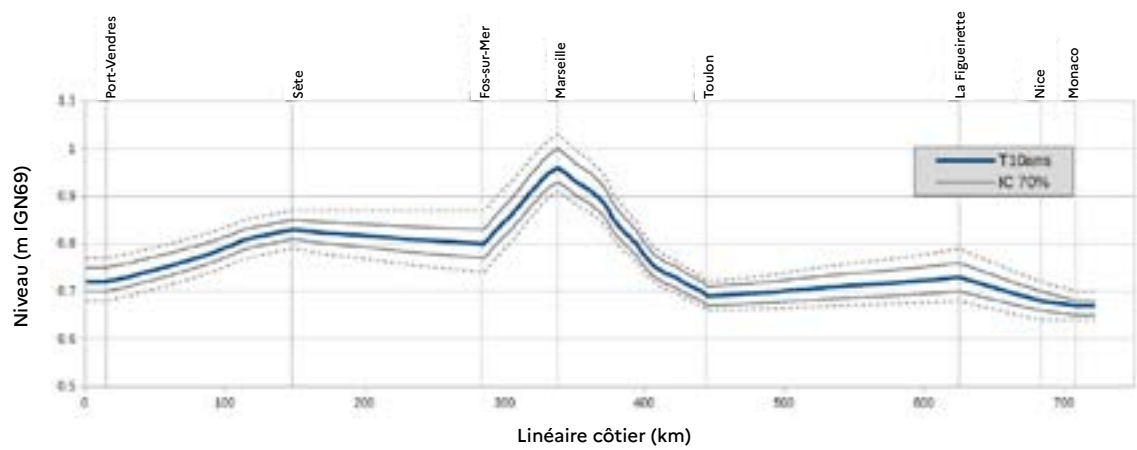
Méditerranée (Corse) – Niveaux d'eau de période de retour 10 ans (GPD, représentation 2D)



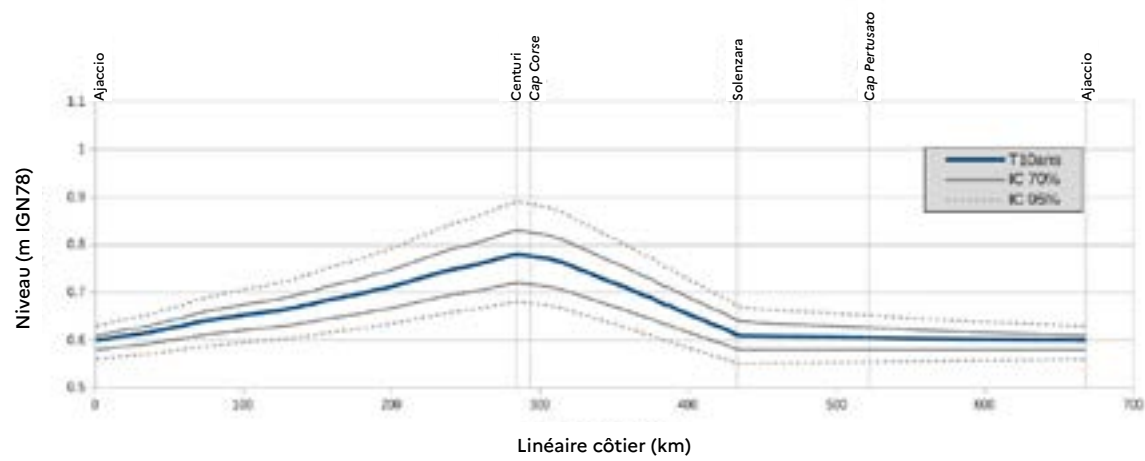
Méditerranée – Niveaux d'eau de période de retour 10 ans (GPD, représentation cartographique)



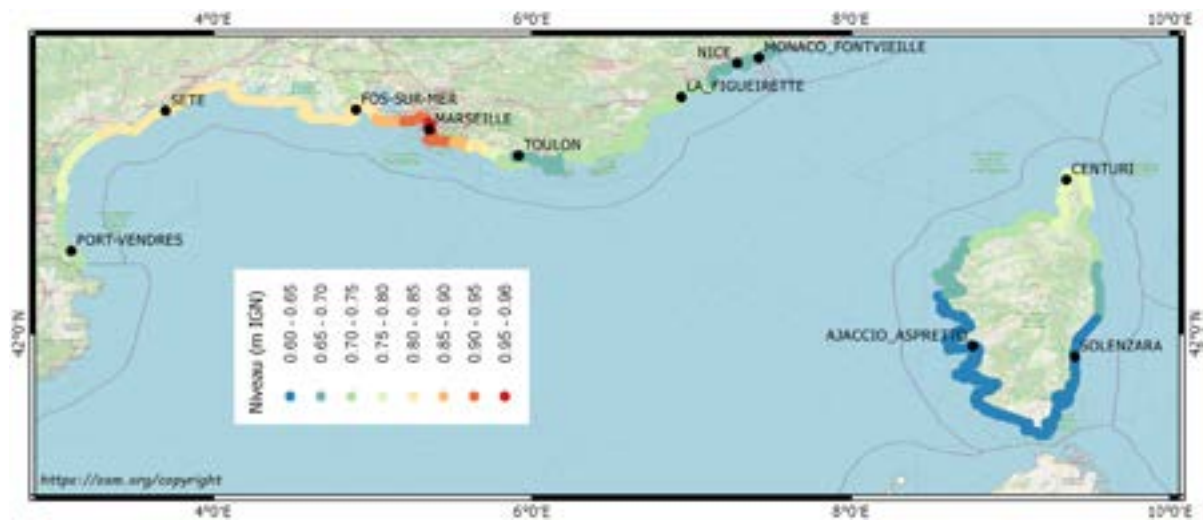
Méditerranée (continent) – Niveaux d'eau de période de retour 10 ans (loi exponentielle, représentation 2D)



Méditerranée (Corse) – Niveaux d'eau de période de retour 10 ans (loi exponentielle, représentation 2D)

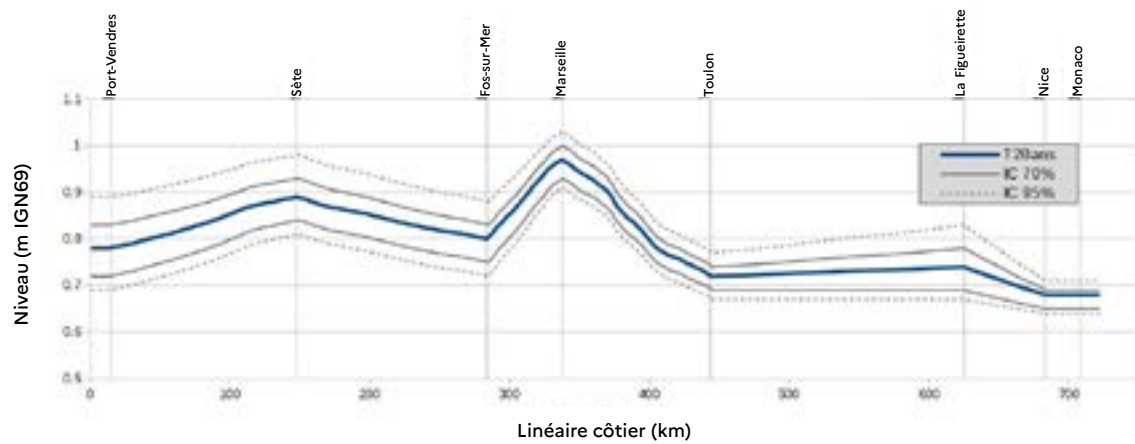


Méditerranée – Niveaux d'eau de période de retour 10 ans (loi exponentielle, représentation cartographique)

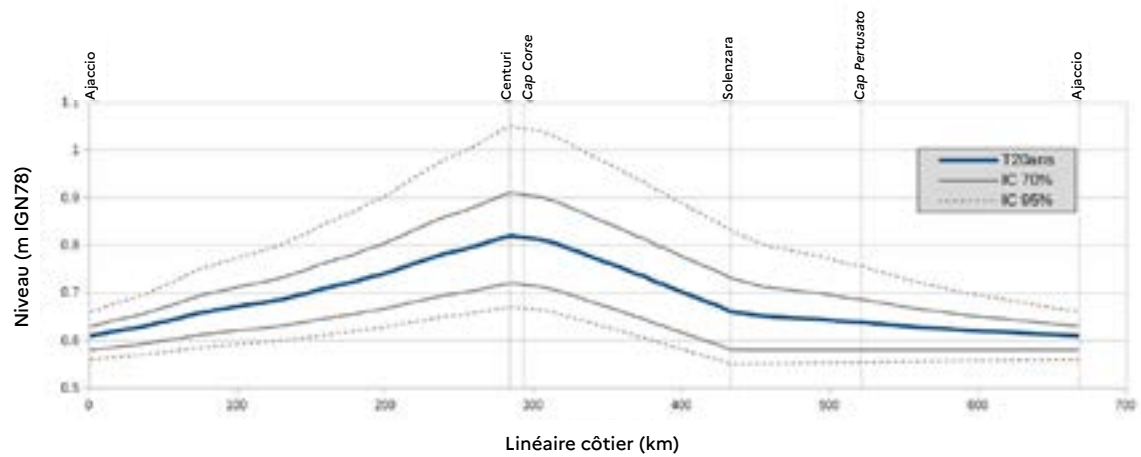


4.2.3 - NIVEAUX DE PÉRIODE DE RETOUR 20 ANS

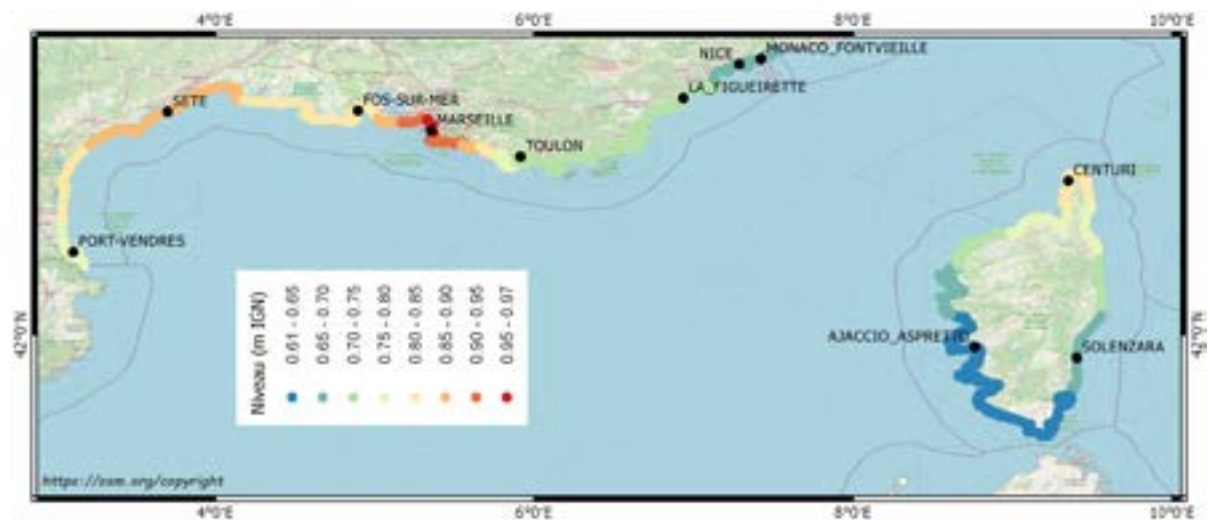
Méditerranée (continent) – Niveaux d'eau de période de retour 20 ans (GPD, représentation 2D)



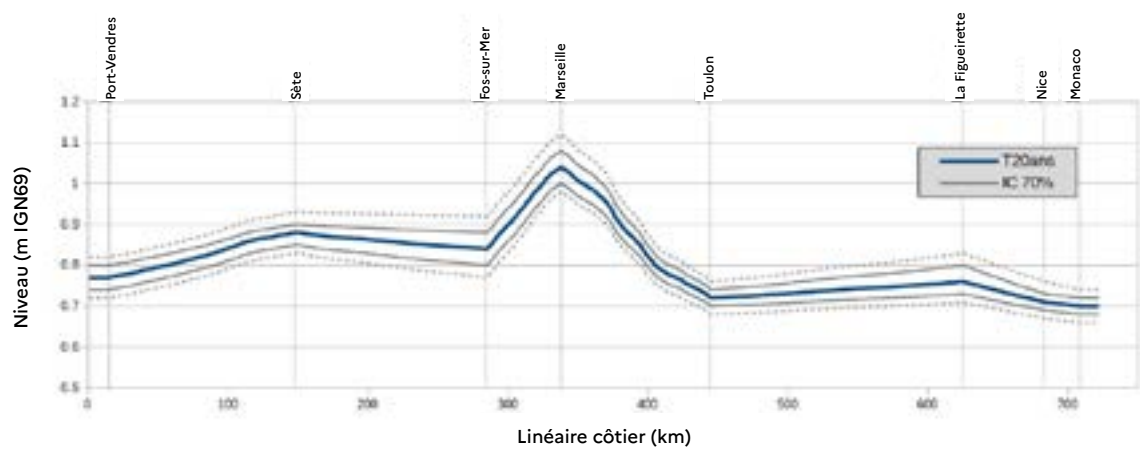
Méditerranée (Corse) – Niveaux d'eau de période de retour 20 ans (GPD, représentation 2D)



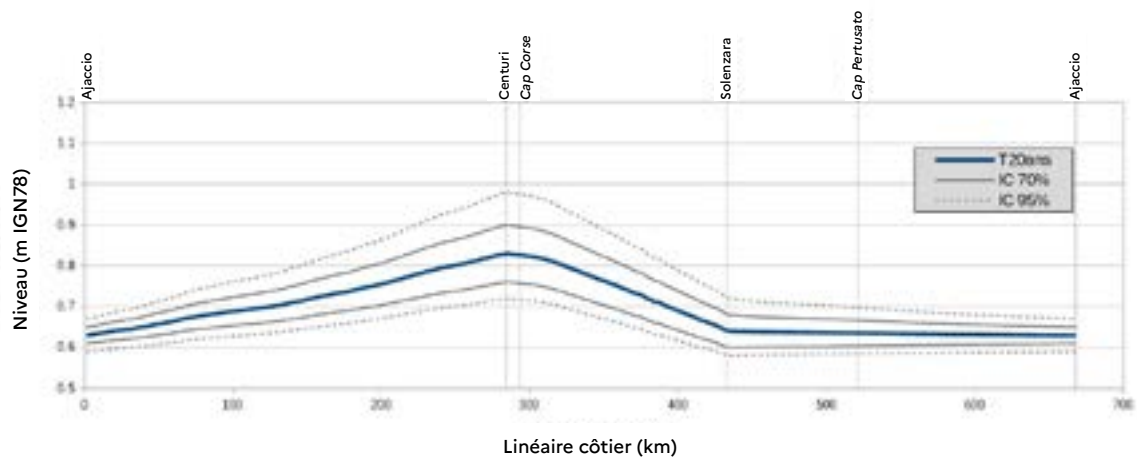
Méditerranée – Niveaux d'eau de période de retour 20 ans (GPD, représentation cartographique)



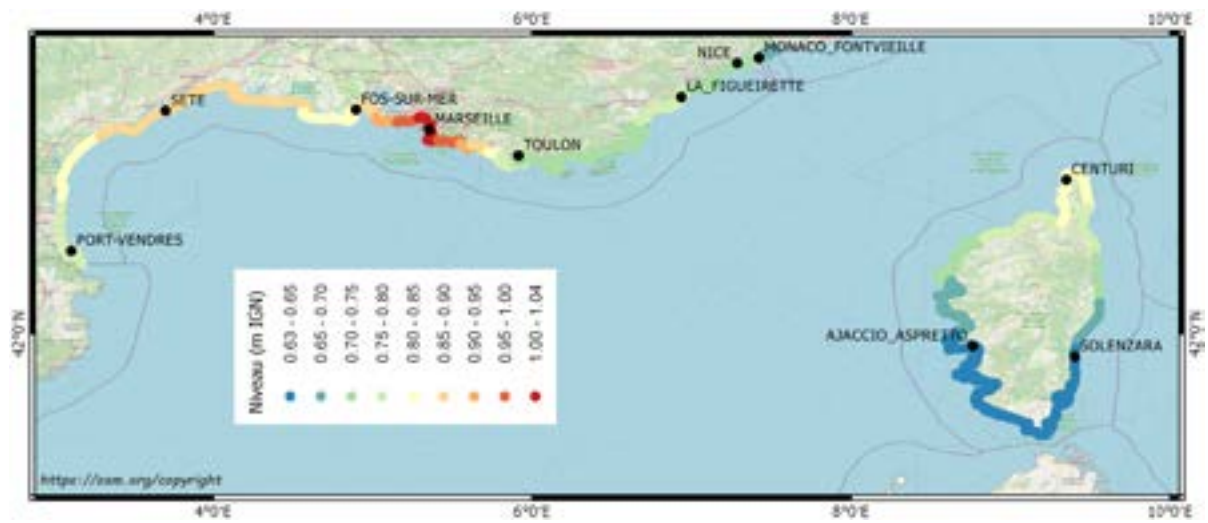
Méditerranée (continent) – Niveaux d'eau de période de retour 20 ans (loi exponentielle, représentation 2D)



Méditerranée (Corse) – Niveaux d'eau de période de retour 20 ans (loi exponentielle, représentation 2D)

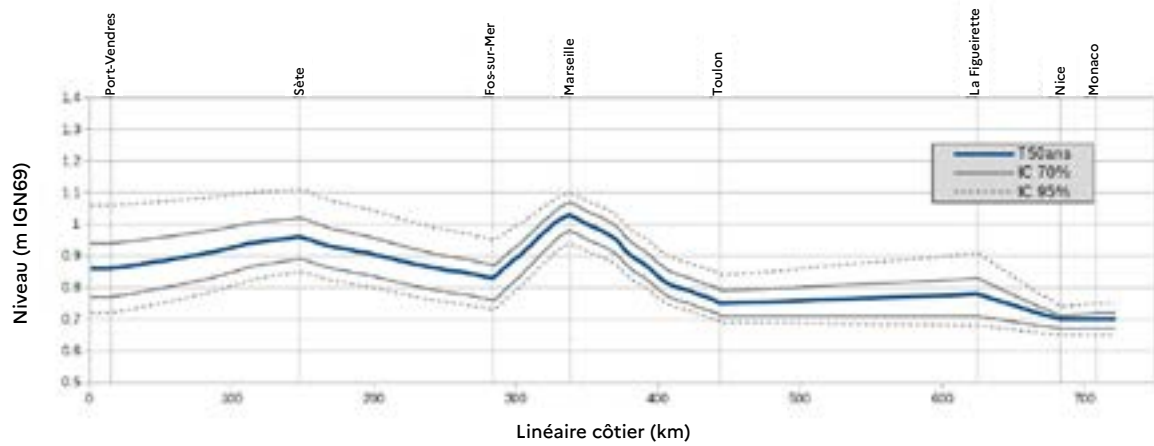


Méditerranée – Niveaux d'eau de période de retour 20 ans (loi exponentielle, représentation cartographique)

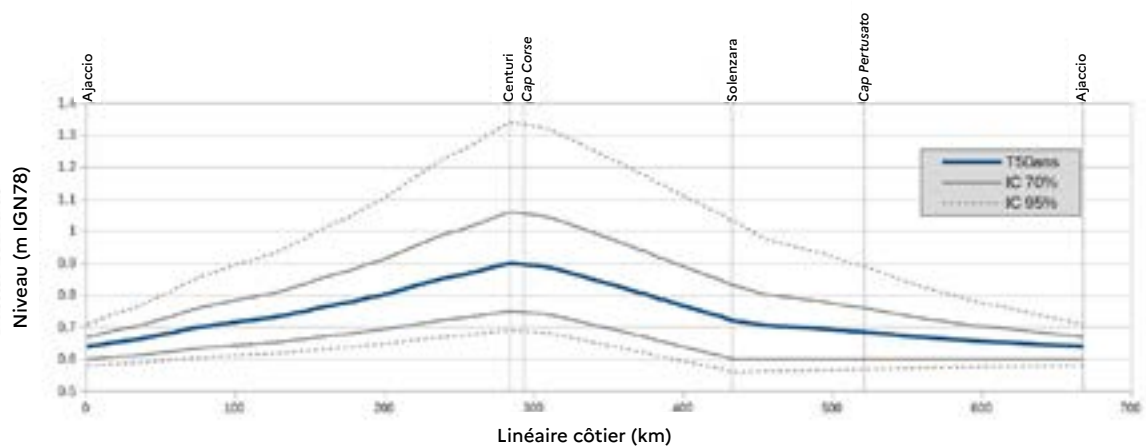


4.2.4 - NIVEAUX DE PÉRIODE DE RETOUR 50 ANS

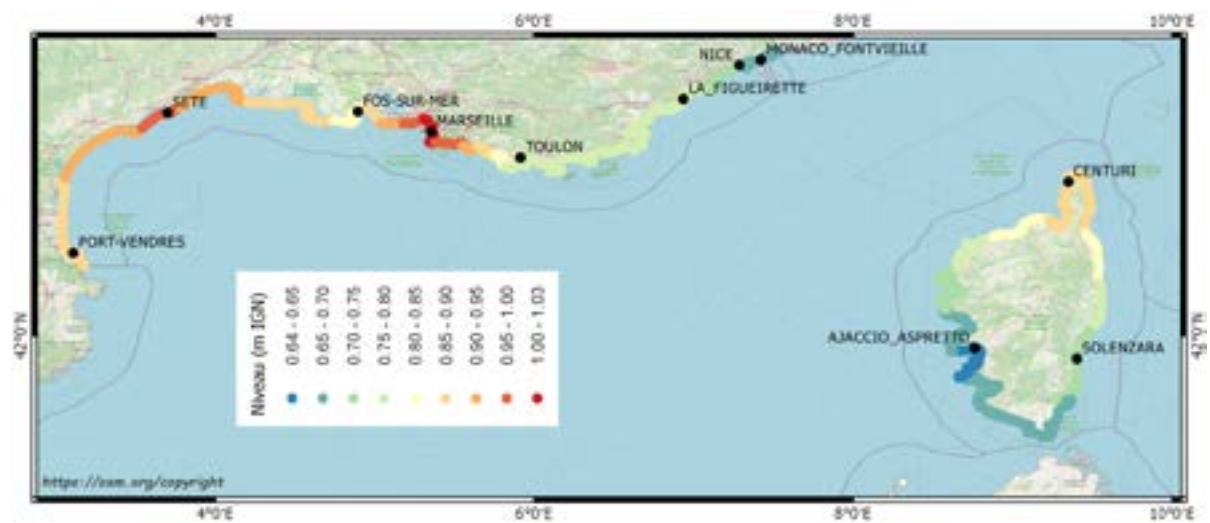
Méditerranée (continent) – Niveaux d'eau de période de retour 50 ans (GPD, représentation 2D)



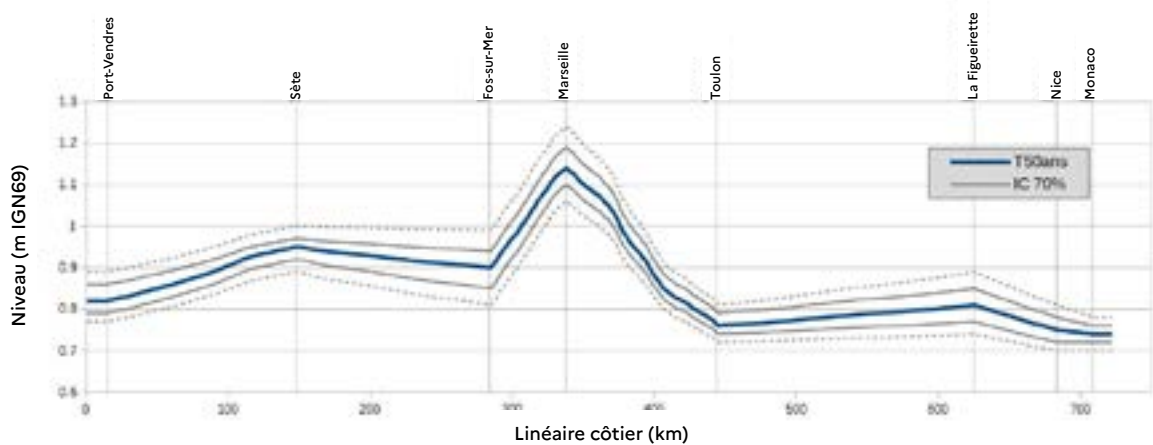
Méditerranée (Corse) – Niveaux d'eau de période de retour 50 ans (GPD, représentation 2D)



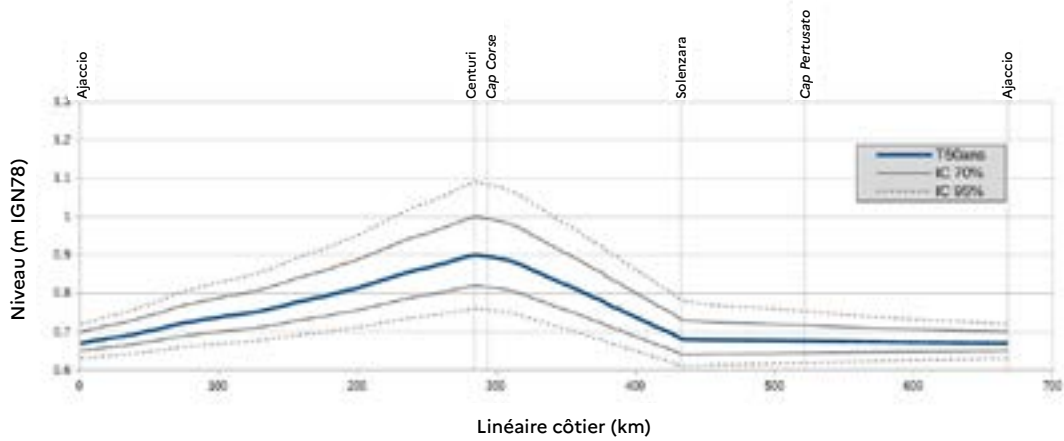
Méditerranée – Niveaux d'eau de période de retour 50 ans (GPD, représentation cartographique)



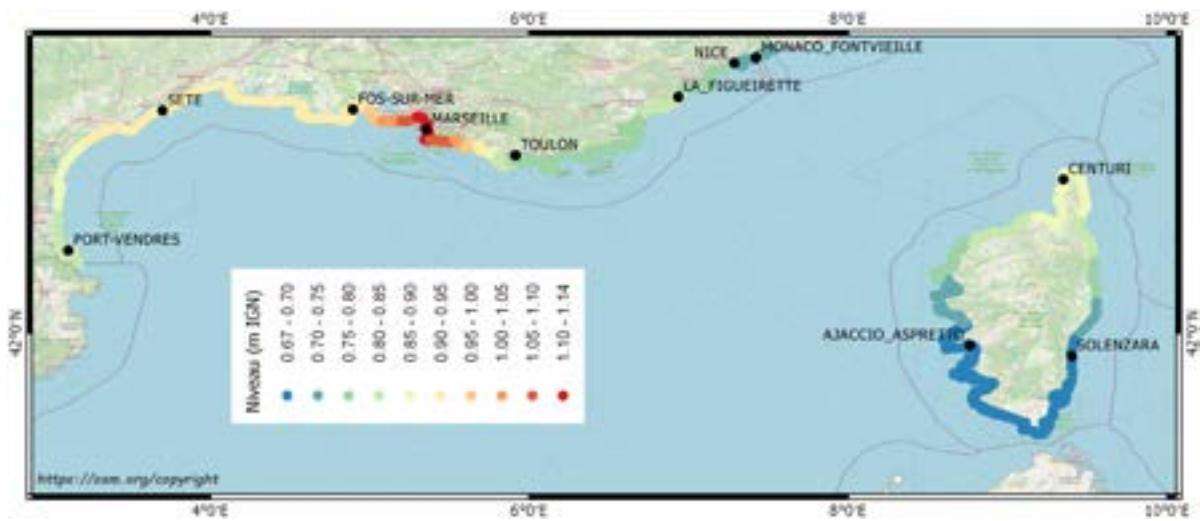
Méditerranée (continent) – Niveaux d'eau de période de retour 50 ans (loi exponentielle, représentation 2D)



Méditerranée (Corse) – Niveaux d'eau de période de retour 50 ans (loi exponentielle, représentation 2D)

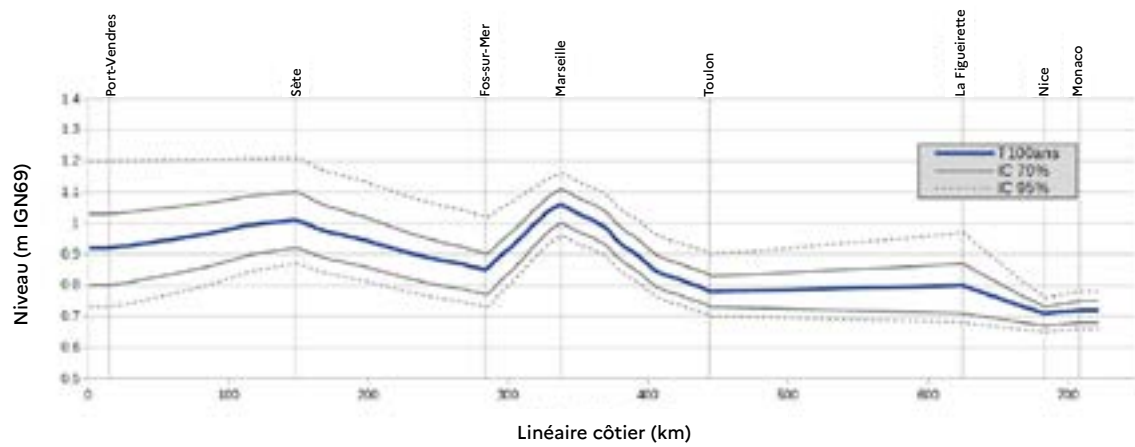


Méditerranée – Niveaux d'eau de période de retour 50 ans (loi exponentielle, représentation cartographique)

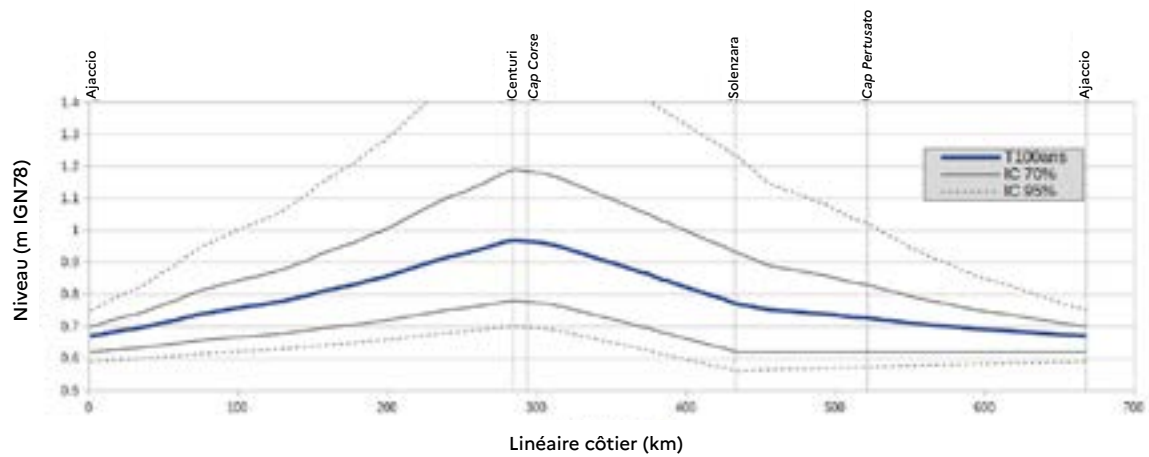


4.2.5 - NIVEAUX DE PÉRIODE DE RETOUR 100 ANS

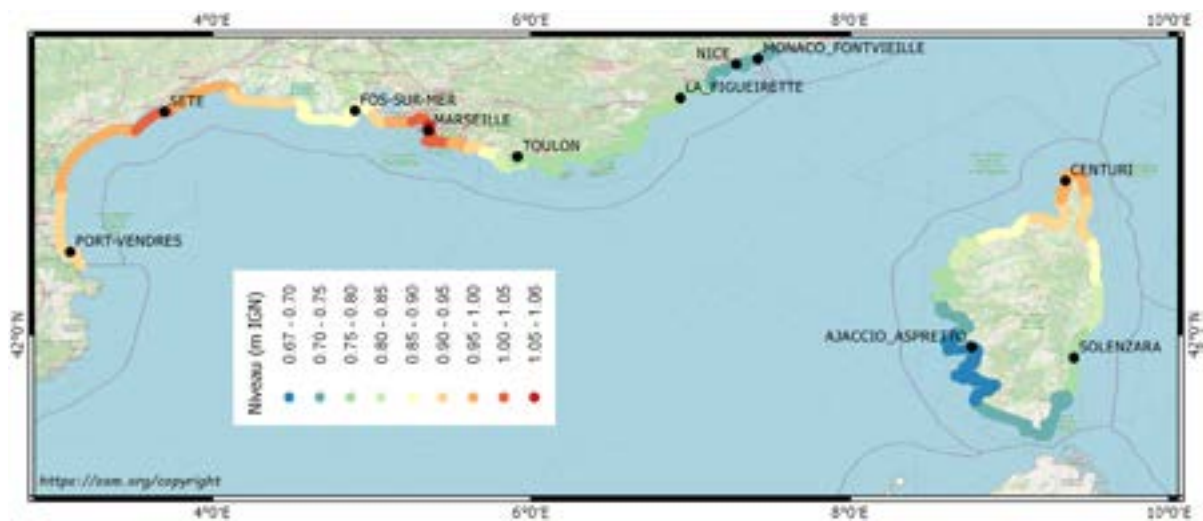
Méditerranée (continent) – Niveaux d'eau de période de retour 100 ans (GPD, représentation 2D)



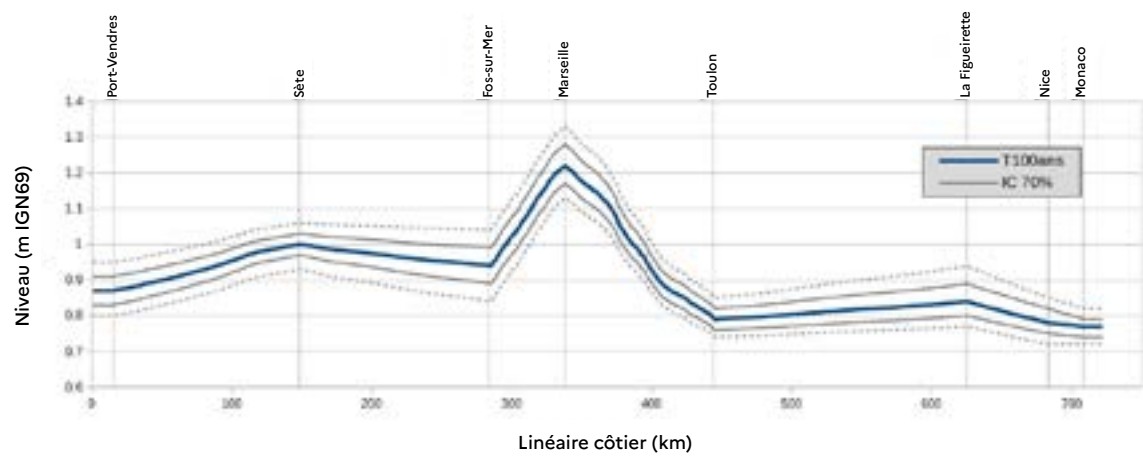
Méditerranée (Corse) – Niveaux d'eau de période de retour 100 ans (GPD, représentation 2D)



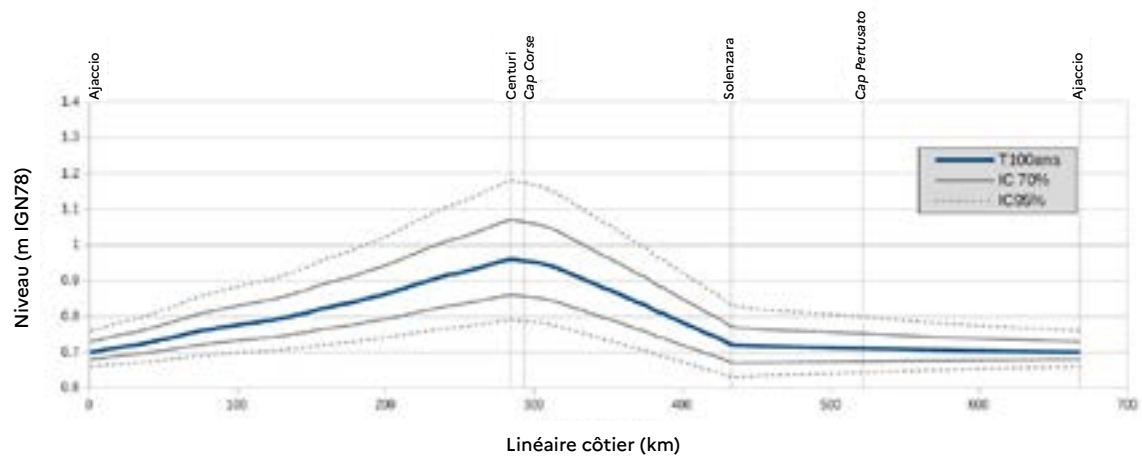
Méditerranée – Niveaux d'eau de période de retour 100 ans (GPD, représentation cartographique)



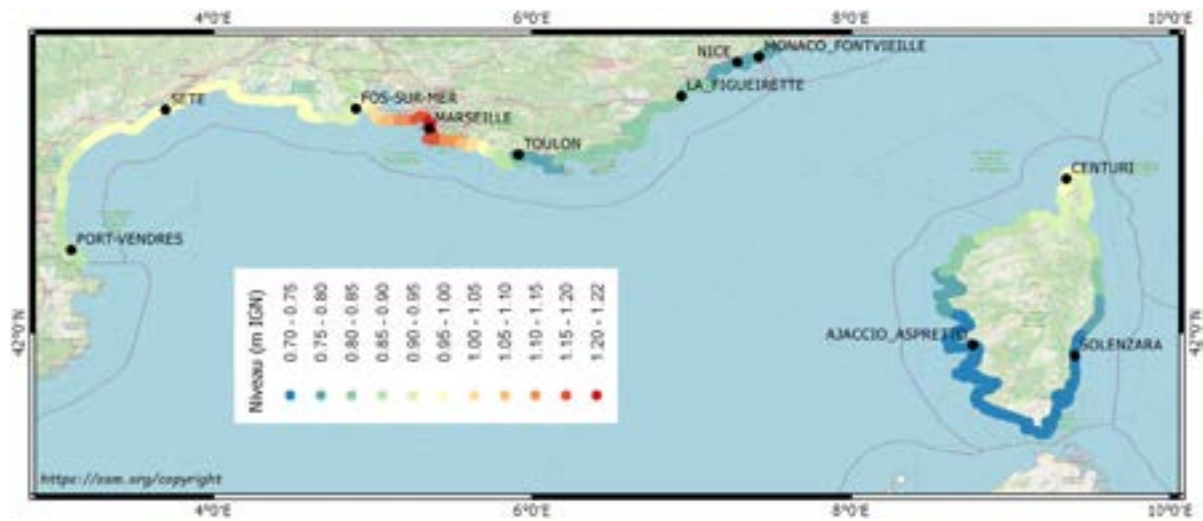
Méditerranée (continent) – Niveaux d'eau de période de retour 100 ans (loi exponentielle, représentation 2D)



Méditerranée (Corse) – Niveaux d'eau de période de retour 100 ans (loi exponentielle, représentation 2D)



Méditerranée – Niveaux d'eau de période de retour 100 ans (loi exponentielle, représentation cartographique)



CONCLUSION

Cet ouvrage s'appuie sur les résultats d'une étude effectuée en partenariat entre le Cerema et le Shom, dans le cadre des travaux des feuilles de route des opérateurs risques naturels initiées par la DGPR et achevées en 2021 [Cerema et Shom, 2022]. Elle a pour objectif l'estimation des valeurs extrêmes de niveau d'eau sans l'action des vagues le long du littoral métropolitain, par une approche statistique. Elle participe au développement d'une méthode d'élaboration de jeux de cartes de submersions utiles pour la vigilance et l'alerte ainsi que pour la préparation à la gestion des risques et des crises.

Les méthodes utilisées reposent sur l'analyse des niveaux d'eau marins observés par les marégraphes dans des ports de référence. Après avoir caractérisé le comportement statistique des niveaux observés, il est possible d'extrapoler ce comportement pour des périodes de retour de valeurs plus élevées. Cela permet d'estimer le niveau de référence pour une période de retour donnée et réciproquement.

Les niveaux entre les ports sont obtenus par interpolation. Sur le littoral Manche-Atlantique, l'interpolation est enrichie par l'apport des modèles de marée et de surcote afin de prendre en compte les variations locales de niveau. Sur le littoral méditerranéen, en l'absence de modèle de marée fiable, il est utilisé une simple interpolation linéaire.

Les résultats se présentent sous la forme de courbes d'ajustement des niveaux aux ports de référence, avec le résultat des calculs de période de retour, et pour un nombre limité de périodes de retour, sous la forme d'un ensemble de cartes d'interpolation entre les ports le long du littoral.

Ces valeurs sont des valeurs de référence pour l'estimation des périodes de retour des niveaux d'eau sans l'action des vagues, cette dernière étant presque intégralement filtrée par les marégraphes dans les ports.

L'information est considérée comme fiable aux ports de référence, modulo les intervalles de confiance indiqués.

Pour les interpolations le long du littoral, cela reste un premier niveau d'information. Il convient :

- de vérifier la pertinence du port de référence utilisé pour l'interpolation, certains ports étant éloignés ou impactés par des phénomènes locaux ;
- de quantifier l'action des vagues qui surélève le niveau, la difficulté étant que cette surélévation est très variable selon l'exposition aux vagues et les caractéristiques du site ;
- de croiser avec l'ensemble des données locales disponibles, pour vérifier qu'il n'a pas été oublié d'éventuelles influences de cours d'eau, de phénomène de résonance (seiche) ou encore de risque de tsunami ;
- et surtout de croiser avec les relevés historiques de niveau d'eau, bien qu'ils ne soient pas toujours directement comparables avec les mesures dans les ports, ce sont les témoins des niveaux déjà atteints en conditions exceptionnelles.

À cela s'ajoute la prise en compte du changement climatique, avec des estimations de surélévation diffusées périodiquement par le GIEC (voir par exemple <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool> pour des projections régionales).

Les méthodes d'évaluation des valeurs extrêmes de niveaux marins relèvent encore du domaine de la recherche, avec pour objectifs de minimiser les incertitudes et de lever les limites citées dans cet ouvrage.

Une première limite importante à ce travail est que les résultats ne couvrent pas l'outre-mer. Nous disposons de moins de données en outre-mer (manque de ports de référence et durées d'observations trop courtes). De plus il faut traiter la problématique des cyclones aux Antilles et dans l'océan Indien, événements plus rares que les tempêtes de métropoles, ce qui sous-entend que la durée d'observation doit être plus longue pour disposer d'un échantillon représentatif. L'approche doit donc s'appuyer sur des modélisations pour combler le manque de données.

En métropole, une meilleure représentation des variations locales de niveau est envisageable avec l'apport de nouvelles sources de données (données satellites en particulier) et l'amélioration des modèles (marée et prévision des surcotes météorologiques).

Il est conseillé ici d'extrapoler les résultats jusqu'aux périodes de retour 100 ans, voire 1000 ans, selon la durée d'observation du port de référence. En agrégeant les données disponibles sur différents sites (méthodes régionales) ou en exploitant l'information historique, il est possible de dépasser cette limite.

Un autre défi est la prise en compte de l'effet des vagues, effet essentiel pour les calculs de débordement et de franchissement des ouvrages de protection, et in fine pour caractériser le risque de submersion marine dans le contexte du changement climatique. Cela passe par la connaissance de la propagation des états de mer, de la nature de la côte et des caractéristiques des éventuels ouvrages de protection. Cela se fait pour l'étude d'un site particulier, mais est beaucoup plus compliqué pour une approche globale et nationale.

Le présent ouvrage est une pierre essentielle à la connaissance des valeurs extrêmes de niveau marin, qui jalonne un mouvement continu d'approfondissement et d'amélioration.

L'enjeu d'une meilleure connaissance est de favoriser le dynamisme des territoires dans une logique de juste équilibre, pour préserver leur attractivité et assurer leur protection.

Annexe 1

Comparaison des résultats 2012 et 2022

COMPARAISON DES RÉSULTATS 2012 ET 2022

Estimation des valeurs extrêmes de niveau 2012 (mètres IGN69)

Étude Shom Cetmef 2012					
Port de référence	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
ARCACHON	3,22	3,31	3,4	3,51	3,6
BOUCAU-BAYONNE	2,91		3,03	3,1	3,16
BOULOGNE-SUR-MER	5,42	5,49	5,57	5,66	5,74
BREST	4,42	4,49	4,55	4,64	4,7
CALAIS	4,69	4,77	4,85	4,96	5,04
CHERBOURG	3,94	4	4,06	4,14	4,2
CONCARNEAU	3,34	3,41	3,48	3,56	3,63
DIEPPE	5,93	6	6,07	6,16	6,23
DUNKERQUE	4,31	4,4	4,49	4,61	4,7
LA ROCHELLE	3,54	3,61	3,69	3,78	3,85
LE CONQUET	4,31	4,37	4,44	4,52	4,58
LE HAVRE	4,45	4,53	4,61	4,72	4,81
LES SABLES-D'OLONNE	3,34	3,41	3,48	3,57	3,64
POINTE SAINT-GILDAS	3,42	3,49	3,56	3,66	3,73
PORT-BLOC	3,35	3,42	3,49	3,59	3,66
PORT-TUDY	3,28	3,35	3,42	3,51	3,58
ROSCOFF	5,13	5,19	5,25	5,33	5,39
SAINT-MALO	7,2	7,27	7,34	7,43	7,49
SAINT-NAZAIRE	3,7	3,78	3,87	3,97	4,06
SOCOA ST-JEAN-DE-LUZ	2,88	2,92	2,97	3,03	3,07

Estimations des valeurs extrêmes de niveau 2022 (mètres IGN69)

Actualisation 2022					
Port de référence	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
ARCACHON	3,27	3,35	3,43	3,55	3,64
BOUCAU-BAYONNE	2,95	3,01	3,07	3,15	3,20
BOULOGNE-SUR-MER	5,48	5,55	5,63	5,74	5,82
BREST	4,48	4,55	4,61	4,70	4,76
CALAIS	4,66	4,74	4,81	4,90	4,96
CHERBOURG	3,96	4,01	4,07	4,14	4,19
CONCARNEAU	3,37	3,43	3,48	3,55	3,61
DIEPPE	5,90	5,97	6,04	6,15	6,26
DUNKERQUE	4,33	4,42	4,51	4,61	4,69
LA ROCHELLE	3,59	3,66	3,73	3,84	3,92
LE CONQUET	4,36	4,42	4,48	4,55	4,61
LE HAVRE	4,48	4,58	4,69	4,84	4,96
LES SABLES-D'OLONNE	3,37	3,44	3,50	3,57	3,62
POINTE SAINT-GILDAS	3,49	3,56	3,63	3,72	3,78
PORT-BLOC	3,39	3,46	3,53	3,62	3,69
PORT-TUDY	3,29	3,36	3,42	3,49	3,55
ROSCOFF	5,15	5,21	5,26	5,33	5,38
SAINT-MALO	7,24	7,29	7,35	7,42	7,49
SAINT-NAZAIRE	3,76	3,84	3,93	4,05	4,14
SOCOA ST-JEAN-DE-LUZ	2,91	2,96	3,00	3,05	3,08

Les différences entre les résultats 2012 et 2022 sont notables pour les 7 ports suivants : Boulogne-sur-Mer, Brest, Calais, La Rochelle, Le Havre, Pointe Saint-Gildas et Saint-Nazaire. Ces différences sont liées pour partie aux niveaux moyens pris en référence et pour partie à l'ajustement statistique des surcotes.

Les niveaux moyens pris en référence sont :

- pour l'étude de 2012, issus de l'édition 2009 du produit Shom RAM ;
- pour l'actualisation 2022, recalculés (voir annexe 2).

Port de référence	Différences				
	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 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

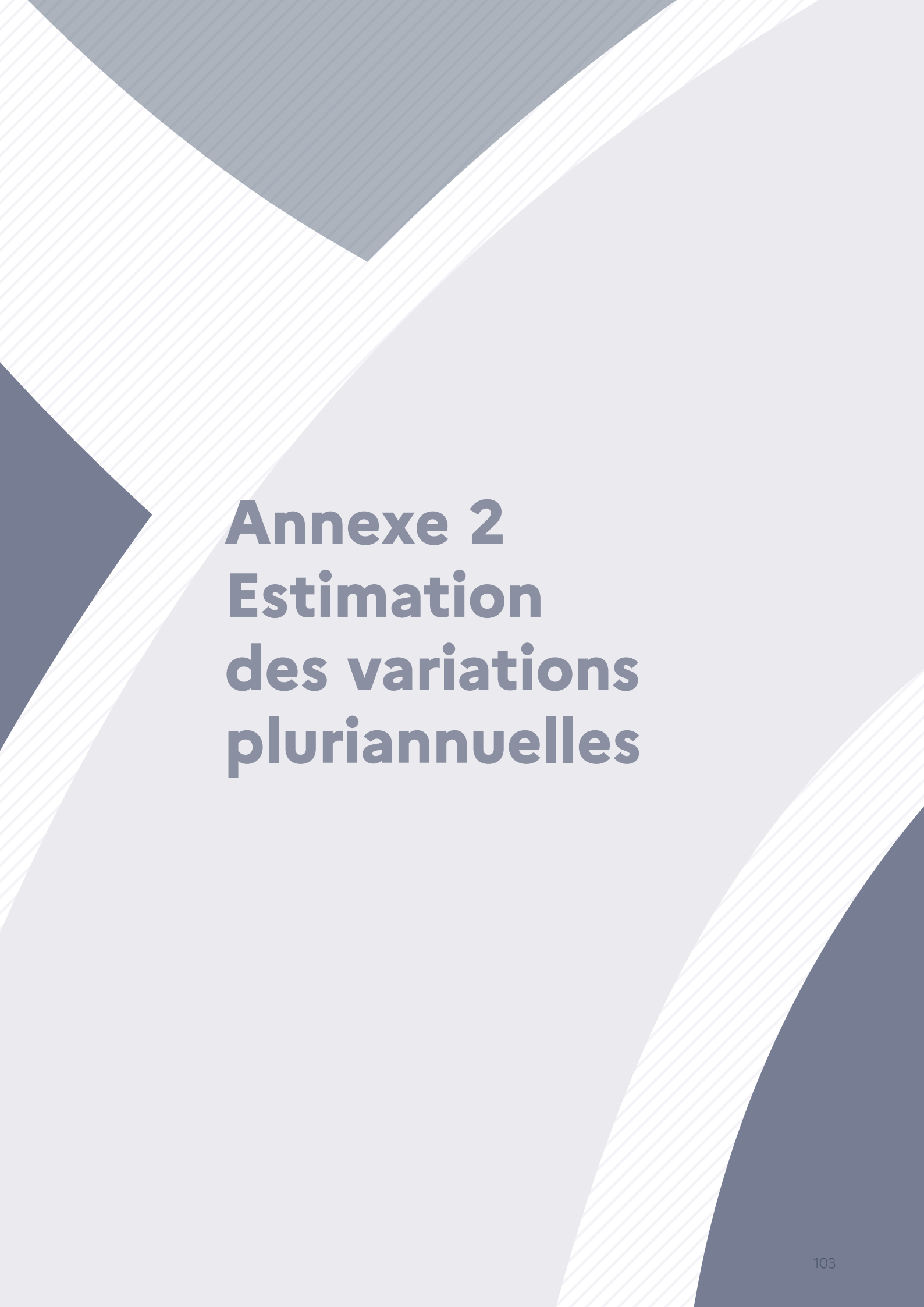
Valeur absolue	< 5 cm	< 10 cm	< 15 cm
----------------	--------	---------	---------

Le tableau ci-après présente les écarts de niveaux moyens pour les sept ports précités. Pour quatre d'entre eux, la différence entre les résultats 2012 et 2022 s'explique par le changement de niveau moyen de référence.

Écart entre les niveaux moyens 2012 et 2022

	Niveau moyen 2022 – Niveau moyen RAM2012
BOULOGNE-SUR-MER	9 cm
BREST	5 cm
CALAIS	1 cm
LA ROCHELLE	2 cm
LE HAVRE	0 cm
POINTE SAINT-GILDAS	5 cm
SAINT-NAZAIRE	5 cm

Pour les trois autres ports, la différence s'explique par l'incertitude importante sur le facteur de forme de la GPD utilisée pour l'ajustement des surcotes.



Annexe 2

Estimation des variations pluriannuelles

ESTIMATION DES VARIATIONS PLURIANNUELLES

Les variations pluriannuelles de niveau d'eau observé aux ports comprennent :

- l'eustatisme (dilatation thermique des océans et échanges entre la mer et les autres réservoirs naturels d'eau) ;
- l'isostasie (phénomènes tectoniques et subsidence/émersion des continents) ;
- voire des effets locaux (phénomènes de subsidence/émersion du support du marégraphe).

Il n'est pas cherché ici à différencier la part due à ces différentes composantes.

A2.1 - PORTS EN MANCHE-ATLANTIQUE

Pour les calculs de surcote PM, il est nécessaire de corriger les observations au marégraphe des variations pluriannuelles de niveau d'eau. La méthode utilisée est celle de [Kergadallan, 2015].

En synthèse, seule la série temporelle au marégraphe de Brest est jugée de durée suffisante (plus de 150 ans) pour caractériser les variations de niveau d'eau liée à l'eustatisme et l'isostasie. Le marégraphe de Brest est donc utilisé comme référence afin d'estimer les variations sur les autres ports.

La méthode est illustrée pour le port de La Rochelle, voir illustration ci-après. Les hypothèses sont les suivantes :

- les variations pluriannuelles (sur 50 ans et plus) liées à l'eustatisme et l'isostasie peuvent être modélisées par une régression linéaire sur les moyennes annuelles de niveau d'eau ; ces variations sont propres à chaque port ;
- les variations annuelles (sur 1 à 30 ans) liées principalement à des facteurs météorologiques sont similaires d'un port à l'autre.

Selon ces hypothèses :

- les variations pluriannuelles peuvent être estimées sur Brest (durée d'observation suffisante), mais pas sur La Rochelle (durée d'observation trop faible), voir illustration a ;
- par contre il est possible, en s'appuyant sur la similarité des variations annuelles, d'estimer la vitesse relative de variation pluriannuelle de La Rochelle par rapport à Brest, voir illustration b.

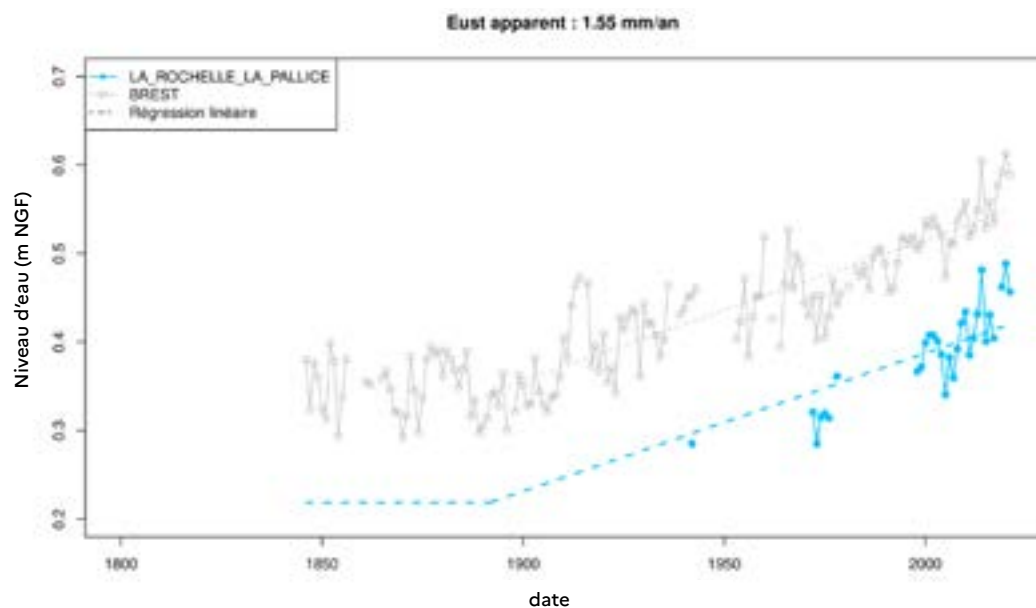
La vitesse de variation pluriannuelle du port étudié est donc égale à la vitesse de variation pluriannuelle de Brest, corrigée de la vitesse relative précédemment établie (ligne pointillée bleu illustration a).

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-après.

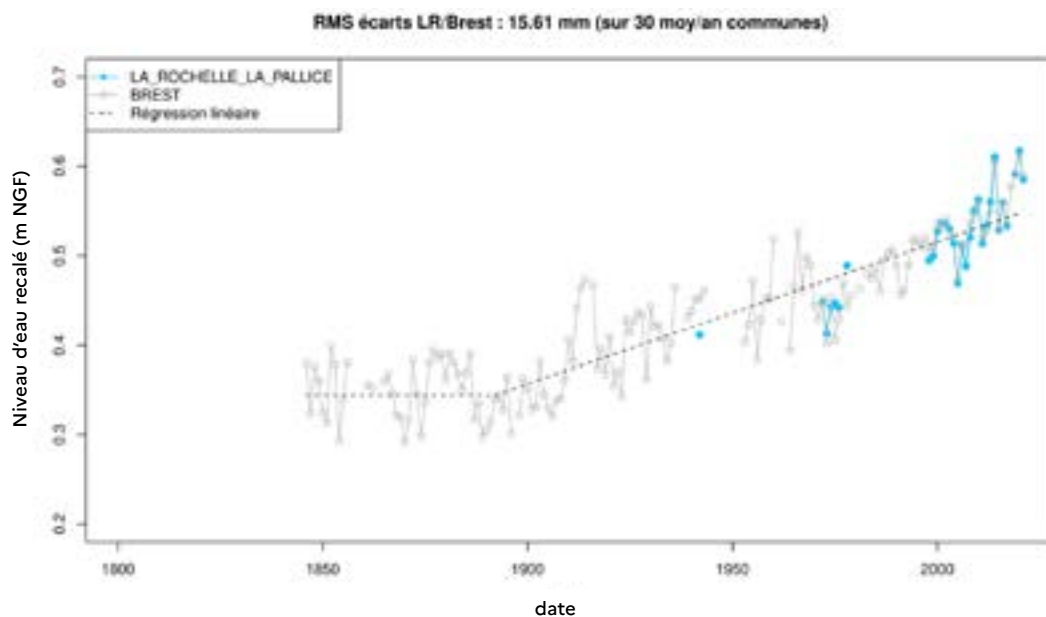
À noter que le Finistère (et donc Brest) se soulève par rapport au reste de la Bretagne (voir [BRGM, 2009]). De plus, des effets de subsidence locaux peuvent aussi être présents (par exemple à Dieppe selon le PSMSL, <http://www.psml.org>). Ces phénomènes sont pris en compte par le calcul des vitesses relatives de variation pluriannuelle du niveau d'eau par rapport à Brest. Par contre, il n'est pas possible dans les vitesses de variation présentées ici de différencier la part due à l'eustatisme et celle due à l'isostasie (voire à des phénomènes locaux comme à Dieppe).

Estimation de la vitesse de variation pluriannuelle du niveau d'eau au port de La Rochelle

a) Observations sur Brest et La Rochelle



b) Observations sur Brest et observations recalées sur La Rochelle



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

Marégraphes	Variations pluriannuelles
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

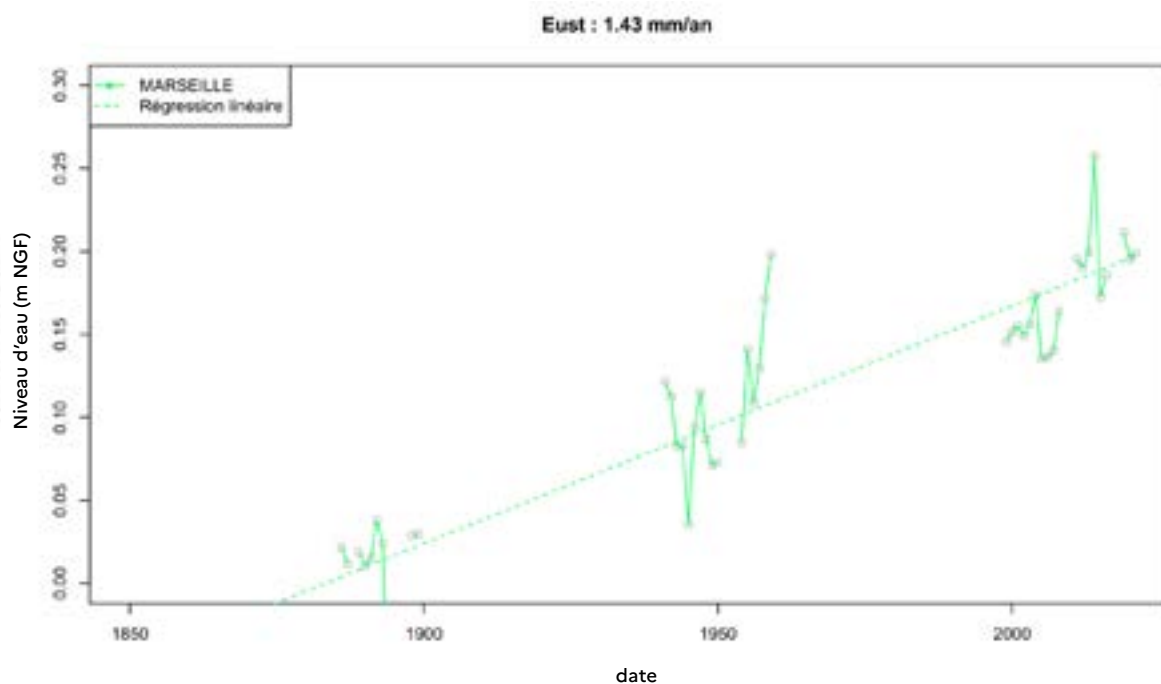
LE CONQUET	1,63 mm/an
DIEPPE	3,85 mm/an
DUNKERQUE	1,09 mm/an
ILE D'AIX	2,85 mm/an
LE CROUESTY	2,21 mm/an
LE HAVRE	0,89 mm/an
LA ROCHELLE LA PALLICE	1,55 mm/an
PORT-BLOC	1,61 mm/an
PORT-TUDY	0,81 mm/an
ROSCOFF	0,75 mm/an
SAINT-GILDAS	0,69 mm/an
SAINT-JEAN-DE-LUZ SOCOA	0,95 mm/an
SAINT-MALO	1,42 mm/an
SAINT-NAZAIRE	1,24 mm/an
LES SABLES-D'OLONNE	2,06 mm/an

A2.2 - MÉDITERRANÉE

Afin d'effectuer l'analyse statistique des valeurs extrêmes de niveau d'eau, il est nécessaire de corriger les observations aux marégraphes des variations pluriannuelles.

La méthode de recalage utilisée en Manche-Atlantique ne peut se faire que s'il existe une période d'observation commune suffisante avec le port choisi en référence. Les durées d'observations étant de manière générale un peu faibles en Méditerranée pour appliquer la méthode de recalage, il est choisi ici d'appliquer simplement l'eustatisme calculé sur le port de Marseille (plus longue série avec une vitesse de variation annuelle estimée à 1,43 mm/an) à l'ensemble des ports de la zone.

Estimation de la vitesse de variation pluriannuelle du niveau d'eau au port de Marseille



Annexe 3

Description détaillée de la méthode de calcul des valeurs extrêmes de niveau d'eau

DESCRIPTION DÉTAILLÉE DE LA MÉTHODE DE CALCUL DES VALEURS EXTRÊMES DE NIVEAU D'EAU

A3.1 - ANALYSE AUX PORTS DE RÉFÉRENCE

Les méthodes utilisées s'appuient sur la théorie de valeurs extrêmes (voir par exemple [Coles, 2001]).

Selon les sites, deux approches différentes sont adoptées :

- pour les marégraphes de Manche-Atlantique, du fait des marnages importants (supérieurs à trois mètres), il est choisi une approche indirecte avec l'étude du niveau d'eau à travers ses composantes marée et surcote ;
- pour les marégraphes de Méditerranée, du fait des faibles marnages (inférieurs à une quarantaine de centimètres), il est choisi une analyse directe des niveaux d'eau (pas de décomposition marée surcote).

A3.1.1 - APPROCHE INDIRECTE : MANCHE-ATLANTIQUE

Afin de s'affranchir d'éventuels problèmes de déphasage dans les enregistrements, entre la prédiction de la marée et l'observation, l'analyse est effectuée aux seuls moments de pleine mer. Le résultat porte donc sur le « niveau d'eau de pleine mer¹ » (niveau d'eau PM, calculé par interpolation des données horaires par spline-cubique), étudié à travers ses composantes « marée de pleine mer² » (marée PM) et « surcote de pleine mer³ » (surcote PM). Du fait des marnages importants, les valeurs extrêmes de niveau d'eau PM peuvent être assimilées aux valeurs extrêmes de niveau d'eau horaire.

Les distributions de probabilités des marées PM et des surcotes PM sont étudiées ici séparément avant d'être combinées ensemble par une méthode dite de convolution marée-surcote :

- les conditions de marée se reproduisant quasiment à l'identique tous les 18 ans (Saros⁴), une analyse empirique sur cette période permet de décrire entièrement le phénomène sans avoir recours à une méthode d'extrapolation ;
- la distribution de probabilités des surcotes PM est décrite par une analyse empirique pour l'essentiel et par extrapolation statistique pour les extrêmes. La méthode d'analyse des valeurs extrêmes est la même que celle mise en œuvre pour l'étude des niveaux d'eau en Méditerranée (voir §A3.1.3 de l'annexe). Les moments de pleine mer sont considérés comme indépendants (voir discussion §A4.2.2 annexe 4). La loi paramétrique retenue est une distribution de Pareto (Generalized Pareto Distribution, GPD).

La probabilité que le niveau d'eau PM « Z_{PM} » soit supérieur à la valeur « z » est alors donnée par la formule suivante :

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

avec

→ « $p(m)$ » la densité de probabilité d'avoir une marée PM égale à « m » ;

⁽¹⁾ Niveau d'eau maximum observé au voisinage de la pleine mer.

⁽²⁾ Niveau de pleine mer prédit.

⁽³⁾ Différence entre le niveau de pleine mer et la marée de pleine mer.

⁽⁴⁾ Saros : 18 ans et 10 ou 11 jours, temps nécessaire pour que la Lune, le Soleil et la Terre (mais également l'inclinaison de celle-ci sur le plan de l'écliptique) se retrouvent dans la même configuration géométrique, ou presque.

→ « $F_s(s)$ » la fonction de répartition des surcotes PM ;

→ « $PBPMA$ » et « $PHPMA$ » respectivement les Plus basses et Plus hautes pleines mers astronomiques.

La période de retour « T », en années, associée à « z » est décrite par la formule suivante :

$$T(z) \approx \frac{1}{n \times \Pr\{Z_{PM} > z\}}$$

avec « n » le nombre moyen de pleines mers par an.

L'incertitude d'échantillonnage liée à la convolution marée-surcote (voir §A4.2.3 annexe 4) est calculée par une méthode Monte-Carlo.

A3.1.2 - APPROCHE INDIRECTE : CAS PARTICULIER DU PORT DE SAINT-MALO

Pour le port de Saint-Malo, l'analyse des intervalles de confiance suggère que le présent modèle avec indépendance marée surcote n'est pas le plus approprié. Cela s'explique par les fortes variations de niveaux de pleine mer en comparaison avec les autres ports.

Il est proposé pour ce seul port une prise en compte de la dépendance entre la surcote et la marée au moment de pleine mer.

Deux distributions de marée PM différentes sont utilisées, selon la valeur de surcote à laquelle la marée est combinée. Concrètement si Sm est la valeur médiane des observations de surcote PM :

- on isole les marées PM associées à une surcote $\leq Sm$ et on calcule la distribution de marée pour la 1^{re} bande de surcotes (surcote de $-\infty$ à Sm) ;
- on isole les marées PM associées à une surcote $> Sm$ et on calcule la distribution de marée pour la 2^e bande de surcotes (surcote de Sm à $+\infty$).

Puis la distribution d'ajustement est déterminée de manière empirique par simulation ici de 10 ans de niveaux PM :

- détermination de la loi de distribution de surcote PM (distribution empirique sous le seuil POT, ajustement d'une GPD au-dessus du seuil POT) ;
- simulation de 10^5 ans de surcote PM ;
- bandes de surcotes par bandes de surcotes, simulation des marées PM par tirages aléatoires à partir de la distribution de marée de la bande en question ;
- calcul des niveaux (marée + surcote) et calcul des périodes de retour empiriques.

La méthode est présentée dans le détail dans [Cerema et Shom, 2022]. L'amélioration du résultat est sensible au vu du recalcul des intervalles de confiance.

A3.1.3 - APPROCHE DIRECTE : MÉDITERRANÉE

En raison du faible marnage en Méditerranée, les données horaires de niveau d'eau sont étudiées directement sans passer par une décomposition marée surcote.

La queue de distribution de probabilités de niveau d'eau horaire (correspondant aux valeurs extrêmes) est décrite par une extrapolation statistique d'une loi paramétrique. Pour ce faire, en vue de constituer une population de pics de tempête indépendants, les pics de niveaux d'eau sont sélectionnés par la méthode des « *Peaks Over Threshold* » (POT), avec l'ajout d'un critère de séparation dans le temps de ± 24 heures. La loi paramétrique est ensuite ajustée statistiquement sur ces événements ; l'extrapolation de cette loi permettant d'estimer les périodes de retours associées aux valeurs extrêmes. Deux lois paramétriques sont testées afin de prendre en compte l'incertitude du choix du modèle statistique (voir §A4.2.2 annexe 4) : une GPD et une loi exponentielle.

La probabilité conditionnelle que le niveau d'eau « Z » soit supérieur à la valeur « z », sachant que « z » est supérieur au seuil de tempête « S_0 », est alors donnée par les formules suivantes :

- pour une GPD :

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

de paramètre d'échelle σ et de paramètre de forme ξ ;

- pour une loi exponentielle :

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

de paramètre ρ .

La période de retour « T », en années, associée à « z » est décrite par la formule suivante :

$$T(z) \approx \frac{1}{n \times Pr\{Z > z \mid z > s_0\}}$$

avec « n » le nombre moyen par an de pics de niveau d'eau considérés comme indépendants (distants de ± 24 heures) supérieurs au seuil de tempête « S_0 ».

À noter que les formules de calculs sont les mêmes pour l'estimation des valeurs extrêmes de surcote PM étudiées au paragraphe précédent, il suffit de remplacer le niveau « Z » par la surcote PM « S ». Les surcotes PM étant considérées comme indépendantes, il n'y a pas lieu d'ajouter un critère de séparation dans le temps pour constituer la population de pics de tempête indépendants.

A3.2 - INTERPOLATION LE LONG DU TRAIT DE CÔTE

A3.2.1 - APPROCHE INDIRECTE : MANCHE-ATLANTIQUE

Principe de la méthode

La loi de distribution des niveaux d'eau PM est obtenue par convolution des distributions de surcote PM et de niveau de marée PM. Pour l'appliquer en un point quelconque du trait de côte, il est nécessaire de disposer de la distribution de marée PM et de la distribution de surcote PM. Or nous ne disposons au voisinage du trait de côte que de la distribution de marée PM et d'une simulation de 4 ans de surcotes horaires.

La méthode développée dans [Kergadallan, 2014] propose d'estimer la distribution de surcote PM manquante à partir de celle aux ports de références. La distribution de surcote PM au point de calcul est assimilée à la distribution au port de référence, pondérée par un facteur de proportionnalité établi à partir du profil de variation des surcotes horaires. Pour un point du trait de côte, il est ainsi possible d'obtenir autant de distributions de surcote PM pondérées qu'il y a de ports de référence. Donc par convolutions marée et surcote, il est possible d'obtenir autant d'estimations de niveau qu'il y a de ports de référence (même marée, distribution de surcotes différente selon le port pris en référence). Il est choisi de garder seulement deux estimations de niveau sur la base des deux ports de référence encadrant le point du trait de côte. L'estimation finale est une moyenne de ces deux estimations, pondérée par la distance aux ports.

Présentation détaillée

Dans le détail, pour les deux estimations, il est effectué une convolution de la distribution de marée PM au point du trait de côte :

- dans un 1^{er} temps avec la distribution de surcote PM au premier port de référence A encadrant le point du calcul ;
- dans un 2^e temps avec la distribution de surcote PM au deuxième port de référence B encadrant le point du calcul.

Afin de prendre en compte les variations de surcotes PM entre les ports de référence A et B, la simulation de 4 ans de surcotes horaires est utilisée pour établir un profil d'évolution des surcotes le long du littoral (évolution des centiles 99 %, voir discussion annexe 4 §A4.3.2). Ce profil permet de calculer un facteur de proportionnalité des surcotes entre le point de calcul et le port de référence, et ainsi corriger les distributions de surcote PM des ports A et B dans le calcul de convolution.

Afin de prendre en compte les différences de distance entre le point du trait de côte et les ports A et B, il est effectué une moyenne pondérée des deux estimations. Le facteur de pondération est inversement proportionnel à la distance (le port le plus proche a donc un poids plus élevé).

Les formules de calcul utilisées sont les suivantes :

soit $\theta_{0/A}$ le rapport entre les centiles 99 % des surcotes horaires simulées au point de calcul 0 et celles simulées au port de référence A ;

sur la base de la distribution de surcote PM au port A, la probabilité que le niveau d'eau PM $Z_{0/A}^{PM}$ soit supérieur à la valeur « z » est alors donnée par la formule suivante :

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

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

sur le même principe, soit $Pr\{Z_{0/B}^{PM} > z\}$, la probabilité que le niveau d'eau PM $Z_{0/B}^{PM}$ soit supérieur à la valeur « z » sur la base de la distribution de surcote PM au port B.

Pour une période de retour donnée, on calcule $\bar{z}_{0/A}$ et $\bar{z}_{0/B}$ les niveaux d'eau estimés au point 0 par rapport respectivement aux ports A et B par la formule reliant T à z (voir §A3.1.1 de l'annexe). L'estimation $\bar{z}_0$ au point 0 est établie par la formule suivante :

$$\bar{z}_0 = \gamma_{A0} \cdot \bar{z}_{0/A} + \gamma_{B0} \cdot \bar{z}_{0/B}$$

avec $\gamma_{A0} = (x_B - x_0)/(x_B - x_A)$ et $\gamma_{B0} = (x_A - x_0)/(x_A - x_B)$

et (x_0, x_A, x_B) , respectivement les abscisses des points (0,A,B) sur le trait de côte.

Pour calculer les abscisses des points (0,A,B) il est effectué un lissage du trait de côte (moyenne glissante des coordonnées géographiques des points du trait de côte sur +/-25 km, voir [Kergadallan, 2014]).

À noter que la méthode de modélisation de la dépendance de marée surcote au port de Saint-Malo (voir §A3.1.2 de l'annexe) ne peut être mise en œuvre en l'absence d'observation de niveau. Pour les interpolations autour de Saint-Malo, la marée PM et la surcote PM sont donc considérées comme indépendantes.

A3.2.2 - APPROCHE DIRECTE : MÉDITERRANÉE

Pour la Méditerranée, la méthode d'interpolation est assez similaire à celle de l'approche indirecte.

Deux estimations sont faites en utilisant les données aux ports de référence encadrant le point de calcul. Ici pas de convolution surcote marée, chaque estimation utilise directement la distribution de niveau au port de référence.

Pour calculer le facteur de proportionnalité, l'idéal eut été de disposer d'une simulation de niveaux d'eau horaires le long du trait de côte. Mais en l'absence de modèle de marée performant, nous ne disposons que de la simulation de 4 années de surcotes horaires. Du fait des faibles marnages, un facteur de proportionnalité aurait pu être calculé à partir de ces simulations de surcotes (variations de surcote assimilées à des variations de niveau). Les variations des centiles de surcotes étant faibles sur le littoral par rapport aux intervalles de confiance, il est choisi ici de garder ces données pour discuter de la validité du résultat (voir annexe 8).

Les formules de calcul utilisées sont les suivantes :

- soit $Pr\{Z_A^{PM} > z\}$ et $Pr\{Z_B^{PM} > z\}$ les distributions de niveau aux ports A et B encadrant le point de calcul 0,
- pour une période de retour donnée on calcule $Z_{0/A}$ et $Z_{0/B}$ les niveaux d'eau estimés respectivement aux ports A et B par formule reliant T à z (voir § A3.1.3 de l'annexe). L'estimation Z_0 au point 0 est calculée de la même manière que pour l'approche indirecte.

Annexe 4

Présentation détaillée des incertitudes et des limites liées aux résultats

PRÉSENTATION DÉTAILLÉE DES INCERTITUDES ET DES LIMITES LIÉES AUX RÉSULTATS

La méthode utilisée ici est une approche globale et nationale de détermination des valeurs extrêmes de niveau d'eau sans l'action des vagues. Pour une analyse plus fine, il est important de croiser ces résultats avec l'ensemble des informations disponibles en local, en particulier l'éventuelle surélévation liée au déferlement des vagues (wave set-up) et les données sur les niveaux d'eau historiques.

Les sources d'incertitudes et limites présentées ici sont liées aux données utilisées et à la méthode de calcul, avec une distinction entre le calcul aux ports de référence et celui entre les ports de référence.

A4.1 - SUR LES DONNÉES UTILISÉES

Trois types de données sont utilisées : les observations aux marégraphes, les prédictions de marée et la simulation de surcotes issue du projet HOMONIM [Jourdan *et al.*, 2016].

A4.1.1 - INCERTITUDES

Une incertitude est associée à la mesure par marégraphe (un à plusieurs centimètres selon la technologie du marégraphe, une même localisation de mesure ayant pu voir plusieurs technologies se succéder). À cela s'ajoute une incertitude liée aux conditions de mesure (pannes, détérioration du dispositif de mesure...). Ces incertitudes sont difficilement quantifiables. Ces deux types d'incertitudes sont considérés comme négligeables au vu de l'ensemble des incertitudes.

À noter que l'observation aux marégraphes peut intégrer une composante du wave set-up présente dans le port, voire autour du port (voir §A4.3.1 de l'annexe).

Selon le Shom, l'incertitude à 95 % associée aux prédictions de marée :

- aux ports de référence est inférieure à **± 15 cm, incertitude à ajouter à celle de la méthode de calcul §A4.2 de l'annexe ;**
- entre les ports de référence est inférieure à **± 25 cm, incertitude à ajouter à celle de la méthode de calcul §A4.3 de l'annexe.**

L'incertitude associée à la simulation de surcotes issue d'HOMONIM n'est pas connue. En Manche-Atlantique, sur les 18 ports de référence, l'erreur quadratique moyenne est de 7,9 cm (de 5,0 à 12,7 cm) pour un écart type moyen de 7,6 cm (de 4,2 à 12,3 cm) [Pasquet, 2016]. En Méditerranée, sur les 7 ports de référence, l'erreur quadratique moyenne est de 8,3 cm (de 5,6 à 11,4 cm) pour un écart type moyen de 8,0 cm (de 4,5 à 8,8 cm) [Pasquet *et al.*, 2015].

A4.1.2 - NIVEAU MOYEN DE RÉFÉRENCE

En Manche-Atlantique, le résultat est conditionné par le niveau moyen utilisé pour le calcul des prédictions de marée. Or le niveau moyen n'est pas constant, mais la résultante d'un ensemble de phénomènes se déclinant sur des échelles temporelles différentes : millénaires, siècles, années, mois, jours, heures, minutes, secondes.

Il n'existe pas une définition unique du niveau moyen. Ces niveaux sont officiellement définis par le produit Shom Références altimétriques maritimes [RAM, 2020]. Les niveaux moyens sont calculés régulièrement à chaque mise à jour des composantes harmoniques de marée utilisées pour les prédictions.

Dans le cadre de la présente étude :

- pour un port de référence, le niveau moyen correspond au niveau 2022 calculé par régression linéaire sur les moyennes annuelles (suivant la méthode décrite en annexe 2). Ce niveau moyen de référence est indiqué dans les résultats par port (§3 de l'ouvrage) afin de pouvoir facilement transposer le résultat à un autre niveau moyen de référence.
- pour les prédictions de marée entre les ports de référence, ces dernières sont issues du modèle Shom cstFRANCE. Lors du référencement vertical de ces prédictions à l'IGN69, les surfaces de conversion BathyElli v2.0 sont utilisées. La date de référence des niveaux moyens de ces surfaces est le 1^{er} janvier 2000.

Selon l'année considérée pour l'exploitation des résultats, il est recommandé d'ajouter une composante liée au changement climatique. Pour ce faire, il peut être utilisé par exemple les projections régionales du 6^e rapport du GIEC (<https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>).

A4.2 - SUR LA MÉTHODE DE CALCUL AUX PORTS DE RÉFÉRENCE

A4.2.1 - INCERTITUDE DE STATIONNARITÉ

Cette incertitude porte sur la représentativité de l'échantillon de données étudiées aux ports de référence. Il est possible, notamment dans le contexte du changement climatique, que le comportement des tempêtes ou les interactions entre la marée et la surcote se modifient. Si cela est confirmé, les estimations issues des méthodes d'ajustement statistique décrites ici ne sont pas utilisables pour des projections dans le futur. Il serait alors nécessaire de mettre en œuvre une méthodologie d'ajustement spécifique.

Les études actuelles ayant seulement mis en évidence des variations du niveau d'eau moyen annuel liées à l'eustatisme (voir le rapport [DGEC, 2015]), en l'absence d'éléments complémentaires, cette incertitude n'est pas prise en compte.

A4.2.2 - CHOIX DU MODÈLE D'ANALYSE STATISTIQUE

Incertitude du choix du modèle

L'analyse statistique des valeurs extrêmes nécessite de choisir entre plusieurs approches. Ces choix se portent en particulier sur la méthode de sélection de la population de pics de tempête analysée (maxima annuels, méthode POT, etc.) et sur le type de loi paramétrique utilisée pour l'ajustement puis l'extrapolation statistique. L'ensemble des résultats possibles forme l'incertitude du choix du modèle statistique.

Cette incertitude est difficilement quantifiable. On considère généralement que le travail de l'expert permet de choisir au mieux le modèle statistique sans qu'il y ait besoin de prendre en compte cette incertitude dans la suite de l'étude.

Discussion autour du choix de la loi d'ajustement des valeurs extrêmes

Pour la Méditerranée, deux analyses ont été effectuées pour deux lois d'ajustement différentes des valeurs extrêmes de niveau d'eau : une GPD et une loi exponentielle. La différence de résultat rentre dans l'incertitude du choix du modèle statistique.

En Manche-Atlantique, du fait de l'approche indirecte (convolution marée-surcote), le choix de la loi d'ajustement des surcotes PM a un impact moins important qu'en Méditerranée. Il a été sélectionné la GPD, car elle présente par construction le plus grand intervalle de confiance.

Discussion autour du choix de l'hypothèse en Manche-Atlantique d'indépendance des niveaux PM consécutifs

En Manche-Atlantique il est fait l'hypothèse d'indépendance des niveaux PM consécutifs.

Dans les faits et pour un lieu donné, une tempête influence les niveaux sur 12 à 48 heures. Il y a donc dépendance entre les niveaux PM consécutifs. Or il est recherché aux ports une distribution continue des niveaux de périodes de retour 0,1 an à 100 ans. Il convient donc d'avoir la même définition du pic de niveau à 0,1 et à 100 ans. Travailler avec les valeurs maximales de niveau d'eau sur 48 heures (assimilées aux pics de tempête) est intéressant pour les fortes périodes de retour. Mais cela perd de son sens et est peu intuitif en dehors des tempêtes.

Une analyse de sensibilité [Cerema et Shom, 2022] a montré qu'entre l'indépendance des moments de pleine mer et la dépendance de deux moments consécutifs, les résultats convergent à partir de la période de retour d'un an (différence à un an de l'ordre d'un à deux centimètres). La plus-value de l'introduction d'un modèle de dépendance n'est donc pas significative.

Discussion autour de la qualité des ajustements des niveaux PM en Manche-Atlantique

En Manche-Atlantique, avec l'approche indirecte, l'analyse visuelle des courbes d'ajustement peut laisser penser sur certains ports à une surestimation des valeurs extrêmes. Cela se traduit par une courbe d'ajustement des niveaux PM très au-dessus des observations de niveaux PM.

Afin de mieux appréhender cet écart, il est introduit la notion d'intervalle de confiance sur les observations (noté sur les figures « IC Obs. »). Cela représente la dispersion possible des observations issues de la distribution de convolution marée-surcote (tirages successifs sur la durée d'observation). À ne pas confondre avec l'intervalle de confiance sur la courbe d'ajustement des niveaux PM (noté sur les figures « IC Ajust. »), lié à l'incertitude d'échantillonnage décrite ci-après (§A4.2.3 de l'annexe). Plus de détails sur l'intervalle de confiance sur les observations est donné dans [Cerema et Shom, 2022].

La position des observations par rapport à l'intervalle de confiance sur les observations montre une possible surestimation des niveaux aux ports du Conquet, Cherbourg, Roscoff et Sables-d'Olonne (voir les résultats par port §3 de l'ouvrage). L'étude de sensibilité [Cerema et Shom, 2022] montre que ce phénomène peut s'expliquer par une durée d'observation insuffisante.

A4.2.3 - INCERTITUDE D'ÉCHANTILLONNAGE

La qualité des extrapolations est tributaire de la durée des mesures. Cette incertitude est appelée « incertitude d'échantillonnage ». Elle est entièrement décrite par les intervalles de confiance calculés ici (noté « IC Ajust. » pour les ajustements par la méthode indirecte et « Loi Exp. IC » ou « GPD IC. » pour les ajustements par la méthode directe).

Les durées d'observation utilisées pour l'ajustement et l'extrapolation des valeurs extrêmes sont relativement limitées pour certains ports (entre 10 et 160 ans). Cela se traduit par un intervalle de confiance 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.

Pour la Méditerranée, l'intervalle de confiance est calculé sur les estimations de niveau d'eau horaires. Pour la Manche et l'Atlantique, l'intervalle de confiance est calculé sur les estimations de surcote PM d'une part et de niveau PM d'autre part.

La prise en compte des intervalles de confiance montre de manière générale que la méthode utilisée ici est plutôt adaptée jusqu'à la période de retour de 100 ans (voire 50 ans pour certains ports de Méditerranée). Pour les périodes de retour élevées (en particulier si l'on s'intéresse aux périodes de retour 1000 ans et plus), il est préférable d'adopter une approche différente de celle mise en œuvre ici (analyse régionale et/ou exploitant les données historiques, voir annexe 5 pour une présentation générale).

A4.3 - SUR LA MÉTHODE DE CALCUL ENTRE LES PORTS DE RÉFÉRENCE

L'estimation des valeurs extrêmes de niveau d'eau entre les ports utilise une méthode d'interpolation des résultats aux ports de référence. L'ensemble des incertitudes et limites décrites au paragraphe précédent s'applique donc ici.

A4.3.1 - WAVE SET-UP ET SEICHES

L'ensemble des composantes présent dans le signal est présenté au §1.1 de l'ouvrage.

La méthode utilisée ici interpole les estimations de niveau d'eau entre les ports de référence. Cela a deux conséquences directes, les composantes du niveau d'eau au point d'interpolation :

- ne sont pas prises en compte si elles ne sont pas présentes aux ports (en particulier le *wave set-up* lié au déferlement des vagues) ;
- sont prises en compte par erreur si elles ne se manifestent pas à l'extérieur du port (en particulier les éventuels effets de seiche).

Aucun tsunami notable n'a été observé sur les périodes observées, ils ne sont donc pas pris en compte. L'analyse repose sur les données horaires validées. Par construction les données horaires sont nettoyées des composantes de période inférieure à 20 minutes (vagues, ondes infragravitaires, seiches hautes fréquences). Sont présents dans les données aux ports :

- la marée et la surcote météorologique ;
- un éventuel *wave set-up* portuaire : *wave set-up* local (propre au port) et/ou régional (*wave set-up* de large emprise géographique, voir [Bertin et al., 2015]) ; dans cette étude son influence est limitée, car il est inversement proportionnel à la hauteur d'eau ;
- les seiches de périodes supérieures à 20 minutes (souvent locales, mais aussi régionales) ; voir [André et al., 2021] pour les ports concernés sur le littoral Manche-Atlantique ; les données horaires ne permettent pas d'isoler ces seiches du reste du signal.

Le *wave set-up* portuaire et l'influence des seiches sont ici considérés comme négligeables. Les niveaux d'eau observés dans les ports sont assimilés à des niveaux d'eau sans l'action des vagues (superposition de la marée et de la surcote météorologique). Pour aller plus loin, une analyse spécifique port par port de la présence du *wave set-up* et des seiches est nécessaire.

À noter les cas particuliers de Marseille et du Havre. Ces marégraphes sont vraisemblablement impactés par un phénomène local qui augmente la surcote dans certaines conditions. Ce phénomène est mal identifié et pourrait être dû à un *wave set-up* local, un apport d'eau douce, à des phénomènes hydrodynamiques locaux...

A4.3.2 - INTERPOLATION

En Manche-Atlantique, les interpolations entre les ports sont corrigées par un facteur de proportionnalité calculé avec les 4 années de surcotes horaires produites dans le cadre du projet HOMONIM. Les 4 années étant trop faibles pour calculer des distributions de surcote PM, se pose la question du choix du centile 99 % pour représenter les variations de surcotes PM. Les centiles, 95 %, 99 % et 99,9 % ont été testés dans l'étude [Cerema et Shom, 2022]. L'étude a montré une meilleure adéquation pour le centile 99 %.

À noter aussi que le maillage des surcotes du projet HOMONIM ne tombe pas sur les points de calculs utilisés ici. Il est choisi ici la méthode du plus proche voisin avec des écarts généralement d'un ou deux kilomètres, mais augmentant plus particulièrement en fonds de baie (jusqu'à 16 km en baie du Mont-Saint-Michel). Les phénomènes locaux de modulation des amplitudes de surcote à la côte ne sont donc que partiellement représentés, avec un point de vigilance en fond de baie.

Tout cela participe à l'incertitude de la méthode, incertitude non quantifiée ici.

Toutefois l'analyse des variations des surcotes issues du projet HOMONIM (voir annexe 7) a permis de relever :

- une anomalie locale au niveau du port de Bayonne, ce qui pose la question de l'utilisation de ce port en tant que port de référence avec potentiellement une surestimation des valeurs extrêmes de niveau à son voisinage ;
- une possible légère sous-estimation des valeurs extrêmes de niveau d'eau entre Port-Vendres et Sète et entre Nice et Monaco ;
- une possible légère surestimation des valeurs extrêmes de niveau d'eau au voisinage du Cap de Pertusato.

Comme indiqué au §A4.3.1 de l'annexe, les marégraphes du Havre et de Marseille sont vraisemblablement impactés par un phénomène local. Il y a donc une possible surestimation des valeurs extrêmes de niveau d'eau au voisinage de ces points.

Annexe 5

**Apports des données
historiques
et régionales
pour diminuer
les intervalles
de confiance
des niveaux d'eau
de grandes
périodes de retour**

Résumé

Ce document vise à apporter des éclaircissements concernant l'apport des données historiques et régionales dans les études statistiques afin de diminuer les incertitudes sur les estimations des niveaux extrêmes pour les grandes périodes de retour, supérieures à 100 ans. Ce document a été rédigé dans le cadre du Groupe de Travail pluridisciplinaire sur les tempêtes et submersions historiques par les membres du sous-groupe « statistiques de extrêmes » constitué de : Xavier Kergadallan (Cerema), Lise Bardet, Yasser Hamdi et Antonin Migaud (IRSN), Jessie Louisor et Jeremy Rohmer (BRGM), Franck Mazas (ARTELIA), Marc Andreevsky, Roberto Frau et Anne Dutfoy (EDF), Gaël André, Nathalie Giloy, Héloïse Michaud, Laurent Leballeur, Guiomar Lopez et Yann Krien (Shom), Laurie Saint-Criq (INRS).

APPORTS DES DONNÉES HISTORIQUES ET RÉGIONALES POUR DIMINUER LES INTERVALLES DE CONFIANCE DES NIVEAUX D'EAU DE GRANDES PÉRIODES DE RETOUR

A5.1 - APPORT DES DONNÉES HISTORIQUES ET RÉGIONALES

INTÉRÊTS D'UTILISER DES DONNÉES ADDITIONNELLES AUX DONNÉES SYSTÉMATIQUES

Les analyses statistiques de séries temporelles de niveaux d'eau (données systématiques) se confrontent régulièrement au phénomène de horsain⁽⁶⁾, qu'il est souvent difficile d'interpréter et qui induit de larges incertitudes sur les résultats. En effet, les séries de niveaux d'eau sont souvent associées à de courtes périodes d'observation et des phénomènes exceptionnels (tels que les tempêtes Martin et Xynthia) peuvent conduire à des surcotes ou à des niveaux d'eau beaucoup plus élevés que les autres valeurs de l'échantillon. Les informations additionnelles d'événements extrêmes, telles que les données historiques et/ou régionales, pourraient être prises en compte pour améliorer les estimations statistiques.

En effet, avant la période de mesures systématiques, de nombreuses archives historiques témoignent d'épisodes de submersion ou montrent des niveaux d'eau importants sur les littoraux, que ce soit au droit des marégraphes actuels ou à proximité. De plus, les séries locales de niveaux d'eau sont souvent entrecoupées par des périodes plus ou moins longues sans observations, du fait de l'absence ou d'un dysfonctionnement du marégraphe. Bien que le niveau d'eau n'ait pas été mesuré sur ces périodes par le marégraphe, des informations peuvent être disponibles, notamment dans la presse, à la suite d'un événement exceptionnel (tempête de 1957 à La Rochelle par exemple), à l'échelle locale ou régionale.

Sous réserve de la validation des données historiques et régionales, et de leur éventuelle reconstruction au droit du marégraphe actuel, ces informations additionnelles extrêmes sont d'un intérêt crucial pour mettre en perspective les résultats statistiques et évaluer leur pertinence. De plus, associées à leurs incertitudes, elles permettent de relativiser le phénomène de horsain en tenant compte d'un nombre plus important d'événements extrêmes dans la série temporelle. Ainsi, ces informations permettent d'affiner les analyses statistiques sur les niveaux marins extrêmes en réduisant les incertitudes, notamment pour de grandes périodes de retour (en particulier au-delà de niveaux centennaux). Il convient de noter que les données historiques ou régionales extrêmes, même relativement imprécises, apportent de l'information complémentaire utile aux analyses statistiques.

⁽⁶⁾ Observation dont la valeur s'écarte significativement de celles des autres observations d'un même échantillon de données.

VALIDATION DES DONNÉES HISTORIQUES ET INCERTITUDES

Les données historiques peuvent avoir différentes origines. Ces données peuvent être quantitatives : par lecture directe à l'échelle de marée, retranscription des niveaux sur des registres de marée, mesures analogiques par des marégraphes à flotteur reportées sur des marégrammes papier, etc. Ces données historiques peuvent aussi être qualitatives, issues de témoignages et d'archives descriptives d'un événement.

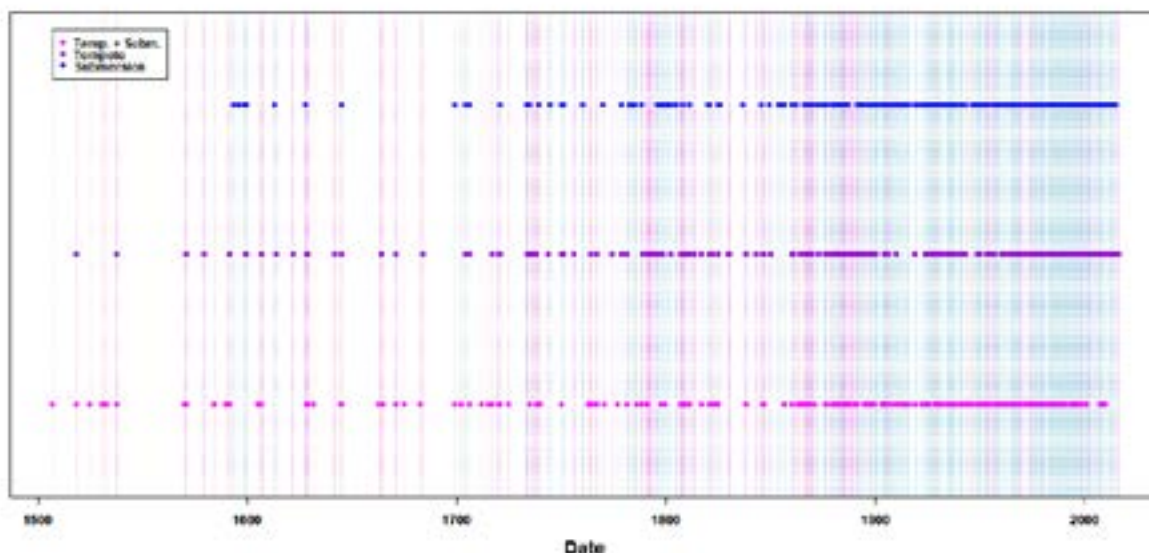
La reconstruction des mesures historiques à partir de données quantitatives est soumise à des incertitudes d'origines diverses : équipements utilisés pour effectuer la mesure (échelle de marée, marégraphe à flotteur/radar), erreurs induites par l'opérateur ou lors de la numérisation, référencement au zéro du marégraphe ou problèmes liés à l'observatoire comme par exemple lors d'un envasement du puits de tranquillisation. Toutes ces incertitudes sont considérées comme indépendantes les unes des autres. Néanmoins, il est encore difficile de quantifier l'incertitude associée à ces mesures.

L'estimation de niveau d'eau ponctuel à partir de sources écrites historiques nécessite tout d'abord une analyse critique historique visant à établir leur fiabilité (Athimon *et al.*, 2022). Le croisement avec des documents complémentaires permet par exemple de préciser un événement de submersion marine, sa localisation et/ou l'infrastructure côtière touchée. Ces données historiques ponctuelles sont généralement associées à des incertitudes, qui peuvent être combinées ou non en fonction des données disponibles. Ces incertitudes concernent, en particulier, l'unité de mesure utilisée dans le document ou le zéro de référence de l'époque. Des incertitudes peuvent également exister lorsque le niveau d'eau est estimé à une période antérieure ou postérieure à l'événement, ou à une localisation qui n'est pas la localisation exacte touchée. Un niveau d'eau minimal peut parfois être estimé, lorsque les documents indiquent seulement un niveau de dépassement.

EXTRAITS DE LA BASE DE DONNÉES « TEMPÊTES ET SUBMERSIONS HISTORIQUES »

En 2016, l'IRSN a initié le développement d'une base de données « Tempêtes et Submersions Historiques » (BD TSH ; Giloy *et al.*, 2018) accessible sous <https://bddtsh.irsn.fr/>. Elle contient actuellement plus de 800 événements météo-marins recensés sur le littoral français (côte Atlantique et Manche), mais également sur les littoraux de pays frontaliers, tirés de 1500 documents. Le premier événement date du début du XVI^e siècle. Issues d'archives, de la presse locale et régionale, d'ouvrages spécifiques, mais également de travaux de thèses, de rapports techniques ou d'études, ces informations permettent d'apporter divers renseignements sur un événement.

Chronologie des événements recensés dans la BD TSH. « Tempête » :
événement pour lequel aucune source disponible ne fait mention d'inondation, mais qui est susceptible d'avoir causé une submersion. « Submersion » : événement pour lequel une mention d'inondation / franchissement existe dans la source. « Temp. + Subm. » : événement pour lequel une mention d'inondation / franchissement et de fort vent est présente dans la source.



Les informations disponibles pour la reconstruction de niveaux marins varient d'un document à l'autre. Elles peuvent être très détaillées avec une description précise de l'événement, permettant facilement de quantifier un niveau d'eau, ou inversement trop peu renseignées pour l'estimer. Cependant, les sources ne contenant que peu d'informations sur un événement peuvent servir comme point d'entrée pour une recherche de documents plus spécifiques.

Exemple de données non quantifiables	Exemple de données potentiellement quantifiables	Exemple de données quantifiables
« Au mois d'août de ladite année, le jour de Saint Laurent, la mer se déborda aux costes de cette ville qui couvrit une perte incroyable gisant toutes les vignes et champs » Barbot, A. Histoire de La Rochelle, in Archives historiques de la Saintonge et de l'Aunis, Tome IV. 1880, p. 484, 485, numérisé [en ligne sur Gallica.fr]	« Flessingue. Nous avons essayé ici, dans la nuit du 14 au 15, une tempête telle qu'on ne se souvient pas d'avoir essayé de plus terrible. Elle s'est étendue depuis Dunkerque jusqu'à l'extrémité de la Hollande. Toute la Zélande, et particulièrement l'île de Walchern, ont été inondées d'une manière affreuse. En moins de deux heures, outre ville ne présentait plus que l'image d'un vaste lac. La mer s'y est élevée de 15, 20 et 25 pieds. Les réverbères étoient sous l'eau. ... » Journal politique de Middelbourg, 30 janvier 1808. Base de données Stadsarchief Middelburg, 4. Epub. par: 14 1008 1/16 https://readers.digitale.stadsarchief.nl/overzicht/afbeelding/56530002498.html	« Les circonstances qui ont amené les dégâts du 29 9bre peuvent être qualifiées d'exceptionnelles puisque la marée a atteint (7m36) alors qu'elle aurait dû être normalement de (5m50) et que le niveau maximum des hautes mers V.E. d'équinoxe (jamais vu de mémoire d'homme) n'est que de (7-15)... » ADOM Dunkerque 41.874

Au sein du Groupe de Travail sur les tempêtes et submersions historiques, une démarche d'évaluation de la fiabilité des données historiques a été développée (Athimon et al., 2022) ainsi qu'une méthodologie de reconstruction de niveau marin à partir de sources historiques (Giloy et al., 2019).

A5.2 - MÉTHODES DE PRISE EN COMPTE DES DONNÉES HISTORIQUES

Plusieurs méthodes statistiques permettent de combiner des informations historiques ou régionales avec les séries temporelles marégraphiques récentes (séries systématiques), pour relativiser les horsains et réduire les incertitudes statistiques notamment pour de grandes périodes de retour (au-delà de niveaux centennaux). Ces méthodes permettent d'intégrer de l'information historique, partielle ou non, avec ses propres incertitudes (matérialisées par exemple sous la forme d'une borne inférieure, supérieure, ou d'intervalle). Elles peuvent ainsi tenir compte de différentes situations ou niveaux de connaissance associés aux données historiques :

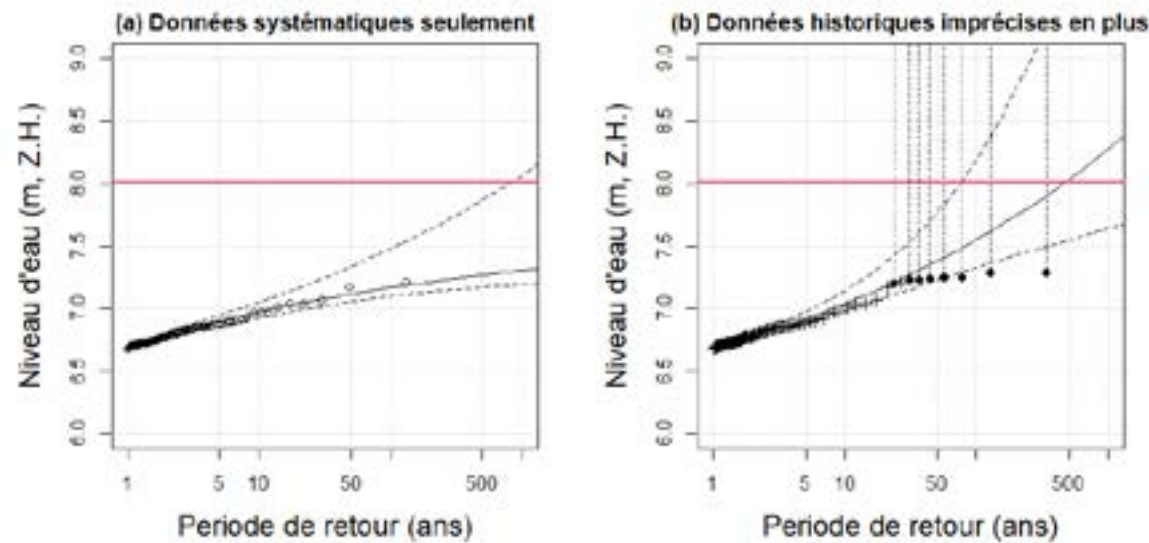
- cas 0 : seules les données systématiques sont connues ;
- cas 1 : les données systématiques et le nombre d'événements (niveaux d'eau ou surcotes) ayant dépassé un seuil (dit de « perception ») sur la période historique sont connus ;
- cas 2 : les données systématiques et les niveaux d'eau (ou surcotes) ayant dépassé le seuil sont connus ;
- cas 3 : Cas 2, mais la connaissance sur les données historiques est imprécise, par exemple avec une erreur ou seule la valeur minimale atteinte est connue, etc.

Des approches dites fréquentistes peuvent être mises en œuvre pour tenir compte des informations historiques (e.g. Hamdi et al., 2015 ; Hamdi et al., 2018a). Par ailleurs, l'approche Bayésienne est un cadre flexible pour traiter les incertitudes liées aux modèles statistiques qui permet de dériver les périodes de retour (e.g. loi de Pareto généralisée). Elle consiste à explorer de façon complète la distribution de probabilité des paramètres du modèle statistique en se basant sur la vraisemblance des observations⁽⁷⁾. Sa définition s'adapte au niveau de connaissance associé aux données historiques. Sur cette base, l'utilisation d'algorithmes d'échantillonnage aléatoire permet de générer de façon efficace un grand nombre de valeurs de paramètres du modèle statistique, ce qui permet d'associer des intervalles de crédibilité (à un niveau donné, e.g. 95%) au calcul des niveaux de retour. Des applications ont notamment été faites en contexte maritime, soit sur les niveaux d'eau (Bulteau et al., 2015, cf. illustration 113), soit en combinant des surcotes systématiques avec des niveaux d'eau historiques (Saint Cricq et al., 2022), cf. illustration 114), dans les deux cas avec le souci d'intégrer des informations historiques les plus exhaustives possibles.

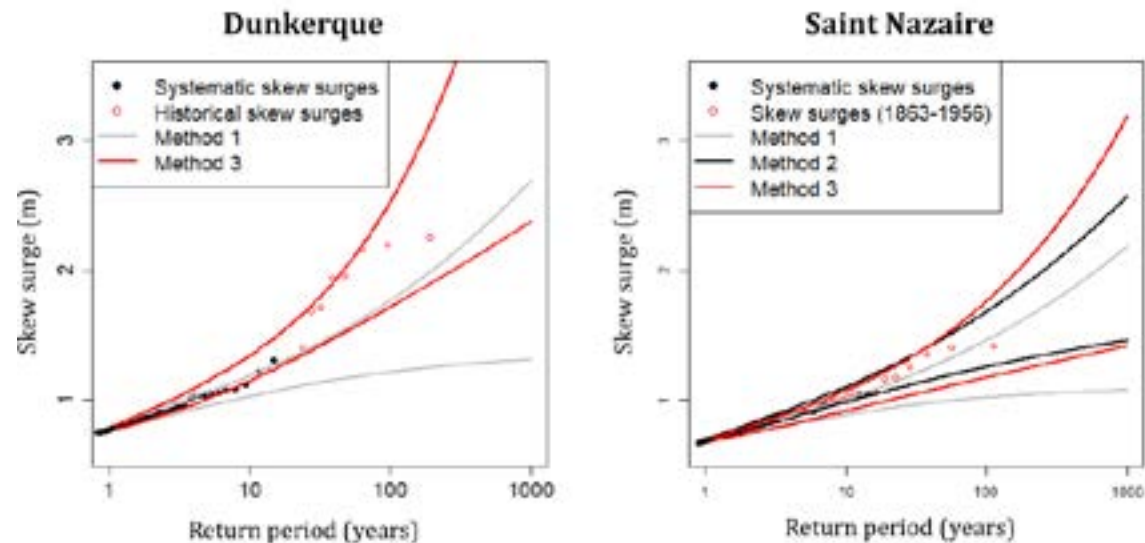
⁽⁷⁾ La probabilité d'observer les données connaissant les paramètres du modèle statistique sélectionné.

Les méthodes statistiques intégrant de l'information historique peuvent également être enrichies avec des informations régionales, qu'elles soient issues de données systématiques ou historiques à des sites voisins. En regroupant les données de nombreux sites marégraphiques, les approches régionales permettent d'obtenir une durée d'observation de tempêtes de plusieurs siècles par région étudiée. Cette durée d'observation est très nettement supérieure à ce que l'on obtiendrait par une analyse locale. À noter que le regroupement des surcotes issues de divers marégraphes ne se fait que si les données sont considérées comme homogènes, c'est-à-dire considérées comme issues de même processus physique et même processus aléatoire. Plusieurs tests statistiques et critères physiques sont utilisés pour vérifier l'homogénéité physique et statistique des données qui sont regroupées.

Période de retour des niveaux d'eau totaux à La Rochelle - La Pallice en utilisant une méthode Bayésienne (adapté de Bulteau et al. 2015). Ligne noire : la prédiction, ligne pointillée : intervalle de crédibilité à 95%.
(a) Analyse sans information historique en utilisant seulement les données systématiques jusqu'à fin 2009 (ronds noirs) ;
(b) Analyse avec en plus une information historique sur les minima des niveaux d'eau atteints (pointillés verticaux).
La ligne rouge horizontale donne le niveau atteint par Xynthia en 2010.

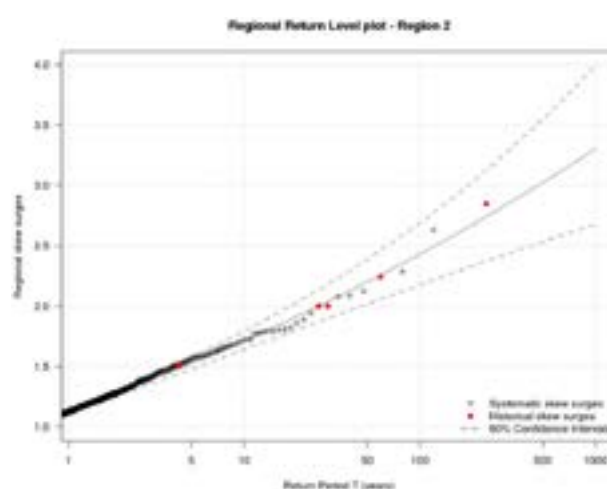


Extrait de Saint Ciriq et al. (2022). Intervalle de crédibilité (90%) des surcotes de pleine mer, calculé selon une approche bayésienne combinant les surcotes systématiques et les niveaux d'eau historiques (méthode 3 en rouge). Comparaison avec le cas où toutes les surcotes systématiques et historiques sont connues (méthode 2 en noir, « cas idéal ») et avec le cas où seules les surcotes systématiques sont connues (méthode 1 en gris).



Différentes approches existent pour définir les régions, par exemple basées sur l'identification des empreintes typiques de tempêtes (Weiss, 2014). L'analyse régionale FAB proposée par Frau (2018) repose notamment sur ce type de régions et permet aussi d'inclure des surcotes historiques. La prise en compte d'informations historiques est réalisée en ajoutant très peu de durée d'observation supplémentaire, en considérant l'absence de tendance en fréquence et intensité des tempêtes (voir par exemple IPCC (2021) section : « 11.7.2.1 Observed Trends »). Dans la pratique, les calculs sont réalisés comme si ces événements rares historiques pouvaient arriver plus souvent que dans la réalité, ce qui est conservatif, mais se justifie en regard du contexte d'application en sûreté nucléaire. La méthode garantit par ailleurs, à l'aide de critères de sélection de seuils d'ajustement statistique, l'absence de horsain dans l'échantillon régional. Pour donner un exemple de régions et d'ajustement régional, l'illustration 115 issue de (Frau, 2018) indiquent, à gauche 5 régions homogènes et à droite un ajustement régional réalisé en prenant en compte les surcotes historiques.

Extrait de Frau (2018) avec à gauche 5 régions homogènes et à droite l'ajustement régional sur les surcotes normalisées de la région 2 avec les intervalles de confiance à 90 %. Pour cette région, la durée d'observation est d'environ 239 ans et les données historiques (en rouge) sont prises en compte.



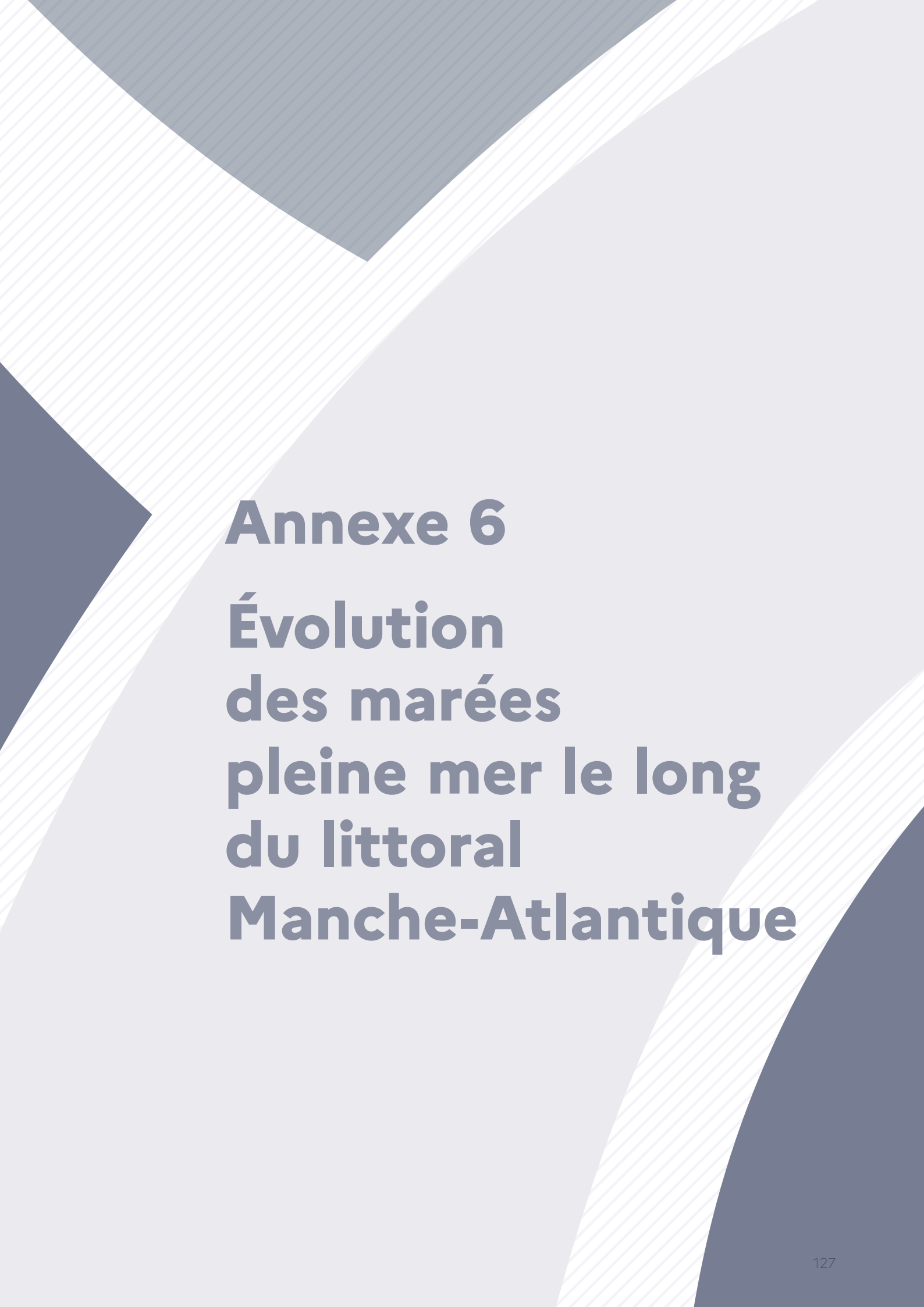
Afin de donner davantage de poids à un site d'intérêt et pour éviter des effets de frontière régionale, il est également possible de définir des régions « centrées » autour de ce site, en retenant l'ensemble des stations soumises aux mêmes phénomènes que le site d'intérêt. Avec ce type d'approche, Hamdi et al. (2018b) enrichit la série systématique du site d'intérêt avec des données systématiques régionales qui améliorent le corps de la distribution statistique, et avec des données historiques locales et/ou régionales qui améliorent la queue de la distribution. À noter que l'approche mise en œuvre ne quantifie actuellement pas les incertitudes liées à la reconstruction de données au site d'intérêt.

Ainsi, bien que des limites intrinsèques à chaque méthode existent et que l'exhaustivité des données historiques (dont l'intensité est connue ou non) soit un point d'attention majeur, différentes méthodes statistiques combinant informations historiques et régionales permettent d'améliorer les estimations des niveaux d'eau et surcotes extrêmes, notamment pour de très grandes périodes de retour.

A5.3- RÉFÉRENCES

- Athimon, E., Giloy, N., Sauzeau, T., Andreevsky, M., & Frau, R. (2022). *Quantification of Historical Skew Surges: Challenges and Methods*. In *Advances in Hydroinformatics*, 159-174, Springer, Singapore.
- IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* (AR6)
- Bulteau, T., Idier, D., Lambert, J., & Garcin, M. (2015). *How historical information can improve estimation and prediction of extreme coastal water levels: application to the Xynthia event at La Rochelle (France)*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(6), 1135-1147.
- Frau, R. (2018). *Utilisation des données historiques dans l'analyse régionale des aléas maritimes extrêmes : la méthode FAB*. Thèse Université Paris-Est.
- Giloy, N., Duluc, C. M., Frau, R., Ferret, Y., Bulteau, T., Mazas, F., & Sauzeau, T. (2018, May). *La base de données TEMPETES: un support pour une expertise collégiale et interdisciplinaire des informations historiques de tempêtes et de submersions*. In *XV^{es} Journées Nationales Génie Côtier–Génie Civil*.
- Giloy, N., Hamdi, Y., Bardet, L., Garnier, E., & Duluc, C. M. (2019). *Quantifying historic skew surges: an example for the Dunkirk Area, France*. *Natural Hazards*, 98(3), 869-893.
- Hamdi, Y., Bardet, L., Duluc, C.-M. & Rebour, V. (2015). *Use of historical information in extreme-surge frequency estimation: the case of marine flooding on the La Rochelle site in France*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15, 1515–1531.
- Hamdi, Y., Garnier, E., Giloy, N., Duluc, C.-M., & Rebour, V. (2018a). *Analysis of the risk associated with coastal flooding hazards: a new historical extreme storm surges dataset for Dunkirk, France*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 3383–3402.
- Hamdi, Y., Duluc, C.-M., Bardet, L., & Rebour, V. (2018b). *Development of a target-site-based regional frequency model using historical information*. *Natural Hazards*, 98, 895–913.
- Saint Crique, L., Gaume, E., Hamdi, Y., Ouada, Taha B. M. J. (2022). *Extreme Sea Level Estimation Combining Systematic Observed Skew Surges and Historical Record Sea Levels*. *Water Resources Research*, 58(3).
- Weiss J. (2014). *Analyse régionale des aléas maritimes extrêmes*. Thèse Université Paris-Est.





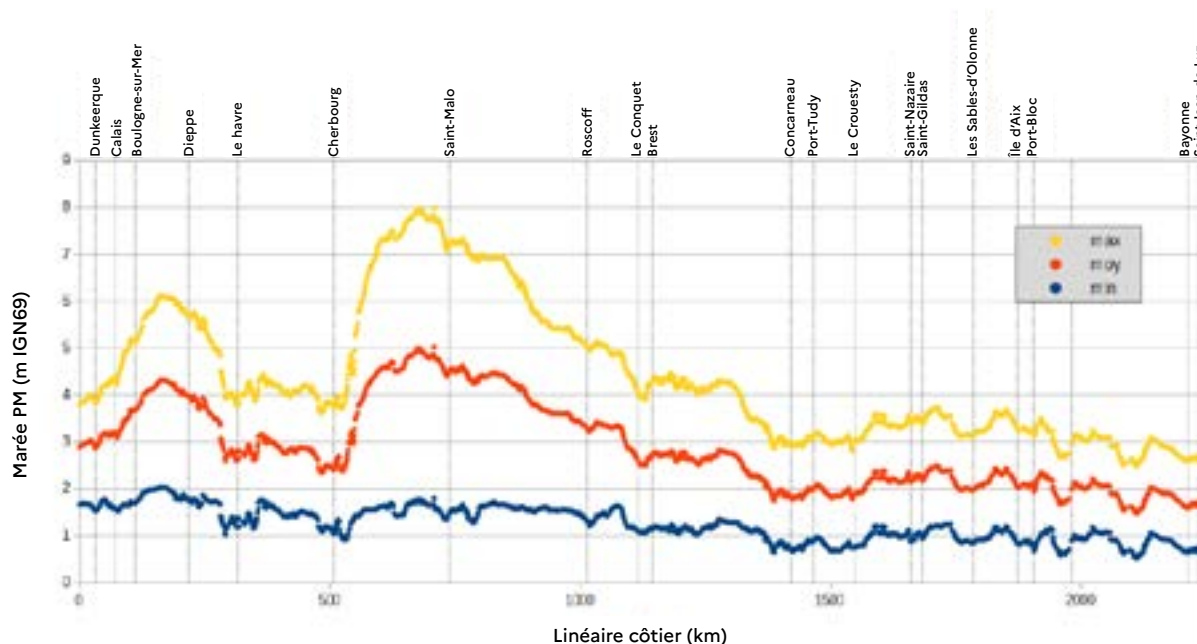
Annexe 6

Évolution des marées pleine mer le long du littoral Manche-Atlantique

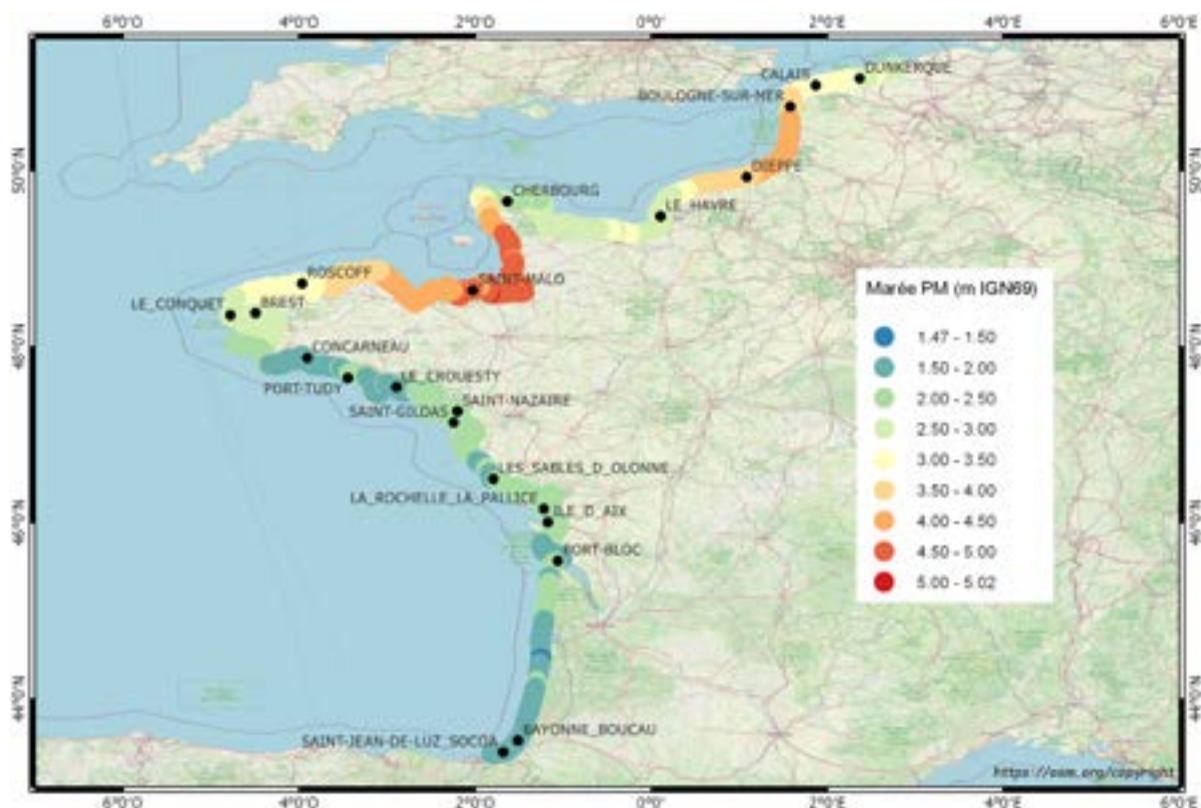
ÉVOLUTION DES MARÉES PLEINE MER LE LONG DU LITTORAL MANCHE-ATLANTIQUE

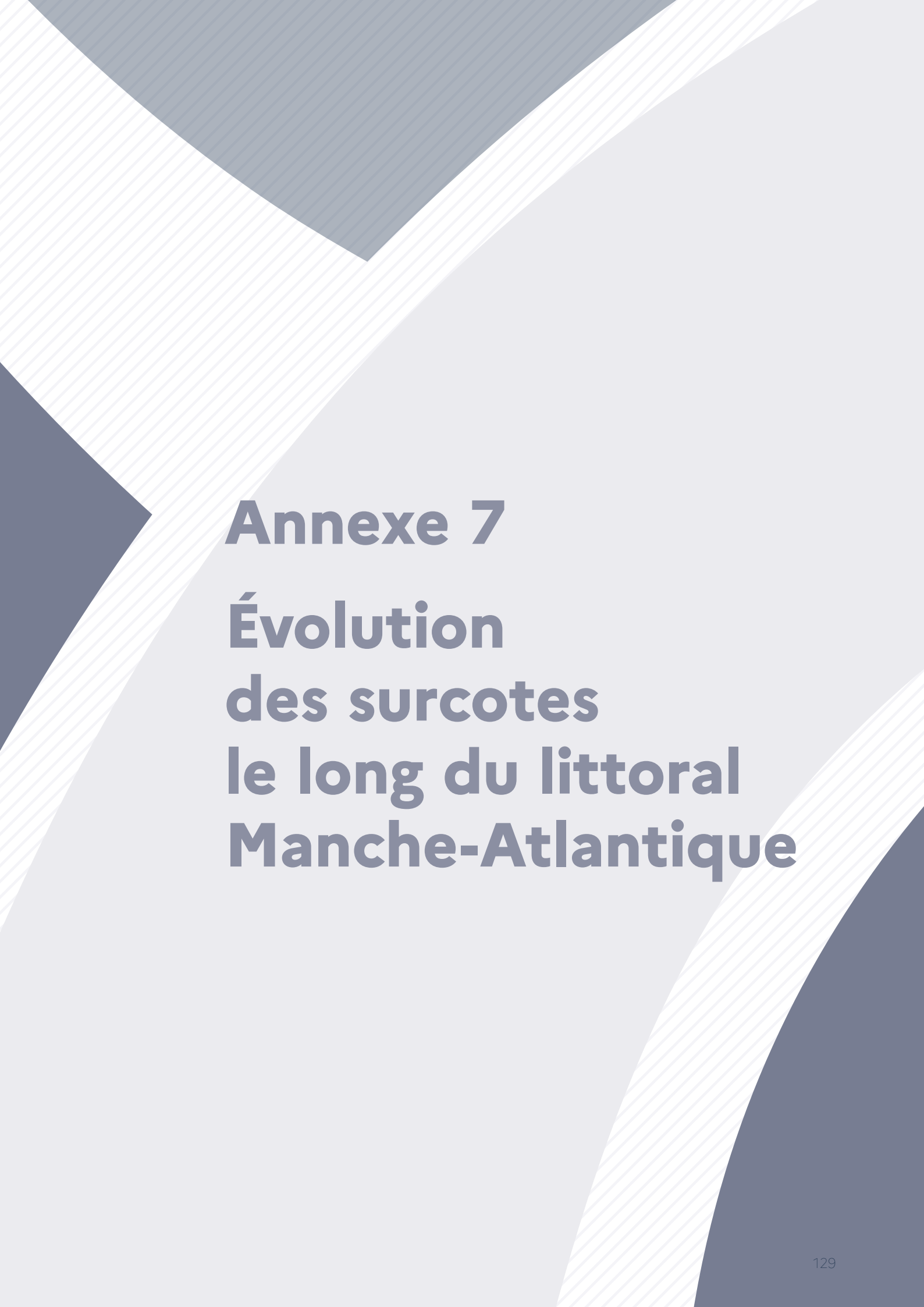
Source des données : prédictions fournies par le Shom sur 18 ans (Saros).

Manche-Atlantique – Marée PM le long du littoral (représentation 2D)



Manche-Atlantique – Moyenne des marées PM le long du littoral (représentation cartographique)





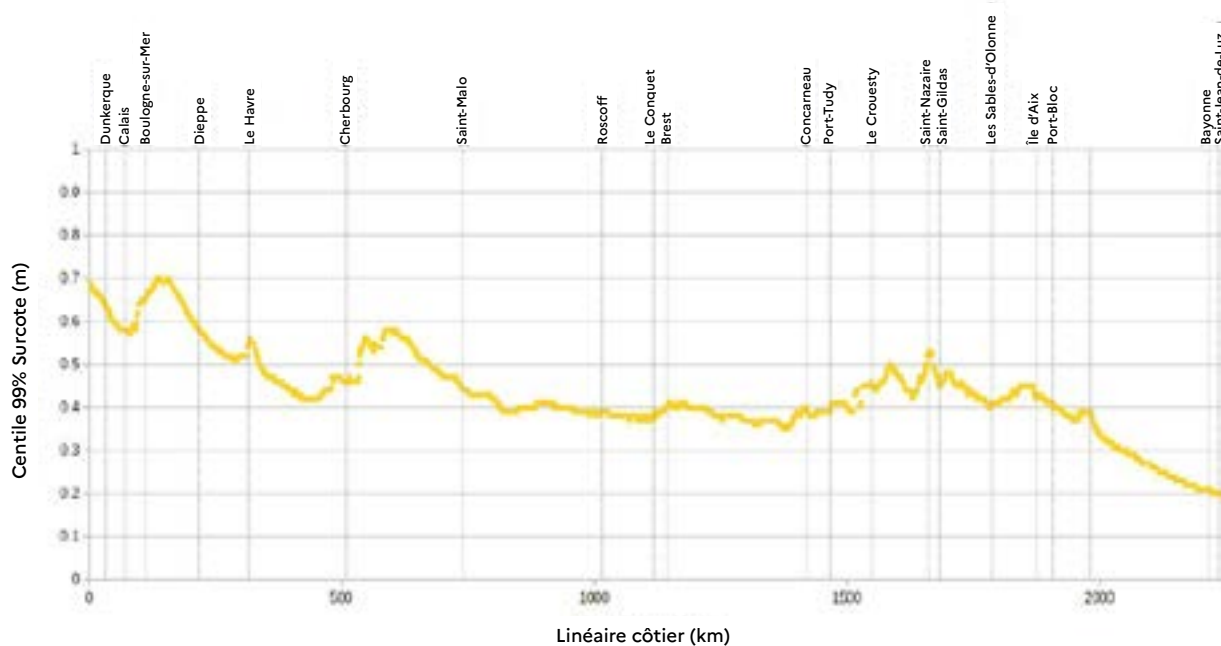
Annexe 7

Évolution des surcotes le long du littoral Manche-Atlantique

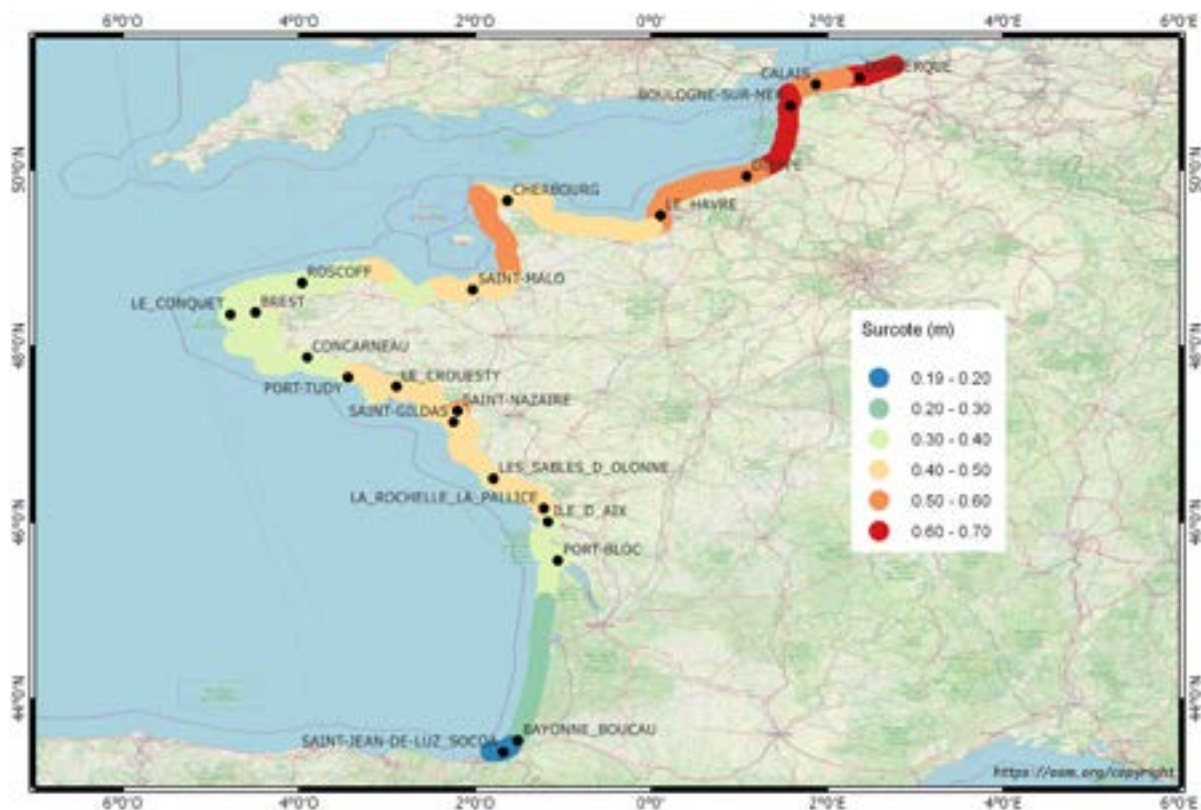
ÉVOLUTION DES SURCOTES LE LONG DU LITTORAL MANCHE-ATLANTIQUE

Source des données : simulation des surcotes du 01/07/2010 au 30/07/2014 (projet HOMONIM).

Manche-Atlantique – Centile 99 % des surcotes horaires le long du littoral (représentation 2D)



Manche-Atlantique – Centile 99 % des surcotes horaires le long du littoral (représentation cartographique)



Annexe 8

Évolution des surcotes le long du littoral méditerranéen

ÉVOLUTION DES SURCOTES LE LONG DU LITTORAL MÉDITERRANÉEN

Les variations du profil de surcote (centile 99 % des surcotes horaires du projet HOMONIM) étant faibles sur le littoral vu les intervalles de confiance, il est choisi ici de garder ces données pour discuter de la validité du résultat.

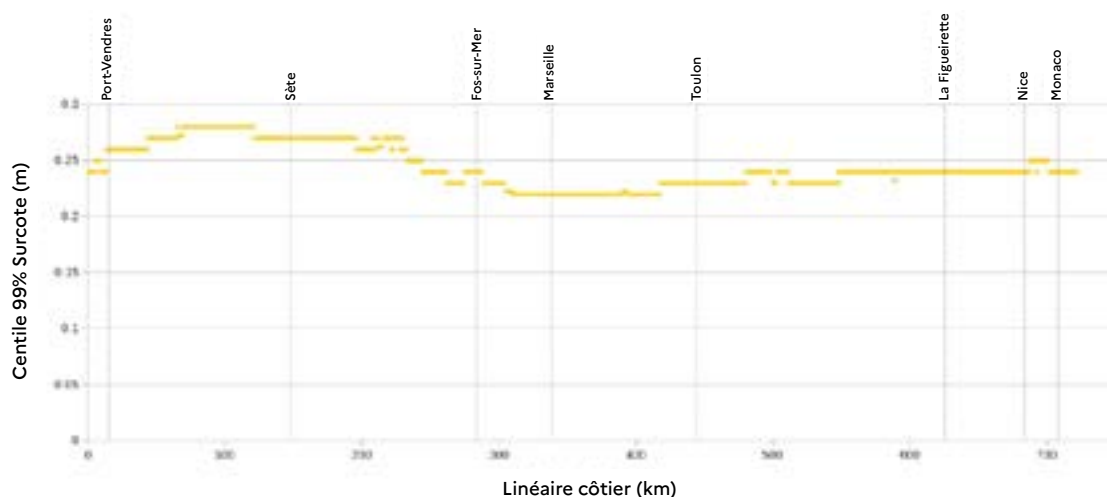
L'interpolation entre les ports de référence est linéaire (elle ne dépend donc que de la distance aux ports de référence). L'analyse du profil de surcotes peut donc renseigner sur d'éventuelles limites de la méthode (amplification ou atténuation des surcotes non prises en compte).

Le profil de surcote est présenté sur l'illustration ci-après.

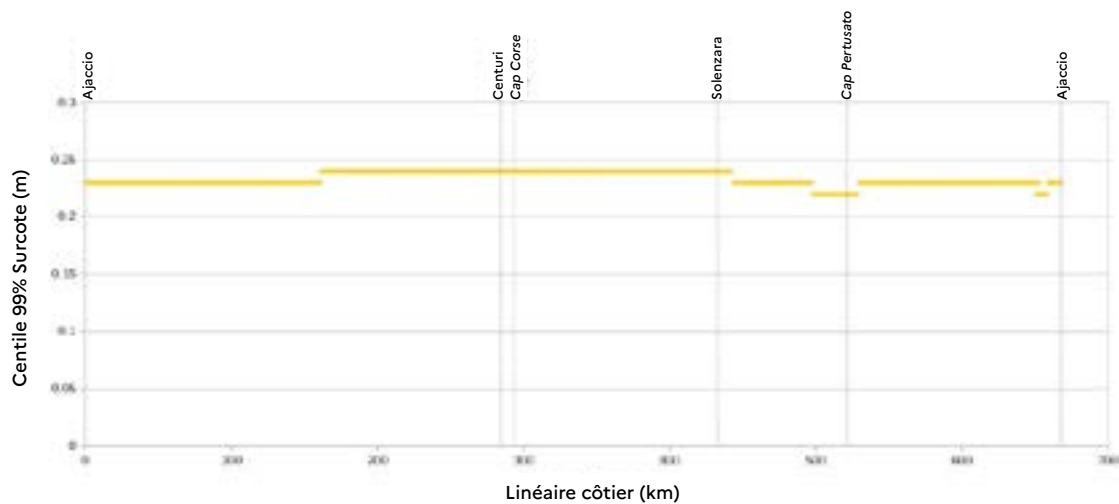
L'analyse du profil de surcotes montre que les variations sont relativement linéaires entre les ports, ce qui va dans le sens de l'interpolation linéaire mise en œuvre ici. Seules exceptions :

- une légère hausse des surcotes entre Port-Vendres et Sète et entre Nice et Monaco (donc légère sous-estimation des niveaux par la méthode) ;
- une légère baisse des surcotes au niveau du Cap de Pertusato (donc légère surestimation des niveaux par la méthode).

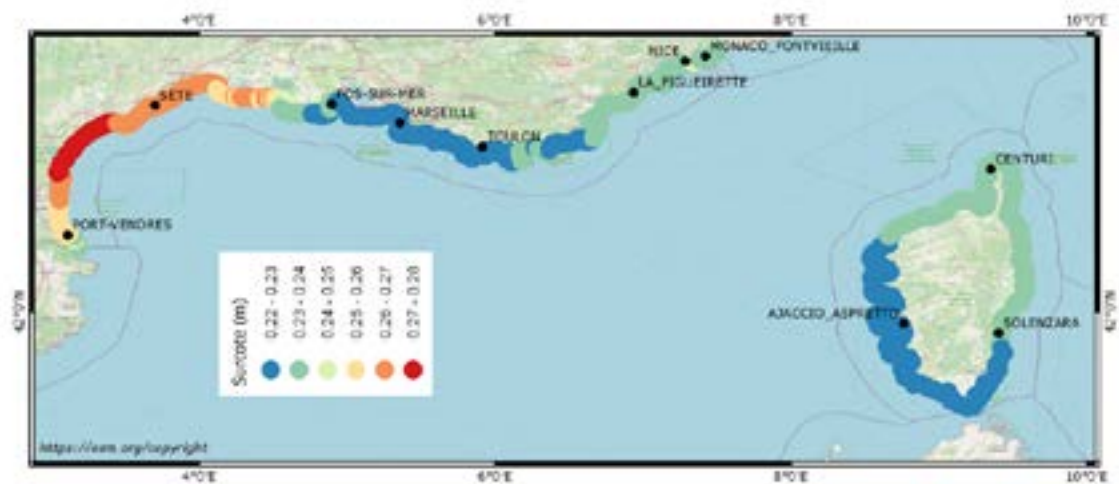
Méditerranée (continent) – Centile 99 % des surcotes horaires le long du littoral (représentation 2D)



Méditerranée (Corse) – Centile 99 % des surcotes horaires le long du littoral (représentation 2D)



Méditerranée – Centile 99 % des surcotes horaires le long du littoral (représentation cartographique)





© AdobeStock - Sherwoodd

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

André G., Bellafont F., Leckler F., Morichon D. (2021), *Predicting seiche hazard for coastal harbours along the northern and western coasts of France*, Natural Hazards, <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04509-y>.

Andreevsky M., Hamdi Y., Samuel Griolet S., Bernardara P. (2020), *Regional frequency analysis of extreme storm surges using the extremogram approach*, Natural Hazards and Earth System Sciences 20(6): 1705-1717, DOI:10.5194/nhess-20-1705-2020.

Bertin X., K. Li, A. Roland et R. Bidlot (2015), *The contributions of short-waves in storm surges: two case studies in the Bay of Biscay*, Continental Shelf Research 96, p.1-15.

CETE Méditerranée (2010), *Traitement des séries marégraphiques du Golfe du Lion – Partie homogénéisation – Recalage temporel*, Étude DREAL Languedoc-Roussillon.

Cetmef (2013), *Analyse des surcotes extrêmes le long des côtes métropolitaines*, édition Cetmef.

Cerema (2018), *Les niveaux marins extrêmes – Ports de métropole*, édition Cerema.

Cerema et Shom (2022), *Estimation des valeurs extrêmes de niveau d'eau : Littoral métropolitain*, édition Cerema.

Coles S. G (2001), *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*, Édition London: Springer-Verlag.

DGEC (2015) *Le climat de la France au XXI^e siècle - volume 5 : changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises*, Édition MEDDTL/ONERC.

Giloy N., Hamdi Y., Bardet L., Garnier E. (2019), *Quantifying historic skew surges: an example for the Dunkirk Area, France*, Springer, Natural Hazards 98(10), DOI:10.1007/s11069-018-3527-1.

Jourdan D., Paradis D., Biscara L., Casitas S. (2016), *Projet HOMONIM - Une contribution à l'amélioration des submersions marines sur l'outre-mer*. Journées Scientifiques LEFE/GMMC 2016, Toulon.

Kergadallan X. (2015), *Estimation des niveaux marins extrêmes avec et sans l'action des vagues le long du littoral métropolitain*. Thèse de doctorat, Université de Paris-Est.

ONERC (2015), *Le littoral dans le contexte du changement climatique*, Rapport au Premier ministre et au Parlement, La documentation Française.

Pasquet A., Gouillon F., Baraille R., Corréard S., Jourdan D. (2013), *HOMONIM - Phase I, Modélisation de la marée et de la surcote avec HYCOM(2D), Domaine Golfe de Gascogne, Manche, Mer du Nord (ATL)*, Rapport SHOM, projet HOMONIM, Phase ATL.

Pasquet A., Baraille R., Jourdan D. (2015), *HOMONIM - Phase I, Version V3 du système de prévision des surcotes, Configurations ATL et MED*, Rapport SHOM, modèle de surcote, version V3.

Pasquet A. (2016), *HOMONIM - Phase II, Version V4 du système de prévision des surcotes, Configuration ATL*, Rapport SHOM, modèle de surcote, version V4.

Pasquet A., Michaud H., Léo S., Baraille R., Biscara L. (2021), *Improving storm surge and wave forecasts from regional to nearshore scales*, 9th EuroGOOS International conference, Shom; Ifremer; EuroGOOS AISBL, Brest, France, pp.162-168. hal-03328367v2.

REFMAR Réseaux marégraphiques français, Marégraphe RONIM : <http://dx.doi.org/10.17183/REFMAR#RONIM>, Marégraphes partenaires : <http://dx.doi.org/10.17183/REFMAR#PARTENAIRES>

Shom-Cetmef (2012), *Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique)*, édition Shom.

Shom (2020), *Références Altimétriques Maritimes, Ports de France métropolitaine et d'outre-mer, Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée*, édition Shom.

RÉFÉRENCES CEREMA EN LIEN AVEC LA THÉMATIQUE

LES OUVRAGES

Cerema, *Recensement des événements météorologiques et dommages associés sur les côtes*, Bron : Cerema, 2022

Cerema, *Caractérisation de systèmes d'endiguement à l'heure de la GEMAPI*, Bron : Cerema, 2021

Cerema, *Changement climatique - Adapter les territoires littoraux*, Bron : Cerema, 2021

Cerema, *Littoral - Intégrer l'évolution du trait de côte à son projet de territoire*, Bron : Cerema, 2019

Cerema, *Submersions marines - Plan communal de sauvegarde*, Bron : Cerema, 2018

Cerema, *Aléas littoraux - Redéfinir sa stratégie de protection*, Bron : Cerema, 2018

Cerema, *Submersions marines - Mieux les comprendre pour s'en protéger*, Bron : Cerema, 2017

Cerema, *Connaissance du trait de côte - Évaluation prospective des enjeux affectés par le recul du trait de côte*, Bron : Cerema, 2019

Cerema, *Guide international sur les digues 2019 - The International Levee Handbook (2013) : version française (2019)*, Bron : Cerema, 2019

Cerema, *Estimation du wave set-up - Formules empiriques et analytiques*, Bron : Cerema, 2018

Cerema, *Études hydrauliques maritimes – Guide à destination des maîtres d'ouvrage*, Bron : Cerema, 2018

Cerema, *Étude des systèmes de protection contre les submersions marines*, Bron : Cerema, 2016

Cerema, *Dynamiques et évolutions du littoral – Fascicule 1 : de la frontière belge à la pointe du Hourdel - Synthèse des connaissances et Atlas*, Bron : Cerema, 2018.

Cerema, *Dynamiques et évolutions du littoral – Fascicule 2 : de la pointe du Hourdel au cap d'Antifer - Synthèse des connaissances et Atlas*, Bron : Cerema, 2023.

Cerema, *Dynamiques et évolutions du littoral – Fascicule 3 : du cap d'Antifer au cap de la Hague - Synthèse des connaissances et Atlas*, Bron : Cerema, 2019.

Cerema, *Dynamiques et évolutions du littoral – Fascicule 4 : du cap de la Hague à la pointe de Corsen - Synthèse des connaissances et Atlas*, Bron : Cerema, 2021.

Cerema, *Dynamiques et évolutions du littoral – Fascicule 5 : de la pointe de Corsen à la pointe de Chémoulin - Synthèse des connaissances et Atlas*, Bron : Cerema, 2021.

Cerema, *Dynamiques et évolutions du littoral – Fascicule 6 : de la pointe de Chémoulin à la pointe de Suzac - Synthèse des connaissances et Atlas*, Bron : Cerema, 2019.

Cerema, *Dynamiques et évolutions du littoral – Fascicule 7 : de la pointe de Suzac à la frontière espagnole - Synthèse des connaissances et Atlas*, Bron : Cerema, 2020.

Cerema, *Dynamiques et évolutions du littoral – Fascicule 8 : de la frontière espagnole à Port-de-Bouc - Synthèse des connaissances et Atlas*, Bron : Cerema, 2020.

Cerema, *Dynamiques et évolutions du littoral – Fascicule 9 : de Port-de-Bouc à la frontière italienne - Synthèse des connaissances et Atlas*, Bron : Cerema, 2024.

Cerema, *Dynamiques et évolutions du littoral – Fascicule 10 : la Corse - Synthèse des connaissances et Atlas*, Bron : Cerema, 2021.

Cerema, *Dynamiques et évolutions du littoral – Fascicule 11 : Saint-Pierre-et-Miquelon - Synthèse des connaissances et Atlas*, Bron : Cerema, 2020.

Cerema, *Dynamiques et évolutions du littoral – Fascicule 12 : Saint-Barthélemy et Saint-Martin - Synthèse des connaissances et Atlas*, Bron : Cerema, 2020.

Cerema, *Dynamiques et évolutions du littoral – Fascicule 13 : la Guadeloupe - Synthèse des connaissances et Atlas*, Bron : Cerema, 2020.

Cerema, *Dynamiques et évolutions du littoral – Fascicule 14 : la Martinique - Synthèse des connaissances et Atlas*, Bron : Cerema, 2020.

Cerema, *Dynamiques et évolutions du littoral – Fascicule 15 : la Guyane - Synthèse des connaissances et Atlas*, Bron : Cerema, 2021.

Cerema, *Dynamiques et évolutions du littoral – Fascicule 16 : Mayotte - Synthèse des connaissances et Atlas*, Bron : Cerema, 2019.

Cerema, *Dynamiques et évolutions du littoral – Fascicule 17 : la Réunion - Synthèse des connaissances et Atlas*, Bron : Cerema, 2020.

LES SÉRIES DE FICHES

Fiche synthétique de mesure des états de mer du réseau Candhis (2022).

Accompagner la compétence GEMAPI – Partage d'expérience des collectivités territoriales : département de la Seine-Maritime (2023), Communauté Urbaine de Dunkerque (2018), Communauté d'Agglomération du Territoire de la Côte Ouest de La Réunion (2018).

Extreme water levels on the coast of mainland France

Understanding them better to effectively characterise and anticipate the risk of marine submersion

The result of a research partnership between Cerema and the Shom, this document evaluates extreme water levels along the coast of mainland France, based on around thirty reference ports.

It is used to produce sets of marine submersion maps, which are useful for alert and warning purposes, as well as for preparing risk management.

Estimates of extreme water levels extend to a return period of 1,000 years, but the authors warn that particular care should be taken when using estimates beyond 100 years. In addition, as the method used does not take into account wave action, a more detailed analysis will require the results to be cross-checked with locally available information, in particular any elevation caused by wave breaking. The increase in the number of storms recorded on the coasts makes marine submersion a major risk and reinforces the need for knowledge, to which this work responds.

Niveles de agua extremos en el litoral de la Francia metropolitana

Comprenderlos mejor para caracterizar y anticipar mejor el riesgo de inundación por nivel del mar

Esta obra, fruto de un acuerdo de colaboración en materia de investigación entre el Cerema y el Shom, ofrece una estimación de los valores extremos del nivel del agua relativos a una treintena de puertos de referencia a lo largo del litoral de la Francia metropolitana.

Permite elaborar conjuntos de mapas de inundación por nivel del mar que resultan de utilidad a efectos de vigilancia y alerta, así como para la gestión de riesgos.

Las estimaciones de los valores extremos del nivel del agua abarcan un periodo de retorno de 1.000 años, aunque los autores advierten de que se debe ser especialmente prudente a la hora de emplear estimaciones superiores a 100 años. Además, como el método utilizado no tiene en cuenta la acción de las olas, para un análisis más detallado será necesario cotejar los resultados presentados con la información disponible localmente, en particular cualquier sobreincremento asociado al rompiente de las olas. El aumento del número de temporales registrados en las costas pone en primer plano el riesgo de inundación por nivel del mar y refuerza la necesidad de ampliar los conocimientos al respecto, una necesidad a la que esta obra responde.

© 2024 – Cerema

LE CEREMA, L'EXPERTISE PUBLIQUE POUR LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET LA COHÉSION DES TERRITOIRES

Le Cerema, Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement, est un établissement public qui apporte son concours à l'État et aux collectivités territoriales pour l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques au service de la transition écologique, de l'adaptation au changement climatique et de la cohésion des territoires. Il porte des missions de recherche & innovation et appuie le transfert d'innovations dans les territoires et auprès des acteurs privés.

Le Cerema agit dans 6 domaines d'activité : Expertise & Ingénierie territoriale, Bâtiment, Mobilités, Infrastructures de transport, Environnement & Risques, Mer & Littoral. Présent partout en métropole et dans les Outre-mer par ses 27 implantations, il développe une expertise de référence au contact de ses partenaires européens et contribue à diffuser le savoir-faire français à l'international.

Le Cerema capitalise les connaissances et savoir-faire dans ses domaines d'activité. Éditeur, il mène sa mission de centre de ressources en ingénierie par la mise à disposition de près de 3000 références à retrouver sur www.cerema.fr rubrique nos publications.

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (article L.122-4 du Code de la propriété intellectuelle). Cette reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles L.335-2 et L.335-3 du CPI.

Cet ouvrage a été imprimé sur du papier issu de forêts gérées durablement (norme PEFC) et fabriqué proprement (norme ECF). L'imprimerie Dupliprint est une installation classée pour la protection de l'environnement et respecte les directives européennes en vigueur relatives à l'utilisation d'encre végétales, le recyclage des rognures de papier, le traitement des déchets dangereux par des filières agréées et la réduction des émissions de COV.

Coordination : Direction de la Stratégie et de la Communication / Pôle éditions

Conception de la maquette graphique : Farénis

Mise en page : MAGAZINE&FILS.

Impression : Dupliprint, 733 rue Saint-Léonard - 53100 Mayenne - 02 43 11 09 00

Photo couverture : Marée haute et grosses vagues sur la Chaussée du Sillon à Saint-Malo, Bretagne, France (© AdobeStock)

Achevé d'imprimer : septembre 2024

Dépôt légal : septembre 2024

ISSN : 2276-0164

ISBN : 978-2-37180-681-8 (pdf) – 978-2-37180-680-1 (papier)

Éditions du Cerema

Cité des mobilités

25 avenue François Mitterrand CS 92803 – 69674 Bron Cedex – France

www.cerema.fr

NIVEAUX D'EAU EXTRÊMES SUR LE LITTORAL MÉTROPOLITAIN

**Mieux les connaître pour mieux caractériser
et anticiper le risque de submersion marine**

Issu d'un partenariat de recherche entre le Cerema et le Shom, le présent ouvrage estime des valeurs extrêmes de niveau d'eau le long du littoral métropolitain et en Corse, pour une trentaine de ports de référence. Il permet d'élaborer des jeux de cartes de submersions marines, utiles pour la vigilance et l'alerte, ainsi que la préparation à la gestion des risques.

Les estimations des valeurs extrêmes de niveau d'eau vont jusqu'à la période de retour de 1000 ans, mais les auteurs alertent sur la nécessité d'être particulièrement vigilant quant à l'utilisation des estimations au-dessus de 100 ans. Également, la méthode d'élaboration ne prenant pas en compte l'action des vagues, une analyse plus fine impliquera de croiser les résultats présentés avec les informations disponibles localement, en particulier l'éventuelle surélévation liée au déferlement des vagues.

L'augmentation du nombre de tempêtes constatées sur les côtes place le risque de submersion marine en première ligne et renforce le besoin de connaissances, auquel cet ouvrage répond.



EXPERTISE & INGÉNIERIE TERRITORIALE | BÂTIMENT | MOBILITÉS |
INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT | **ENVIRONNEMENT & RISQUES**
| MER & LITTORAL