



**PRÉFET
DU VAR**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Direction Départementale
des territoires et de la mer du Var

Service mer et littoral

Bureau littoral ouest

DELIMITATION DU RIVAGE DE LA MER

Commune de Sanary Sur Mer

PARCELLE AW 269



DOSSIER D'ENQUÊTE PUBLIQUE

Analyse des surcotes extrêmes le long
des côtes métropolitaines – CETMEF
Avril 2013 – Extrait marégraphe
de Toulon

D.14.1

Outils

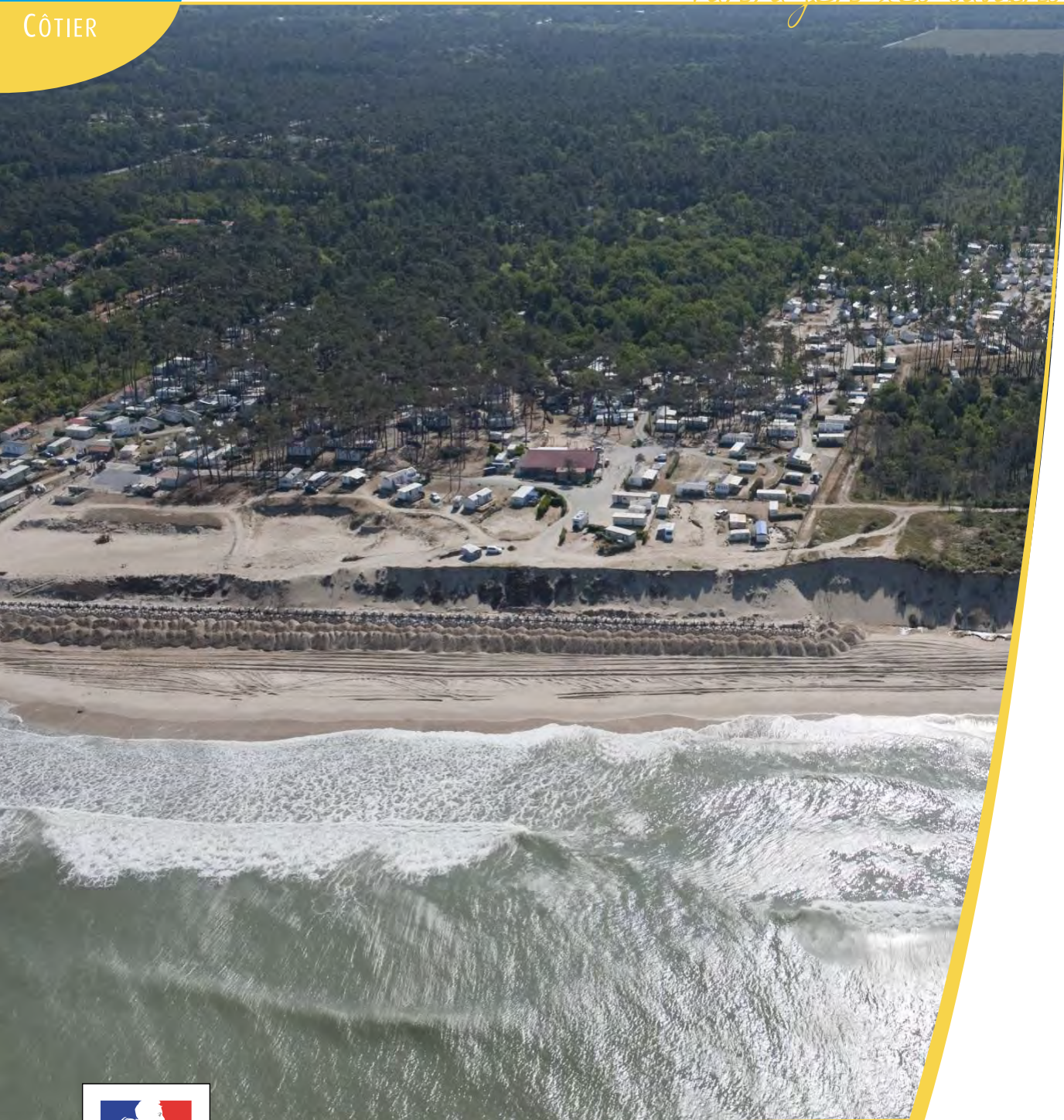
Analyse des surcotes extrêmes le long des côtes métropolitaines

CETMEF

Centre d'Etudes Techniques
Maritimes Et Fluviales

CÔTIER

Partager les savoirs



cetmef

Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie

avril 2013

www.cetmef.developpement-durable.gouv.fr

Préface

La Directive 2007/60/CE du parlement européen et du conseil relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation, dite « directive Inondation », et le code de l'environnement (articles L566. 1 et suivants et R 566.1 et suivants qui la transposent en droit français) prescrivent d'élaborer, pour trois types de scénarios (événements de forte probabilité, de probabilité moyenne et événements extrêmes), des cartes des surfaces inondables et des cartes des risques d'inondation dans les territoires à risque important d'inondation.

La cartographie – dans les scénarios d'événements extrêmes – de l'aléa inondation par submersion marine repose sur l'estimation de niveaux d'eau à la côte de faible probabilité. Il apparaît donc nécessaire de disposer d'éléments de référence pour définir ces derniers à partir de l'analyse des facteurs physiques qui en sont à l'origine (marée, surcotes, influence de la houle sur le niveau..).

À la demande de la direction générale de la prévention des risques et dans cet objectif, le CETMEF a étudié, avec la participation du CETE Méditerranée, l'estimation statistique des surcotes extrêmes en France métropolitaine. Ce guide présente les résultats obtenus dans les ports de référence métropolitains.

Le Directeur du Cetmef,

A handwritten signature in blue ink, consisting of several fluid, overlapping strokes that form a stylized representation of the name Jean-Yves Le Ven.

Jean-Yves LE VEN

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
0	19/10/12	Agrégation des contributions CETMEF et CETE Méditerranée et rédaction des parties 1, 2 et 4.
1	26/10/12	Compléments CETMEF
2	06/11/12	Compléments CETE Méditerranée
3	13/11/12	Compléments CETE Méditerranée
4	14/11/12	Compléments CETMEF
5	17/01/13	Compléments CETMEF et CETE Méditerranée suite aux remarques DGPR
6	24/01/13	Compléments suite aux remarques de la relecture interne CETMEF
7	08/04/13	Compléments suite aux remarques de la relecture interne CETMEF

Affaire suivie par

Céline PERHERIN – CETMEF – DI – IE – IAR
Tél. : 02 98 05 76 53
Courriel : Celine.Perherin@developpement-durable.gouv.fr

Xavier Kergadallan – CETMEF – DI – IE – IHS – PDH
Tél. : 02 98 05 67 22
Courriel : Xavier.Kergadallan@developpement-durable.gouv.fr

Céline TRMAL – CETE Méditerranée – DREC – SRILH
Tél. : 04 42 24 76 77
Courriel : Celine.Trmal@developpement-durable.gouv.fr

Ce document a été rédigé sous pilotage du Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales (CETMEF) par une équipe projet associant le CETMEF et le Centre d'Études Techniques de l'Équipement (CETE) Méditerranée.

Référence(s) intranet

<http://intra.cetmef.i2/>

Résumé

Ce rapport présente une analyse statistique des valeurs extrêmes de surcotes horaires sur 24 sites répartis le long du littoral métropolitain.

L'évaluation est effectuée par le biais de l'analyse des surcotes de pleine mer pour les sites à fort marnage (Manche et Atlantique) et des surcotes instantanées pour les sites à faible marnage (Méditerranée). L'analyse statistique est effectuée à partir de séries d'observations possédant plus de 10 ans de mesures. La méthode des pics au-dessus du seuil est utilisée pour ajuster la queue de distribution des surcotes. Pour chaque site, les surcotes de périodes de retour comprises entre 5 et 1000 ans sont estimées avec un intervalle de confiance à 70%. La sensibilité au choix du seuil ou du type de loi (distributions généralisée de Pareto ou exponentielle) est aussi étudiée. Un avis d'expert est fourni pour aider au choix final.

Les différences de résultats avec le produit SHOM/CETMEF de 2012 ("Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France - Manche et Atlantique") sont commentées. Les limites de la méthodologie sont présentées.

Les résultats de cette étude sont notamment utiles pour l'étude du scénario extrême auquel fait référence la directive « inondations ».

Summary

This report presents a statistical extreme value analysis of hourly surge data from 24 sites around the French coastline.

Assessment of extreme values is done using skew surge for sites with large tidal range (Channel and Atlantic) and instantaneous surge for sites with low tidal range (Mediterranean). Statistical analysis is carried out on empirical data with more than 10 years of observations. The peaks-over-threshold method is applied to estimate the upper tail of the surge heights. For each site, surge with 5 to 1000 years return levels are estimated with 70% confidence interval. Statistical sensibility due to the choice of the threshold or the type of law (generalized Pareto distribution or exponential distribution) is also studied. Expert judgment is provided to help selecting a final result.

Differences with the previous SHOM/CETMEF report about extreme sea-levels ("Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France - Manche et Atlantique", 2012) are commented. Limits of the methodology are presented.

This report may be useful for studies of extreme scenarios defined in the EU floods directive.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.....	6
1.1 Contexte	6
1.2 Objectif de l'étude.....	6
2. LA MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE STATISTIQUE DES EXTRÊMES.....	7
2.1 Principes de la méthode.....	7
2.2 Données de surcotes utilisées	7
2.3 Définition de la population des événements extrêmes observés.....	9
2.4 Ajustement et extrapolation paramétriques.....	9
2.5 Incertitudes.....	11
2.5.1 Incertitude liée à la mesure ou aux données initiales.....	11
2.5.2 Incertitude de représentativité.....	11
2.5.3 Incertitude du choix du modèle statistique.....	11
2.5.4 Incertitude d'échantillonnage.....	12
3. LES RÉSULTATS PAR PORT	13
3.1 Dunkerque.....	14
3.2 Calais.....	17
3.3 Boulogne-sur-Mer.....	20
3.4 Dieppe.....	23
3.5 Le Havre.....	26
3.6 Cherbourg.....	29
3.7 Saint-Malo.....	32
3.8 Roscoff.....	35
3.9 Le Conquet.....	38
3.10 Brest.....	41
3.11 Concarneau.....	44
3.12 Port-Tudy.....	47
3.13 Pointe Saint-Gildas.....	50
3.14 Les Sables-d'Olonne.....	53
3.15 La Rochelle-La Pallice.....	56
3.16 Port-Bloc.....	59
3.17 Socoa.....	62
3.18 Port-Vendres.....	65
3.19 Sète.....	68
3.20 Marseille.....	71
3.21 Toulon.....	74
3.22 Nice.....	77
3.23 Monaco.....	80
3.24 Ajaccio.....	83

4. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS	86
4.1 Présentation synthétique des résultats	86
4.2 Différences avec l'étude SHOM-CETMEF.....	89
4.2.1 Prise en compte des incertitudes	89
4.2.2 Durées d'observation.....	89
4.2.3 Principales différences sur les estimations.....	89
4.3 Exploitation des résultats.....	90
5. ANNEXES.....	91
5.1 Analyse de la qualité des données de surcotes.....	91
5.1.1 Les données utilisées en Manche et Atlantique.....	91
5.1.2 Les données utilisées en Méditerranée.....	91
5.1.2.1 Port-Vendres.....	92
5.1.2.2 Sète.....	94
5.1.2.3 Marseille.....	96
5.1.2.4 Toulon.....	98
5.1.2.5 Nice.....	100
5.1.2.6 Monaco.....	101
5.1.2.7 Ajaccio.....	103
5.2 Analyse des surcotes en Méditerranée pour d'autres échantillons de données	105
5.2.1 Port-Vendres.....	105
5.2.2 Sète.....	108
5.2.3 Marseille.....	111
5.2.4 Toulon.....	114
5.2.5 Monaco.....	117
5.2.6 Ajaccio.....	120
5.3 Bibliographie	123
5.4 Liste des figures et tableaux.....	124

1. Introduction

1.1 Contexte

L'estimation des niveaux marins extrêmes est utilisée dans le cadre de l'application des politiques publiques en matière de prévention des risques ou d'aménagement du littoral, notamment au travers de la caractérisation de l'aléa submersion marine.

Lors de l'analyse statistique des niveaux marins extrêmes, le niveau de marée et les surcotes sont classiquement étudiées séparément. Plusieurs méthodes peuvent ensuite être utilisées pour recomposer le niveau marin total (addition, convolution) suivant l'objectif d'application du niveau marin extrême défini et sa sensibilité aux incertitudes (prise en compte de l'aléa submersion marine dans l'aménagement du territoire, réalisation d'ouvrages côtiers...).

1.2 Objectif de l'étude

Cette étude a pour objet l'estimation des surcotes extrêmes jusqu'à une période de retour de 1000 ans pour les sites métropolitains disposant d'au moins 10 ans d'observation marégraphique. Les estimations sont établies par une méthode d'analyse statistique des extrêmes.

Le choix d'une période de retour de 1000 ans ne s'inscrit pas dans une démarche scientifique mais politique. En effet, les incertitudes associées à la méthode d'analyse statistique des extrêmes sont très importantes. Les estimations n'ont d'autre but que d'afficher un niveau de sécurité fort en matière de prévention des risques ou d'aménagement du littoral.

L'étude *Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique)* (SHOM-CET-MEF, 2012) proposait une première analyse des surcotes extrêmes sans pour autant étudier les périodes de retour supérieures à 100 ans.

L'estimation des surcotes extrêmes pour des périodes de retour proches de 1000 ans est cependant utile pour l'analyse des événements les plus rares, bien que les incertitudes soient alors très élevées. Les résultats de cette étude pourront apporter des éléments d'appréciation pour l'étude du scénario extrême auquel fait référence la directive « inondations ».

2. La méthodologie d'analyse statistique des extrêmes

2.1 Principes de la méthode

Les surcotes extrêmes sont estimées à l'aide d'une méthode d'ajustement et d'extrapolation statistiques des extrêmes.

Seules les grandes lignes de la méthode sont rappelées ici. Pour plus d'informations on pourra se référer à Coles (2001).

Les calculs ont été effectués :

- pour la Mer du Nord, la Manche et l'Atlantique : sous l'environnement R (<http://www.r-project.org/>), packages « evd » et « pot » ;
- pour la Méditerranée : sous les environnements Matlab (www.mathworks.fr) et R (<http://www.r-project.org/>), package « ismev ».

2.2 Données de surcotes utilisées

La présente étude porte sur l'analyse statistique des valeurs extrêmes de surcote météorologique. Cette dernière est appelée ici simplement « surcote ». Elle est liée aux variations de vent et de pression atmosphérique. Elle est estimée à partir des observations de niveau d'eau.

Selon le site étudié (conditions de marnage), on va utiliser une notion de surcote différente : la surcote instantanée ou la surcote de pleine mer.

La surcote instantanée est définie comme étant la différence à un instant donné entre le niveau d'eau observé sans l'action des vagues (assimilée à l'observation marégraphique en présence d'un puits de tranquillisation) et le niveau d'eau prédit (la marée) (cf. Illustration 1).

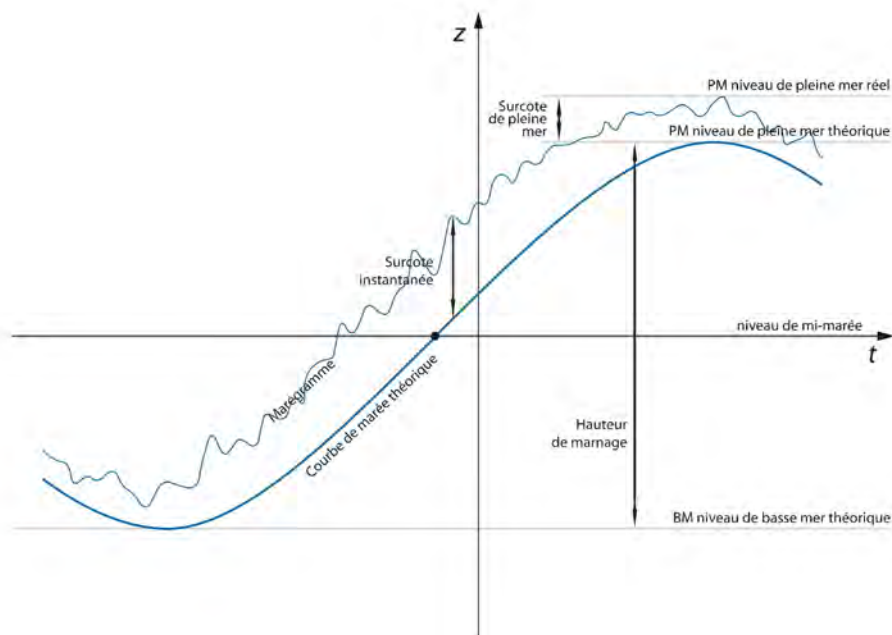


Illustration 1 : Définition de la surcote de pleine mer et de la surcote instantanée (Source : CETMEF)

Or les observations issues des marégraphes peuvent être perturbées par une dérive temporelle du signal mesuré. De plus, une incertitude est associée aux prédictions de hauteur de marée du fait de la difficulté de caractérisation de la marée. En effet certaines composantes harmoniques d'amplitudes faibles ou relativement hautes fréquences peuvent être difficiles à déterminer à partir de l'analyse des observations. Pour s'affranchir des éventuels problèmes de déphasage entre les hauteurs prédites et les hauteurs observées, on introduit la notion de surcote de pleine mer. Elle correspond à la différence entre le niveau d'eau maximum observé au voisinage de la pleine mer et le niveau de pleine mer prédit (cf. Illustration 1). Elle n'est donc pas sensible au déphasage entre les hauteurs prédites et les hauteurs observées.

Pour limiter les erreurs de calcul des surcotes, on préfère donc généralement travailler avec les surcotes de pleine mer plutôt que les surcotes instantanées. Mais cela n'a de sens que si le risque étudié (la submersion) peut être négligé en dehors des moments de pleine mer. De ce fait :

- pour les sites à fort marnage (Mer du Nord, la Manche et l'Atlantique), les surcotes de pleine mer sont utilisées ;
- pour les sites à faible marnage (Méditerranée), les surcotes instantanées sont utilisées.

Les données de niveau d'eau utilisées pour le calcul des surcotes sont les observations marégraphiques au pas horaire validées par le SHOM des ports métropolitains pour lesquels on dispose d'un minimum de 10 ans de mesure. On considère qu'avec moins de 10 ans de mesure, les incertitudes liées à la méthode d'analyse sont trop grandes pour fournir une estimation des surcotes extrêmes (Simon, 1996).

L'ensemble des ports pour lesquels plus de 10 années de mesures effectives sont disponibles ont été étudiés, à l'exception de Saint-Nazaire et Boucau-Bayonne, situés en zone estuarienne où l'hypothèse d'indépendance des surcotes et de la marée n'est plus vérifiée, et d'Arcachon où les surcotes dans le bassin ne sont pas représentatives de celles à l'extérieur du bassin.

Les prédictions de marée pour l'ensemble des ports concernés ont été établies par le SHOM.

Les surcotes ont été calculées :

- pour la Mer du Nord, la Manche et l'Atlantique : par le SHOM (surcote de pleine mer) ;
- pour la Méditerranée : par le CETE Méditerranée (surcotes instantanées).

L'annexe 5.1 donne des informations supplémentaires sur les données utilisées.

2.3 Définition de la population des événements extrêmes observés

On appelle ici les événements extrêmes les valeurs maximales de surcotes lors d'une tempête. La population des événements extrêmes est constituée à l'aide de la méthode POT (Peak Over Threshold). Le principe de la méthode POT est le suivant. Un événement tempête est défini par un pic de surcote supérieur à un seuil de sélection des événements tempête noté « S ». Un événement tempête comprend un ou plusieurs pics de tempête. On considère que deux pics de surcote appartiennent au même événement de tempête si la surcote ne passe pas en dessous d'un deuxième seuil défini par un critère de redescente (cf. Illustration 2 avec comme critère de redescente $S/2$). Seule la valeur maximale de pic pour un événement tempête est prise en compte dans le calcul.

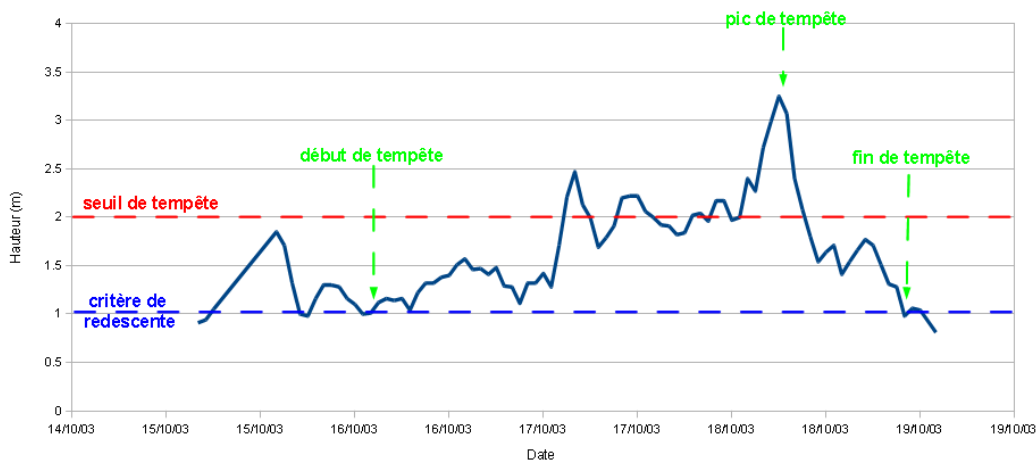


Illustration 2 : Méthode de sélection d'un pic de surcote unique par tempête

Le seuil S doit être suffisamment haut pour ne sélectionner que des tempêtes, mais suffisamment bas pour avoir assez d'événements extrêmes pour l'ajustement paramétrique (étape suivante). Plusieurs seuils S sont ici testés. Hors indication contraire, seule la plage de seuils donnant une moyenne de 2 à 8 événements par an a été prise en compte.

2.4 Ajustement et extrapolation paramétriques

Une loi de distribution paramétrique est ajustée aux événements extrêmes.

La théorie prévoit que si les événements tempêtes sont suffisamment élevés (seuil infini pour la méthode POT), les événements extrêmes suivent une loi GPD (Generalised Pareto Distribution). Cette hypothèse ne pouvant être vérifiée, il est prudent de tester d'autres lois de distribution appartenant au domaine asymptotique de la loi GPD (par exemple la loi exponentielle).

Au vu de l'ensemble des incertitudes (voir 2.5), il n'est pas forcément très utile de multiplier le nombre de lois testées. Il a été choisi ici de tester deux lois au comportement relativement complémentaire :

- la loi de distribution Généralisée de Pareto (loi GPD) ;
- la loi exponentielle.

La loi GPD est une loi à trois paramètres : le paramètre de position (assimilé au seuil S et appelé simplement « seuil » dans la suite du document), le paramètre d'échelle et le paramètre de forme. Le paramètre d'échelle joue sur les amplitudes de variations des surcotes en fonction des périodes de retour tandis que le paramètre de forme permet de dire si, pour une période de retour infinie, la surcote converge vers une valeur ou tend aussi vers l'infini. La loi exponentielle est une loi à deux paramètres : le seuil et le paramètre d'échelle. Elle correspond à une loi GPD dont le paramètre de forme est imposé (les surcotes extrêmes tendent vers l'infini). Ces paramètres sont indiqués pour les lois sélectionnées dans la suite du document.

Pour un site donné, le résultat se présente sous la forme d'un ensemble de courbes exponentielles et GPD. La qualité de l'extrapolation statistique des événements extrêmes est étudiée à partir :

- du résultat d'un test statistique : un test de Chi2 permet de contrôler la bonne adéquation entre les événements extrêmes observés et un ajustement de loi paramétrique. L'hypothèse testée (H_0) est que la série de valeurs extrêmes de surcote est issue de la loi de distribution testée. Le résultat du test, la p_value , est le risque de se tromper si on considère que l'hypothèse H_0 n'est pas vraie. La valeur maximale admissible ici pour le risque d'erreur est fixée à 10%. Si la p_value est inférieure à 10%, on a moins d'une chance sur dix de se tromper si l'on considère que la série de valeurs extrêmes de surcote n'est pas issue de la loi de distribution testée.
- la stabilité des estimations en fonction du seuil : si le seuil est assez élevé pour ne sélectionner que des événements tempêtes, les estimations de surcotes millénales et les paramètres d'échelle et de forme restent en principe stables quand on augmente le seuil, jusqu'au moment où le nombre de valeurs extrêmes observées sélectionnées par la méthode POT est trop faible pour l'ajustement ;
- le contrôle visuel de l'ajustement des lois exponentielle et GPD aux valeurs extrêmes observées : on s'attachera en particulier à vérifier que la loi paramétrique « colle » bien aux plus fortes valeurs observées (cf illustration 3).

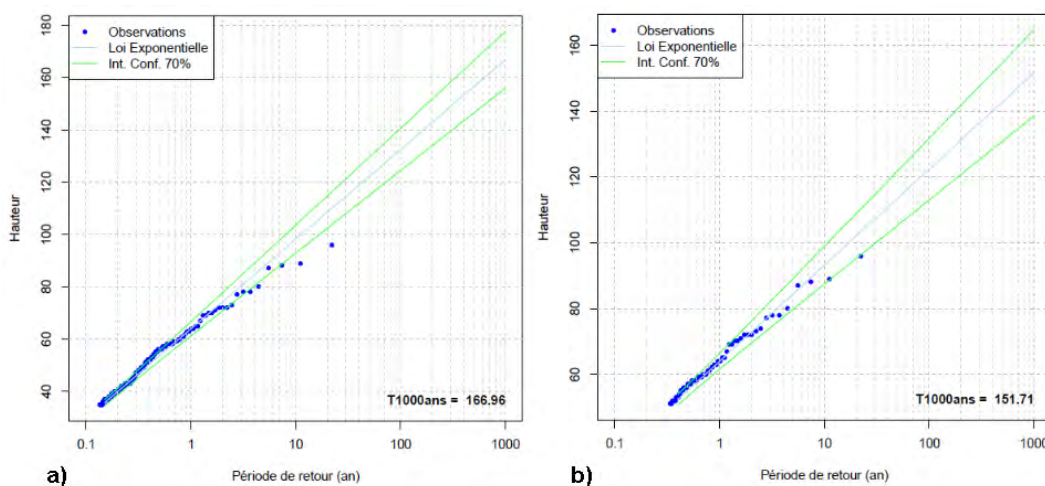


Illustration 3 : Contrôle visuel d'un ajustement de loi exponentielle : la solution b) est préférée à la solution a).

Les résultats de ces tests statistiques sont disponibles dans l'annexe numérique du rapport.

2.5 Incertitudes

2.5.1 Incertitude liée à la mesure ou aux données initiales

Une incertitude est associée aux appareils de mesure (fournie par le constructeur).

A cela, s'ajoute une incertitude liée aux conditions de mesure. Les données utilisées sont issues de la mesure in situ, il convient de garder à l'esprit que ces mesures sont réalisées en environnement hostile. Des problèmes techniques (pannes, détérioration du dispositif de mesure, ...) peuvent engendrer une perturbation des mesures.

Pour les calculs de surcotes, instantanées comme de pleine mer, il convient aussi de tenir compte de l'incertitude des prédictions de marée. Ces prédictions sont établies par le SHOM à partir du calcul des constantes harmoniques de marée. Ces dernières sont obtenues par l'analyse des observations de hauteur d'eau (observations marégraphiques) et sont régulièrement mises à jour.

L'incertitude sur la mesure est de l'ordre d'un à plusieurs centimètres. Elle est variable dans le temps selon les appareils de mesure (moins du centimètre pour les mesures les plus récentes). Les incertitudes sur les conditions de mesure et sur les prédictions de marée sont difficilement quantifiables. On considère que ces trois types d'incertitudes sont négligeables au vu de l'ensemble des incertitudes.

2.5.2 Incertitude de représentativité

Cette incertitude porte sur la représentativité de l'échantillon de données étudiées. 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. De ce fait les estimations issues des méthodes d'ajustement statistique décrites ici ne sont pas viables pour des projections dans le futur. Il convient de vérifier si le régime est non stationnaire. Le cas échéant, il est nécessaire de mettre en œuvre une méthodologie d'ajustement spécifique aux données de régime non stationnaire.

Les études actuelles ont seulement mis en évidence les variations du niveau d'eau moyen annuel liées à l'eustatisme. En l'absence d'éléments complémentaires, on ne prendra en compte que ces dernières. On pourra se référer, par exemple, au rapport de l'ONERC (ONERC, 2010).

2.5.3 Incertitude du choix du modèle statistique

Il existe plusieurs méthodes pour la définition de la population de tempêtes étudiée (maxima annuels ou de la méthode POT). De plus, il est fortement conseillé de tester plusieurs lois d'ajustement statistique (deux sont utilisées ici, mais on aurait pu en tester d'autres). Les différents choix effectués peuvent conduire à des résultats différents, plus ou moins « crédibles » au vu de leur analyse. La méthode POT nécessite aussi la sélection du seuil de tempête. 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.

Pour cette étude l'incertitude du choix du modèle statistique est présentée en chaque port sous forme graphique avec la superposition des résultats issus des deux lois (GPD et exponentielle) pour l'ensemble des seuils de sélection des événements tempête pris en compte. Hors avis contraire, seuls sont considérés les seuils permettant d'avoir une moyenne de 2 à 8 événements par an avec une p-value au test du Chi2 supérieure à 10%.

2.5.4 Incertitude d'échantillonnage

La qualité des extrapolations est tributaire de la durée des mesures. Il est en effet logique de penser que si on ne dispose que de 10 ans de mesure, une estimation millénaire est sujette à caution. Cette incertitude est appelée « incertitude d'échantillonnage ». Elle est entièrement décrite par le calcul des intervalles de confiance lors de l'ajustement statistique des extrêmes.

Les estimations présentées ci-après sont toutes accompagnées d'un intervalle de confiance à 70%. Il représente l'incertitude d'échantillonnage.

3. Les résultats par port

L'analyse des surcotes extrêmes a été réalisée pour 24 ports des côtes métropolitaines où l'on dispose de plus de 10 ans de données. 1 port en Mer du Nord, 7 sur la Manche, 9 en Atlantique et 7 en Méditerranée.

Pour chaque port sont présentés :

- l'analyse de l'ajustement statistique réalisée pour chacune des 2 lois statistiques (exponentielle et GPD).
- une comparaison des 2 lois : une des lois peut être favorisée plutôt qu'une autre à dire d'expert. Il ne s'agit cependant pas d'une recommandation qui, pour être formulée, nécessite de connaître le contexte dans lequel les estimations seront appliquées. La comparaison doit porter à la fois sur l'estimation de la surcote (valeur médiane) et l'intervalle de confiance associé. Le choix d'une loi plutôt qu'une autre doit également être réalisé en gardant en tête que les lois exponentielles sont une sous-famille des lois GPD. Les lois exponentielles bénéficient d'une hypothèse supplémentaire (les surcotes extrêmes tendent vers l'infini), qui n'est cependant pas toujours adaptée. Ainsi, le choix d'une loi exponentielle, dont l'intervalle de confiance est plus resserré, plutôt qu'une loi GPD doit souvent reposer sur l'addition d'une hypothèse supplémentaire. En l'absence de toute information supplémentaire, l'intervalle de confiance le plus grand ne peut pas être écarté. Ce n'est pas parce que l'intervalle de confiance est resserré que l'ajustement est meilleur.
- les résultats de chacune des 2 lois : le tableau des estimations des surcotes extrêmes pour les périodes de retour 5, 10, 20, 50, 100 et 1000 ans et l'ajustement graphique.
- l'ajustement graphique des surcotes extrêmes, lois d'ajustement des surcotes extrêmes, pour l'ensemble des lois d'ajustement des surcotes extrêmes prises en compte, permettant d'apprécier l'incertitude liée au choix du modèle statistique (choix du seuil) et l'incertitude d'échantillonnage.

3.20 Marseille

Longueur de l'échantillon de surcotes horaires : 13,6 années (1985-2011). Un échantillon plus court a également été étudié (cf annexe 5.2).

Les seuils permettant de retenir en moyenne 2 à 8 événements par an sont compris entre 22 et 42 cm.

Conclusion sur la loi exponentielle : Les estimations des surcotes millénales en fonction du seuil pour une moyenne de 2 à 8 événements au-dessus du seuil par an sont comprises entre 158 et 170 cm. Les estimations en fonction du seuil sont relativement stables pour des seuils 24 à 38 cm. Pour ces seuils l'ajustement est visuellement meilleur car les dernières observations sont de part et d'autres de la droite d'ajustement et à l'intérieur de l'intervalle de confiance à 70%, excepté la dernière. Un seuil de 30 cm semble mieux adapté car il représente le meilleur résultat au test du Chi2. C'est le seuil retenu avec une surcote millénales estimée à 158 cm.

Conclusion sur la loi GPD : Les estimations des surcotes millénales en fonction du seuil pour une moyenne de 2 à 8 événements au-dessus du seuil par an sont comprises entre 95 et 134 cm. Les estimations en fonction du seuil ne sont pas stables. Visuellement, des estimations avec des seuils faibles sont préférées, toutes les plus fortes observations rentrent dans l'intervalle de confiance à 70%. Un seuil de 24 cm semble mieux adapté car il représente le meilleur résultat au test du Chi2. C'est le seuil retenu avec une surcote millénales estimée à 134 cm.

Comparaison des lois : Les estimations issues des lois GPD et exponentielle sont différentes. Il n'existe pas à ce niveau de critère permettant à dire d'expert de privilégier le choix d'une loi par rapport à l'autre. Les estimations obtenues avec la loi GPD sont plus sécuritaires (borne haute de l'intervalle de confiance plus élevée), on aura tendance à favoriser cette dernière solution.

Surcote de pleine mer maximale observée : 89 cm le 28/12/1999.

Loi exponentielle – seuil 30 cm :

Période de retour Ts (ans)	5	10	20	50	100	1000
Surcote horaire (cm)	78	89	99	113	124	158
Intervalle de confiance à 70%	72 - 85	81 - 96	91 - 108	103 - 124	112 - 135	142 - 174

Loi GPD – seuil 24 cm :

Période de retour Ts (ans)	5	10	20	50	100	1000
Surcote horaire (cm)	76	85	93	104	111	134
Intervalle de confiance à 70 %	69 - 83	75 - 94	80 - 106	85 - 122	88 - 134	93 - 175

Tableau 20 : Estimations des surcotes extrêmes de Marseille selon les lois exponentielle et GPD

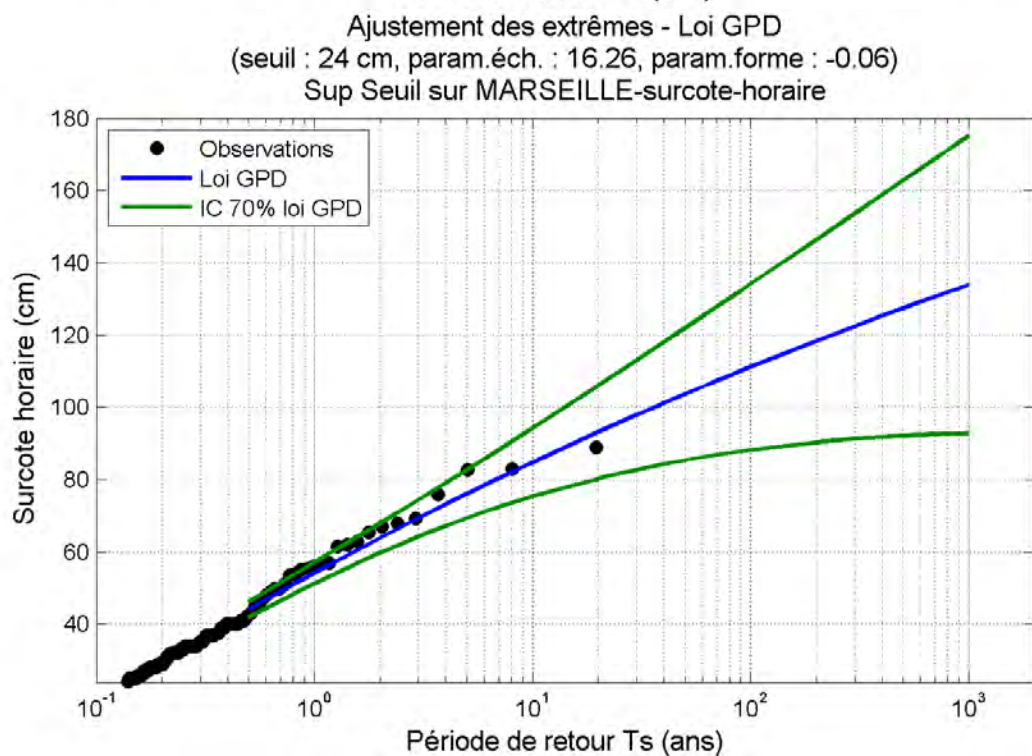
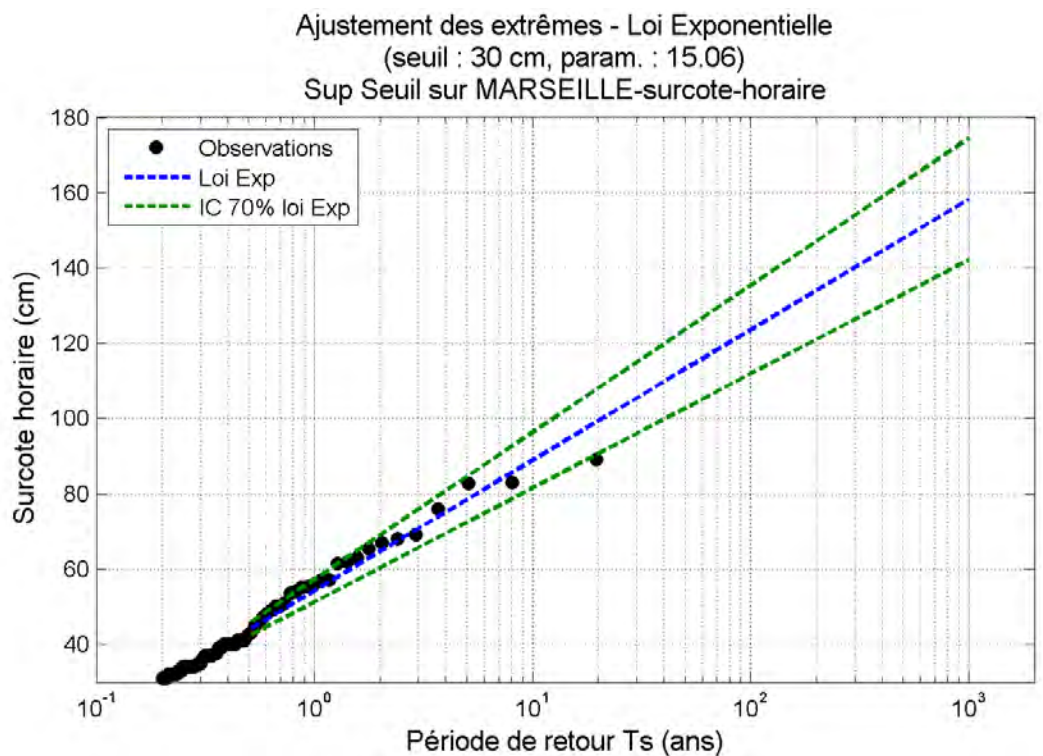


Illustration 42 : Marseille, lois d'ajustement des surcotes extrêmes retenues

Comparaison des ajustements ou des méthodes d'échantillonnage
-MARSEILLE-surcote-horaire

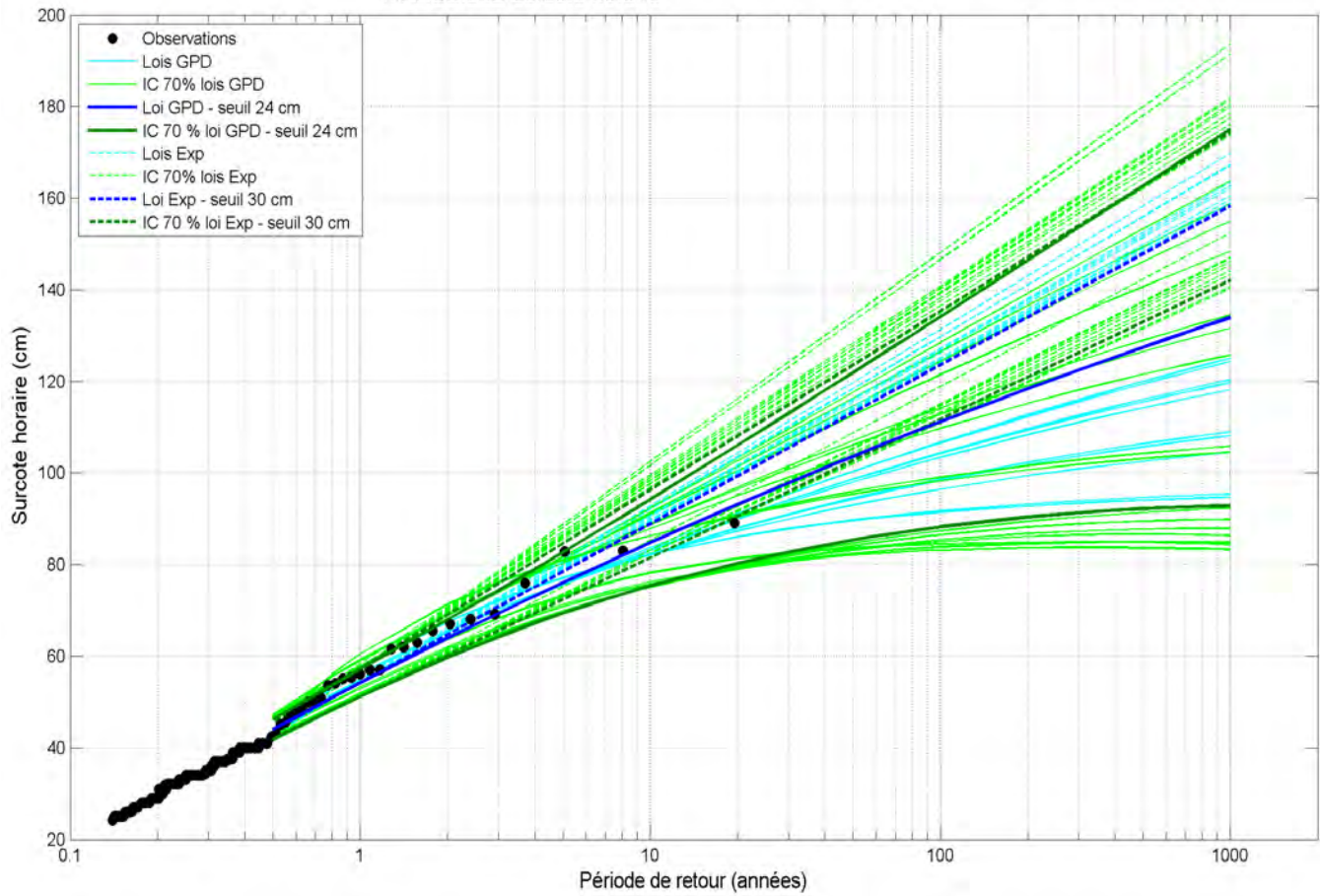


Illustration 43 : Marseille, ensemble des lois d'ajustement des surcotes extrêmes prises en compte.

3.21 Toulon

Longueur de l'échantillon de surcotes horaires : 17,6 années (1992-2011). Cet échantillon a été réduit pour cause de moindre qualité de la donnée de base (cf annexe 5.2)

Les seuils permettant de retenir en moyenne 2 à 8 événements par an sont compris entre 16 et 28 cm.

Conclusion sur la loi exponentielle : Les estimations des surcotes millénales en fonction du seuil pour une moyenne de 2 à 8 événements au-dessus du seuil par an sont comprises entre 76 et 87 cm. Les estimations en fonction du seuil sont plus stables par rapport au seuil à partir d'un seuil de 22 cm. Au vu des résultats du test du Chi2, un seuil de 24 cm semble mieux adapté. De plus les plus fortes observations rentrent dans l'intervalle de confiance à 70 % et sont distribuées autour de la droite d'ajustement. On retient donc le seuil de 24 cm avec une surcote millénales estimée à 79 cm.

Conclusion sur la loi GPD : Les estimations des surcotes millénales en fonction du seuil pour une moyenne de 2 à 8 événements au-dessus du seuil par an sont comprises entre 60 et 70 cm. Les estimations en fonction du seuil sont plus stables par rapport au seuil à partir d'un seuil de 22 cm. Dans tous les cas les plus fortes observations sont au-dessus de la courbe d'ajustement, voire sortent de l'intervalle de confiance à 70%. Un seuil de 26 cm semble mieux adapté car il correspond au meilleur résultat au test du Chi2 et permet d'avoir une majorité des fortes observations dans l'intervalle de confiance à 70%. C'est le seuil retenu avec une surcote millénales estimée à 67 cm.

Comparaison des lois : Les estimations issues des lois GPD et exponentielle sont différentes. Il n'existe pas à ce niveau de critère permettant à dire d'expert de privilégier le choix d'une loi par rapport à l'autre. Les estimations obtenues avec la loi exponentielle sont plus sécuritaires (surcote millénales et borne haute de l'intervalle de confiance plus élevées). On aura tendance à favoriser cette dernière solution.

Surcote de pleine mer maximale observée : 52 cm le 19/02/2010.

Loi exponentielle – seuil 24 cm :

Période de retour Ts (ans)	5	10	20	50	100	1000
Surcote horaire (cm)	43	48	53	59	64	79
Intervalle de confiance à 70%	40 - 46	45 - 51	49 - 57	54 - 64	58 - 69	72 - 87

Loi GPD – seuil 26 cm :

Période de retour Ts (ans)	5	10	20	50	100	1000
Surcote horaire (cm)	42	46	50	54	57	67
Intervalle de confiance à 70 %	40 - 44	43 - 49	45 - 54	47 - 61	48 - 66	50 - 84

Tableau 21 : Estimations des surcotes extrêmes de Toulon selon les lois exponentielle et GPD

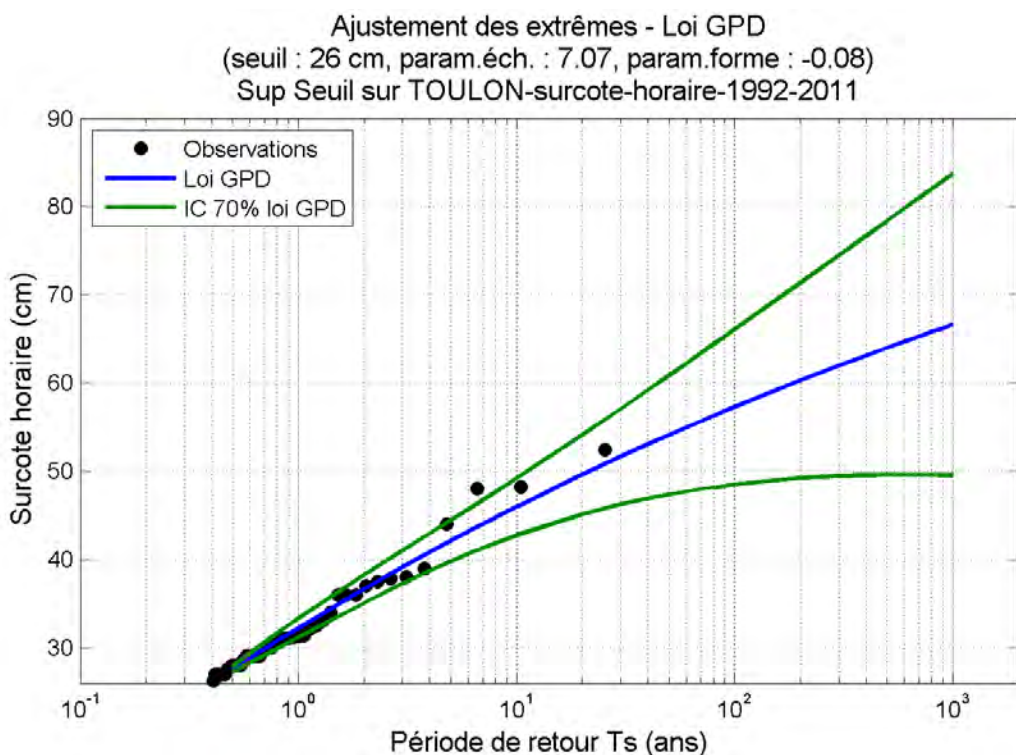
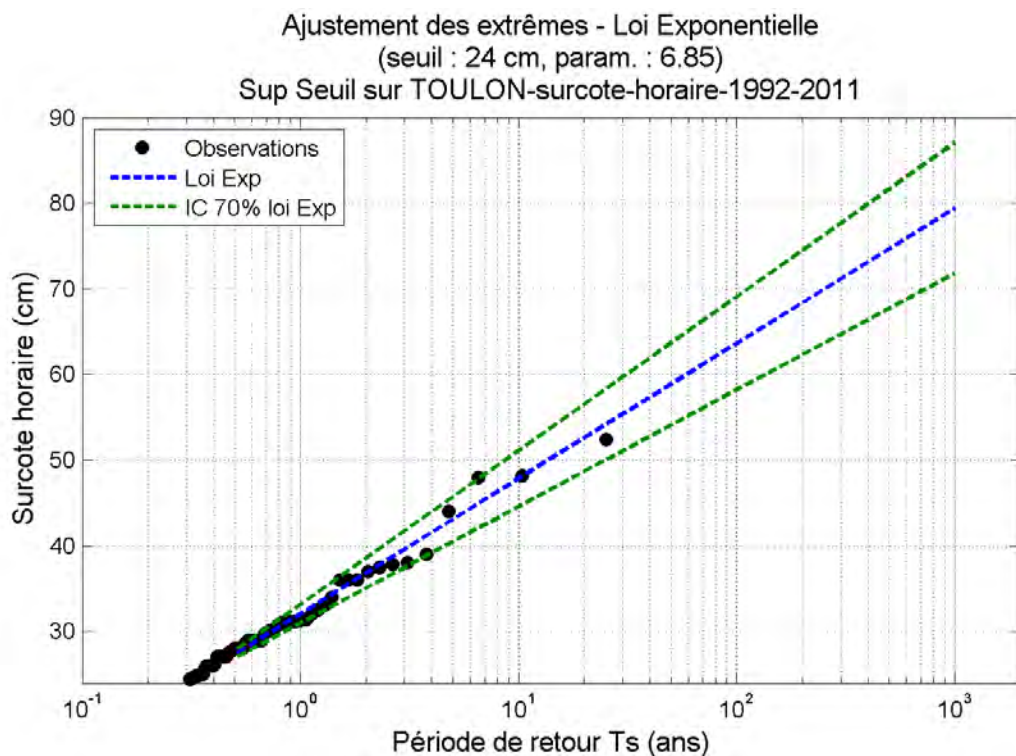


Illustration 44 : Toulon, lois d'ajustement des surcotes extrêmes retenues.

Comparaison des ajustements ou des méthodes d'échantillonnage
-TOULON-surcote-horaire-1992-2011

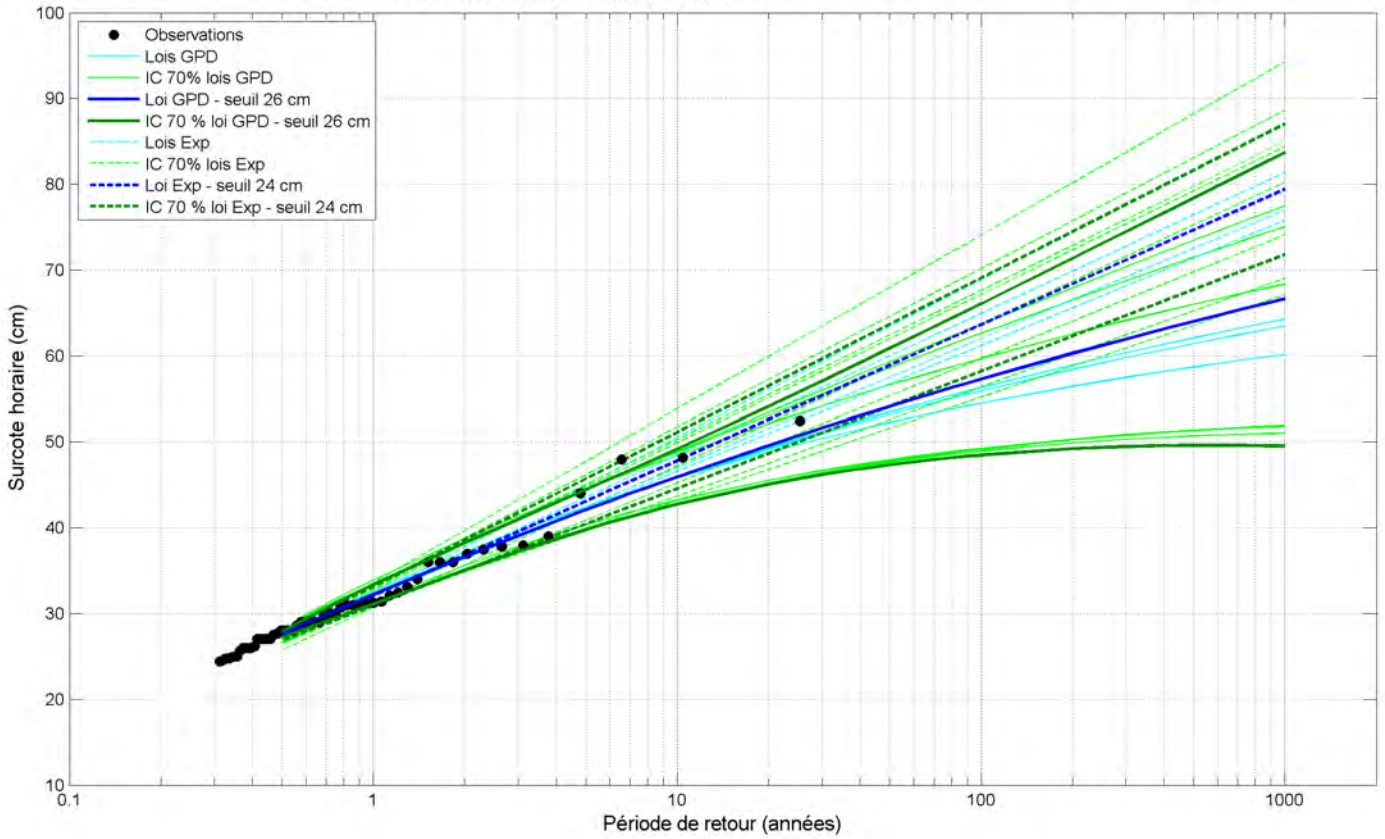


Illustration 45 : Toulon, ensemble des lois d'ajustement des surcotes extrêmes prises en compte.

4. Synthèse des résultats

4.1 Présentation synthétique des résultats

Les résultats, présentés port par port dans le chapitre précédent, sont ici synthétisés. Les tableaux 25 et 26 synthétisent les résultats respectivement sur les façades Mer du Nord, Manche et Atlantique et sur la façade Méditerranée.

L'analyse des résultats a été effectuée conformément aux règles énoncées au paragraphe 2.4 et est détaillée pour chaque port au paragraphe 3. Les résultats comprennent deux estimations issues de deux lois différentes. Le choix d'une estimation plutôt qu'une autre est gouverné par le degré de confiance que l'on attribue aux ajustements de loi, ainsi que le degré de sécurité que l'on souhaite prendre.

Une proposition de choix est aussi présentée en chaque port au paragraphe 3. De manière générale, si le degré de confiance ne permettait pas de différencier les 2 résultats, le choix s'est orienté systématiquement vers la solution la plus sécuritaire.

Dans certains cas, un choix orienté vers une solution plus sécuritaire aboutit à la sélection d'une estimation a priori aberrante. Pour exemple, dans le cas du Havre, on retient la loi GPD avec une surcote millénale de 291 cm. Cela semble un peu élevé. En fait, l'estimation n'a rien d'aberrant, car il faut toujours interpréter une estimation avec son intervalle de confiance. L'estimation est seulement très imprécise. Le résultat pour le Havre est une surcote millénale comprise entre 143 cm et 439 cm (Intervalle de confiance à 70%). Deux raisonnements sont alors possibles :

- raisonnement 1 : la loi GPD ne permet pas de reproduire le comportement des valeurs extrêmes, il convient de retenir la loi exponentielle qui semble plus adaptée aux données ;
- raisonnement 2 : rien ne permet de dire que la loi exponentielle est plus viable que la loi GPD, la qualité des données observées ne permet pas à la méthode employée de faire une meilleure estimation.

De manière générale, la proposition de choix de loi doit être remise en cause sur la base des informations complémentaires que l'on a du site. Pour ce faire, on pourra s'appuyer sur les figures en chaque port présentant l'ensemble des lois testées (incertitude du choix du modèle statistique, cf paragraphe 2.5.3).

Les tableaux 25 et 26 présentent les résultats des deux lois testées, la loi favorisée à dire d'expert, en l'absence de toute information sur le contexte d'utilisation des résultats, étant indiquée en noir. Ils présentent également les principales informations utiles à l'analyse de ceux-ci et en particulier aux incertitudes associées à ces résultats :

- la durée d'observation : plus les durées d'observation sont faibles, plus l'incertitude d'échantillonnage, qui se traduit dans les intervalles de confiance, est grande. Il est cependant important de noter que les durées d'observation ne permettent pas une analyse fine des surcotes de période de retour élevée et d'autant plus les surcotes millénales.
- la surcote maximum observée et le niveau maximum observé : ces deux informations sont utiles pour identifier en particulier les événements qui sont mal représentés par l'ajustement statistique (horsain) et qui peuvent nécessiter d'être pris en compte par ailleurs lors du choix d'un niveau marin total.
- le niveau de Plus Haute Mer Astronomique (PHMA) : cette information, complémentaire à la surcote, permet d'avoir une estimation du niveau total.

- les résultats de l'étude *Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique)* (SHOM/CETMEF, 2012) : la comparaison des résultats (cf. 4.1.3) est utile pour confirmer ou infirmer les résultats de chacune des deux études (loi de Gumbel).

La loi exponentielle est recommandée pour 9 sites (8 en Manche-Atlantique et 1 en Méditerranée) et la loi GPD pour 15 (9 en Manche-Atlantique et 6 en Méditerranée).

Le choix d'une loi par rapport à une autre a pu être réalisé 6 fois du fait d'un meilleur ajustement pour les fortes surcotes d'une loi plutôt que l'autre (6 en Manche-Atlantique et 0 en Méditerranée). Dans ces cas, la loi GPD est celle retenue. Le choix d'une loi par rapport à une autre a été fait 18 fois en retenant la loi la plus sécuritaire. Dans 5 de ces cas, des horsains sont observés (Boulogne-sur-Mer, Cherbourg, Roscoff, Le Conquet, Brest, La Rochelle, Ajaccio).

Il n'est pas possible de favoriser une loi plutôt qu'une autre de manière générale, ni pour certaines zones géographiques.

Port	Durée d'observation (ans)	Surcote instantanée maximale observée (cm)	Niveau Max observé (m NGF)	Niveau de PHMA (m NGF)	Loi	Surcote 100 ans (cm)			Surcote 1000 ans (cm)		
						IC-	médiane	IC+	IC-	médiane	IC+
Port-Vendres	18,3	49 cm Le 04/12/03	0,74 m Le 04/12/03	0,44	EXP	60	66	70	72	85	92
					GPD	46	61	75	48	76	104
Sète	31,3	68 cm Le 16/12/97	0,98 m Le 17/12/97	0,47	EXP	68	74	80	83	92	101
					GPD	58	68	77	61	83	106
Marseille	13,6	89 cm Le 28/12/99	1,04 m Le 20/09/99	0,37	EXP	112	124	135	142	158	174
					GPD	88	111	134	93	134	175
Toulon	17,6	52 cm Le 19/02/10	0,73 m Le 19/02/10	0,39	EXP	58	64	69	72	79	87
					GPD	48	57	66	50	67	84
Nice	14,6	51 cm Le 19/02/10	0,71 m Le 01/01/10	0,36	EXP	57	64	71	70	80	90
					GPD	50	65	79	54	84	113
Monaco	12,6	51 cm Le 19/02/10	0,72 m Le 01/01/10	0,37	EXP	59	68	77	74	87	100
					GPD	45	65	85	39	83	126
Ajaccio	10	74 cm Le 01/01/10	0,87 m Le 01/01/10	0,27	EXP	57	75	83	83	95	106
					GPD	59	80	101	62	106	150

Tableau 25 : Synthèse des estimations des surcotes extrêmes des ports de Méditerranée selon les lois exponentielle et GPD pour les périodes de retour 100 et 1000 ans

Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales

134, rue de Beauvais - CS 60039
60280 - Margny Lès Compiègne

☎ : 03 44 92 60 00

☎ : 03 44 20 06 75

cetmef@developpement-durable.gouv.fr

Conception : CETMEF

ISSN 1961-1773

ISBN 978-2-11-129368-7

Identifiant CETMEF : C 13-02

www.cetmef.developpement-durable.gouv.fr