



**HAL**  
open science

# L'évaluation des périodes de retour des niveaux marins extrêmes : application de la méthode des probabilités jointes aux ports de Brest et La Rochelle et analyse des incertitudes d'échantillonnage associées

Claire-Marie Duluc, Y. Deville, Lise Bardet

► **To cite this version:**

Claire-Marie Duluc, Y. Deville, Lise Bardet. L'évaluation des périodes de retour des niveaux marins extrêmes : application de la méthode des probabilités jointes aux ports de Brest et La Rochelle et analyse des incertitudes d'échantillonnage associées. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, 2014, 1, pp.11-17. 10.1051/lhb/2014002 . hal-02611877

**HAL Id: hal-02611877**

**<https://hal.science/hal-02611877>**

Submitted on 11 May 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

# L'ÉVALUATION DES PÉRIODES DE RETOUR DES NIVEAUX MARINS EXTRÊMES : APPLICATION DE LA MÉTHODE DES PROBABILITÉS JOINTES AUX PORTS DE BREST ET LA ROCHELLE ET ANALYSE DES INCERTITUDES D'ÉCHANTILLONNAGE ASSOCIÉES

*Extreme sea level assessment: application of the joint probability method with a regional skew surges distribution and uncertainties analysis*

**Claire-Marie DULUC<sup>1</sup>, Yves DEVILLE<sup>2</sup>, Lise BARDET<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire – BP 17 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex – claire-marie.duluc@irsn.fr

<sup>2</sup> Alpestat – 37 rue Lamartine 73000 Chambéry - deville.yves@alpestat.com

*Le niveau marin peut être défini comme la somme du niveau d'eau atteint par la marée et d'une surcote ou décote additionnelle. La méthode des probabilités jointes permet de calculer les probabilités de dépassement des niveaux marins extrêmes. Elle repose sur un calcul de convolution entre d'une part, la loi déterministe des probabilités des niveaux de marée théorique, et d'autre part, une distribution de probabilité des surcotes. L'étude, menée pour des niveaux de pleine mer, présente une analyse de l'impact des incertitudes liées au comportement des surcotes extrêmes. L'espérance conditionnelle de la marée et le calcul des incertitudes d'échantillonnage sont proposés comme indicateurs de la pertinence des résultats car ils permettent d'identifier les niveaux pour lesquels le calcul de convolution repose principalement sur une zone incertaine de la distribution des surcotes.*

*L'étude présente deux cas d'application aux ports de Brest et La Rochelle. Une distribution des surcotes de pleine mer s'appuyant sur une analyse régionale est testée. Les résultats obtenus mettent en valeur l'intérêt et les limites actuelles d'une telle approche. En particulier, il demeure délicat d'attribuer des périodes de retour à des événements historiques exceptionnels tels que le niveau d'eau observé à la Rochelle lors de la tempête Xynthia. Il apparaît donc nécessaire de conforter la modélisation probabiliste des surcotes extrêmes pour faire progresser l'évaluation des niveaux marins extrêmes.*

*Extreme sea levels can be computed with the joint probability method. This method recombines separated frequency distributions for the tide and the surge. The tidal distribution is usually deterministic and exact whereas the surge distribution is estimated through a statistical model referring to extreme value theory. Because of uncertainties on extreme surges distribution, a challenging question concerns the maximum sea levels that can reasonably be assessed. In this aim, we suggest the use of two simple indicators: conditional expectation of the tide and confidence intervals of the sea level distribution to identify the highest sea level that can reasonably be computed with regards to uncertainties of extreme surge distributions.*

*Two examples at Brest and La Rochelle are detailed in the study. For both sites, tidal conditional expectation shows that 100-yr return sea levels are mainly composed of a large spring tide and of a moderate skew surge with a few years return period. However, at La Rochelle, the sea level observed during the storm Xynthia is much higher than the 100-yr return sea level. On the basis of a usual statistical distribution of extreme skew surges, it does not appear reasonable to assess a probability to the sea level observed during the storm Xynthia. Consequently, we experimented a regional distribution of skew surges. Preliminary results show that the sea level observed during Xynthia should probably receive a return period greater than 1000 years. Furthermore, confidence intervals are larger and seem to make a better assessment of uncertainties. Extreme sea modelling could be improved with a better description of large surges.*

## I INTRODUCTION

Le niveau de la mer peut être défini comme la somme de deux composantes : le niveau d'eau, prédictible, atteint par la marée théorique et la hauteur d'une surcote ou décote additionnelle due essentiellement à des effets météorologiques. L'évaluation des niveaux extrêmes de la mer doit tenir compte de ces deux phénomènes. Dans cette optique, la méthode des probabilités jointes propose un cadre théorique pour calculer la probabilité de dépassement d'un niveau marin. Il s'agit d'un calcul par convolution à partir, d'une part, de la loi déterministe des probabilités des niveaux de marée théorique et d'autre part, d'une distribution de probabilité des surcotes.

La première partie de cet article présente le cadre théorique d'application de la méthode de convolution appliquée à des niveaux marins de pleine mer et la notion d'espérance conditionnelle de marée pour un

niveau marin donné. La seconde partie présente l'application de cette méthode aux ports de Brest et La Rochelle avec le programme *SeaLev*. Développé par l'IRSN pour les niveaux marins de très grandes périodes de retour, ce programme peut cependant être utilisé à partir de périodes de retour d'environ 50 ans. Une distribution exponentielle des surcotes de pleine mer est retenue pour Brest de façon à s'approcher de la démarche retenue par le Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales (CETMEF) et le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) pour le calcul des niveaux extrêmes le long des côtes Françaises [SHOM-CETMEF, 2008]<sup>1</sup>. Compte tenu des incertitudes associées au comportement des surcotes extrêmes, il apparaît à la fois nécessaire et délicat de définir les niveaux de probabilités pour lesquels le calcul de convolution est pertinent. Nous proposons d'utiliser l'espérance conditionnelle de la marée pour objectiver l'identification d'un niveau à partir duquel le calcul de convolution n'est plus « pertinent », dans le sens où il repose de manière significative sur une zone de la distribution des surcotes incertaine car fortement extrapolée.

Pour le site de la Rochelle, l'attribution d'une période de retour au niveau marin observé lors de la tempête Xynthia n'apparaît pas accessible en l'état actuel des connaissances. Afin d'évaluer la période de retour associée à cet évènement, une distribution des surcotes de pleine mer issue d'une analyse régionale a été testée. Elle est associée à une analyse des incertitudes d'échantillonnage. Celle-ci apparaît particulièrement utile dans ce cas pour appréhender la plage d'incertitude associée au calcul. Elle illustre également la difficulté d'associer des périodes de retour à des évènements historiques exceptionnels tels que le niveau marin observé à la Rochelle lors de la tempête Xynthia.

## II ASPECTS THÉORIQUES

### II.1 Les variables de pleine mer

Un niveau marin de pleine mer  $Z_m$  donné est traditionnellement décomposé en deux composantes  $X_m$  et  $Y_m$  représentant respectivement la marée et la surcote :

$$Z_m = X_m + Y_m$$

niveau marin PM      marée PM      surcote PM

Le niveau de marée de pleine mer  $X_m$  est calculé pour différents sites par des organismes spécialisés (en France, le SHOM). Le niveau moyen de la mer est inclus dans cette composante de marée  $X_m$

La surcote de pleine mer est obtenue en soustrayant le niveau maximal prédit  $X_m$  au niveau maximal  $Z_m$  atteint lors de la marée  $m$ . La surcote de pleine mer n'a donc pas de rapport simple avec la surcote instantanée.

Bien que la variable  $X$  soit de nature déterministe (cyclique), sa répartition sur une période de temps longue peut être considérée comme une distribution de probabilité. Les quantités  $Y$ ,  $Z$  sont considérées comme des variables aléatoires de loi continue. Nous noterons  $f_X(x)$  la densité de probabilité de  $X$  avec des notations analogues pour  $Y$  et  $Z$ .

Un des intérêts de la surcote de pleine mer est que l'interaction entre la marée et la surcote instantanées disparaît [Coles, et al., 1990] [Coles, 2001]. L'hypothèse d'indépendance entre marée et surcote [Simon, 1994] n'a pas été remise en cause dans cette étude. Les variables aléatoires marée  $X$  et surcote  $Y$  sont donc considérées indépendantes, autorisant le calcul de la distribution de  $Z$  par convolution.

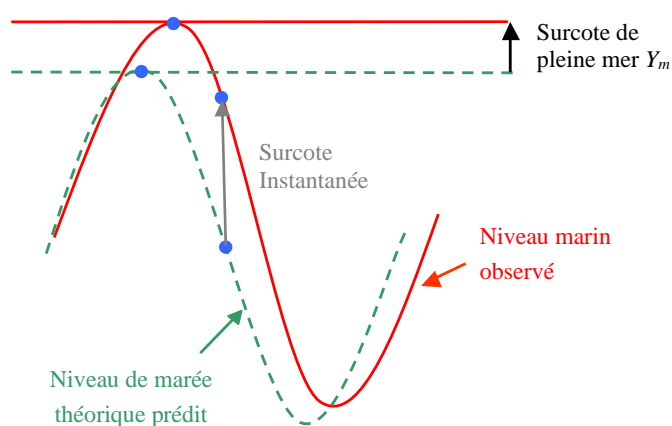


Figure 1 : Définition de la surcote de pleine mer

<sup>1</sup> A noter qu'une mise à jour de 2012 est maintenant disponible [SHOM-CETMEF, 2012].

---

## II.2 Convolution entre marée et surcote

### II.2.1 Principe

Compte tenu de l'indépendance de  $X$  et  $Y$ , la densité conjointe a la forme d'un produit  $f_X(x)f_Y(y)$ , et la densité de probabilité de la somme  $Z = X + Y$  est donnée par une formule dite de convolution

$$f_Z(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x) f_Y(z-x) dx \quad (1)$$

Les bornes d'intégration sont en fait finies, car la variable  $X$  est bornée. Une formule comparable concerne les probabilités de dépassement  $S_Z(z) := \Pr \{Z > z\}$  appelées fonctions de survie.

En pratique, le calcul numérique réalisé est une convolution discrète donnant les valeurs de  $f_Z(z)$  ou de  $S_Z(z)$  pour  $z$  décrivant une grille de valeurs [Pugh, et al., 1980].

### II.2.2 Densités de probabilité

La distribution de la marée astronomique  $X$  est utilisée sous forme non-paramétrique, telle qu'illustrée plus loin figure 3. Notons que cette distribution a un support borné  $(x_{\min}; x_{\max})$ , où  $x_{\max}$  est le plus haut niveau astronomique appelé HAT (*Highest Astronomical Tide*), ou PHMA (*Plus Haute Mer Astronomique*) en français.

L'intérêt étant généralement focalisé sur les niveaux marins élevés impliquant de fortes surcotes, la distribution de la surcote  $Y$  sera quant à elle choisie sous une forme paramétrique, autorisant une extrapolation. La densité prend alors la forme  $f_Y(y; \theta_Y)$  ou  $\theta_Y$  est un vecteur de paramètres estimé à partir d'un échantillon  $Y_i$ .

La méthode de construction de l'échantillon des surcotes peut être de type POT (*Peak Over the Threshold*), c'est à dire ne concerner que les observations dépassant un seuil  $u$  choisi. La distribution de  $Y$  est alors déduite de celle du dépassement  $Y - u$ ; elle sera typiquement exponentielle ou GPD (*Generalized Pareto Distribution*). Dans le cas où les surcotes sont issues d'un échantillonnage au-dessus d'un seuil, la valeur de  $S_Z(z)$  n'est calculable que pour les valeurs  $z > x_{\max} + u$ . En effet, la valeur de  $f_Y(z - x)$  dans la formule de convolution (1) n'est alors connue que pour  $z - x > u$ . Le taux de dépassement doit également être pris en considération dans le calcul des périodes ou niveaux de retour.

### II.2.3 Incertitudes d'échantillonnage

La distribution du niveau astronomique de marée de pleine mer  $X$  peut être considérée comme parfaitement connue. La distribution de la surcote de pleine mer  $Y$  est en revanche imparfaitement connue, car elle est estimée à partir d'un échantillon de taille finie. L'incertitude sur le vecteur de paramètres  $\theta_Y$  peut être traduite sous forme d'intervalles de confiance sur  $S_Y(y)$  ou sur le niveau de retour  $y(T)$  associé à une période de retour  $T$  donnée.

La « méthode delta » [Coles, 2001] permet de construire des intervalles de confiance approchés pour ces quantités d'intérêt à partir de la dispersion connue de l'estimateur  $\hat{\theta}_Y$  du vecteur  $\theta_Y$ , donnée sous la forme d'une matrice de covariance. Cette méthode peut également être utilisée pour propager l'incertitude sur  $S_Y(y)$  en une incertitude sur  $S_Z(z)$  ou sur un niveau de retour  $z(T)$ .

Notons que bien que le niveau de marée de pleine mer  $X$  joue un rôle très important, cette variable est néanmoins bornée. Aussi, le comportement pour les grandes périodes de retour et la concavité de la courbe sur le graphique des niveaux de retour ne dépendent-ils que de la distribution de  $Y$ .

### II.2.4 Espérance conditionnelle

Les niveaux marins extrêmes ne correspondent pas nécessairement à des niveaux de marées maximales de pleine mer. La contribution moyenne des phénomènes de marée et de surcote dans un niveau marin peut être évaluée grâce à la fonction d'espérance conditionnelle du niveau de marée de pleine mer. Pour un niveau marin  $z$  donné, le niveau de pleine mer astronomique  $X$  reste aléatoire et a une distribution de probabilité conditionnelle. L'espérance de  $X$  conditionnelle à  $Z$  permet d'évaluer l'importance moyenne de la marée pour un niveau marin  $z$ . Elle s'exprime selon

$$E(X / Z = z) = \frac{\int x f_X(x) f_Y(z-x) dx}{\int f_X(x) f_Y(z-x) dx} \quad (2)$$

---

et s'interprète comme la moyenne des niveaux de marée de pleine mer correspondant au niveau total  $z$  sur une période qui serait très longue, donc comporterait un grand nombre de niveaux  $Z_i$  observés proches de  $z$ . La notation  $E(X / Z=z)$  sera parfois simplifiée sous la forme  $E(X/z)$ .

L'indicateur  $E(X/z)$  peut être tracé en fonction de  $z$  sur le graphique des périodes de retour associées aux niveaux marins. On peut montrer que son allure est liée à la concavité de la courbe des périodes de retour des surcotes de pleine mer<sup>2</sup>, laquelle est elle-même étroitement liée à l'épaisseur de la queue de distribution des surcotes de pleine mer. Une loi de surcote de pleine mer dont la queue est exactement exponentielle donnera une courbe d'espérance du niveau de marée de pleine mer constante pour  $z$  assez grand. Une loi de surcote de pleine mer dont la queue est plus épaisse que l'exponentielle donnera une courbe d'espérance décroissante. Ce dernier cas signifie que si de très grandes surcotes sont assez probables, les niveaux marins extrêmes  $z$  auront tendance à se produire avec une surcote extrême combinée à une marée qui n'est pas forcément extrême. Bien que peu intuitif, ce comportement traduit le fait que en augmentant le niveau marin  $z$ , on augmente la probabilité d'obtenir un extrême dû essentiellement à la surcote de pleine mer.

#### II.2.5 Outils de calcul utilisés

L'environnement de calcul R [R Development Core Team, 2011], apprécié des statisticiens, est adapté à la mise en œuvre de la méthode: préparation de données, calculs et graphiques. Le « package R » *SeaLev* développé par l'IRSN permet le calcul de convolution utilisant une distribution arbitraire de la surcote  $Y$  ou du dépassement  $Y-u$ . Il calcule des intervalles de confiance approchés pour les niveaux de retour par la méthode "delta", à partir d'une matrice de covariance approchée de  $\hat{\theta}_Y$ , telle que typiquement évaluée dans l'estimation. Le package *Renext* a quant à lui été utilisé pour l'estimation de modèles POT.

#### II.2.6 Loi de distribution des surcotes de pleine mer

Différentes lois ont été testées dans l'étude, en particulier des lois exponentielles et GEV issues de la théorie des valeurs extrêmes appliquée à des données à seuil (POT) [Coles, 2001].

En particulier, une loi régionale des surcotes de pleine mer a été utilisée dans l'application au port de la Rochelle. Cette loi, proposée par [Bardet, et al., 2012], a été établie à partir des données disponibles en 21 ports du littoral Atlantique et de la Manche. Les surcotes ont été normalisées en les divisant par la surcote empirique annuelle de chaque série puis regroupées pour former un échantillon régional, à partir duquel les ajustements statistiques sont réalisés [Bardet, et al., 2012].

### III APPLICATION AUX PORTS DE BREST ET DE LA ROCHELLE

#### III.1 Données retenues dans l'étude

La **distribution des niveaux de marée de pleine mer** est issue des prédictions de niveaux marins du SHOM pour les ports de Brest et La Rochelle. Elle a été établie à partir de prédictions données par le logiciel SHOMAR portant sur les années 1991–2010, de façon à couvrir la durée d'un saros (18,6 ans), en considérant des classes de niveau de 10 cm et une moyenne glissante sur trois valeurs consécutives. Ce choix a été retenu pour disposer de densités de probabilités lissées. Une étude de sensibilité a montré que le degré de lissage utilisé pour la densité de probabilité n'influe que peu les résultats de convolution. La référence altimétrique retenue est l'IGN69.

Les **surcotes de pleine mer** ont été calculées à partir des niveaux marins observés disponibles dans la base de données du Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales (SONEL) et des niveaux marins prédits par le SHOM. Le traitement réalisé sur ces données est détaillé dans [Bardet, et al., 2012]. En particulier, une correction de l'évolution du niveau marin a été réalisée. La durée effective des observations ainsi que l'évolution moyenne du niveau de la mer sont précisées ci-après pour Brest et La Rochelle.

---

<sup>2</sup> En échelle « exponentielle »

Port	Période d'observation	Durée effective	Evolution moyenne du niveau de la mer
Brest	1846-2010	150 ans	0,18 cm/an
La Rochelle	1941-2010	26 ans	0,11 cm/an

Tableau 1 : Caractéristiques des chroniques d'observations de niveau marin à Brest et La Rochelle

### III.2 Application au port de Brest

Ce premier cas d'application a été réalisé en retenant des hypothèses proches de celle retenues par le CETMEF et le SHOM pour le calcul des niveaux extrêmes le long des côtes françaises pour des périodes de retour de 5 à 100 ans [SHOM-CETMEF, 2008]. En comparaison de l'hypothèse d'une loi de Gumbel ajustée par le SHOM sur des surcotes de pleine mer supérieures à 20 cm, nous avons retenu une loi exponentielle ajustée sur des surcotes supérieures à 30 cm. Il a été vérifié que l'impact du choix du seuil sur l'ajustement des surcotes est très faible (inférieur à 1 ou 2 cm sur le niveau centennal).

Les données d'entrée du calcul de convolution et le résultat graphique obtenu sont présentés figure 3, sans indication d'un intervalle de confiance. En effet, le choix d'un seuil d'ajustement des surcotes bas (30 cm) se traduit par un grand nombre d'observations retenues (1413) et donc par un intervalle de confiance très resserré non représentatif de l'incertitude d'échantillonnage sur les surcotes supérieures à 70 cm.

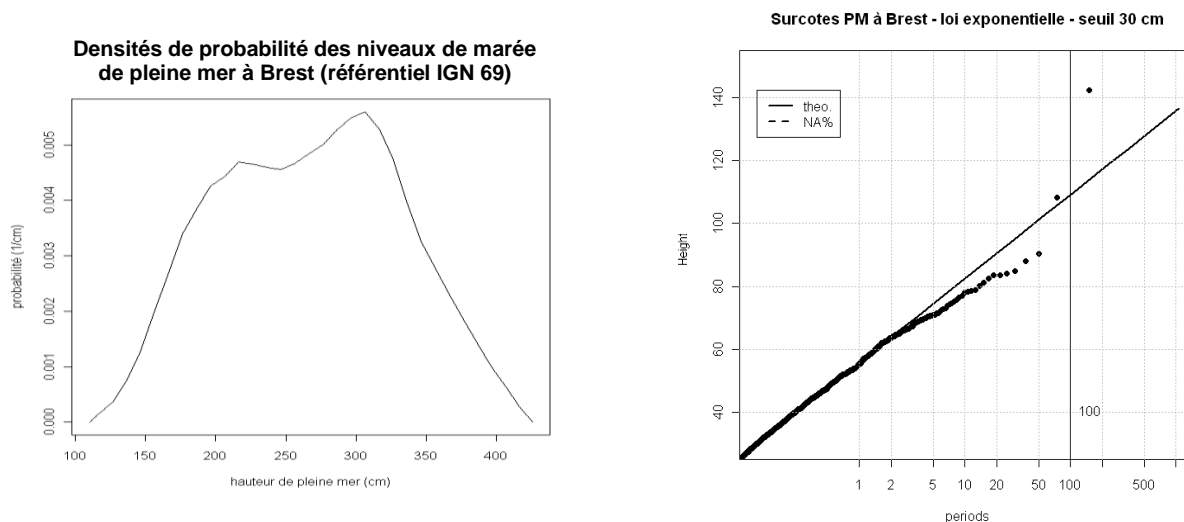


Figure 3 : Données d'entrée utilisées pour le calcul par convolution des niveaux marins à Brest

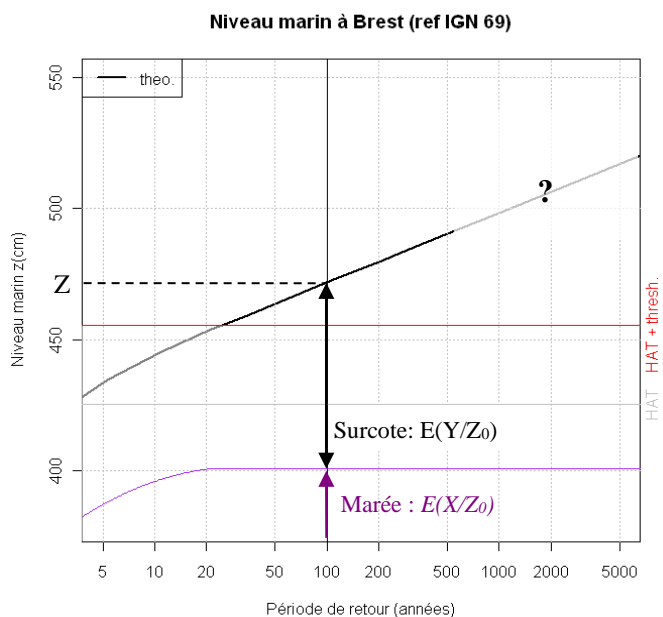


Figure 4 : Calcul de convolution des niveaux marins à Brest  
- Distribution exponentielle des surcotes (seuil = 30 cm)

La figure 4 illustre les résultats obtenus à partir des hypothèses présentés sur la figure 3.

Avec les hypothèses retenues, le domaine de validité commun des niveaux marins présentés ci-dessus et ceux calculés par le SHOM est limité aux périodes de retour comprises entre 30 et 100 ans. En effet, d'une part, le calcul de convolution réalisé par *SeaLev* n'est valable que pour des niveaux supérieurs à  $HAT+30cm$ , d'autre part, le SHOM et le CETMEF ne présentent pas de résultats pour des périodes de retour supérieures à 100 ans. Les résultats comparables sont en très bon accord avec ceux du SHOM-CETMEF, avec des écarts inférieurs à 5 cm.

Il est toujours délicat de donner une limite à partir de laquelle les résultats d'un calcul d'extrapolation ne seraient plus « pertinents ». On considère classiquement qu'une extrapolation ne doit pas dépasser 4 à 10 fois la durée d'observation. Cependant la convolution limite les inconvénients de l'extrapolation, et particulièrement si la distribution de  $X$  est parfaitement connue comme ici. En revanche, la présence de horsains [Bardet, et al., 2011] [Bernardara, et al., 2012] suggère que la queue de distribution de surcote pourrait n'être pas adéquatement décrite pour les très grandes périodes de retour.

Il apparaît donc intéressant d'objectiver le niveau à partir duquel le calcul de convolution n'est plus « pertinent », au sens où il repose de manière significative sur une zone de la distribution des surcotes incertaine car fortement extrapolée. Un premier indicateur est disponible au travers des espérances conditionnelles du niveau de marée de pleine mer et de la surcote de pleine mer. En effet, la contribution moyenne du niveau de marée et de surcote de pleine mer dans un niveau marin peut être évaluée grâce à la fonction d'espérance conditionnelle du niveau de marée de pleine mer. La loi conditionnelle de la surcote de pleine mer ayant une forme de type « exponentielle » (tronquée), la probabilité de dépasser l'espérance est faible.

L'exemple du calcul mené sur Brest montre qu'un niveau marin centennal  $Z_{100ans} = 472$  cm dans le référentiel IGN 69 serait en moyenne composé d'un niveau de marée de pleine mer atteignant 401 cm (i.e.  $E(X/Z=472)$ ) et d'une surcote de pleine mer d'environ 70 centimètres (i.e.  $E(Y/Z=472)$ ). Selon le graphe de droite de la figure 3, la période de retour d'une surcote de 70 cm est inférieure à 5 ans. Compte tenu de la durée effective disponible sur Brest, il y a peu d'incertitude sur l'évaluation des surcotes de cet ordre de grandeur. Le calcul de convolution apparaît a posteriori bien pertinent au moins jusqu'au niveau marin centennal.

### III.3 Application au port de La Rochelle

Un premier calcul de convolution est réalisé avec une approche similaire à celle retenue sur Brest : distribution exponentielle des surcotes avec un seuil de 40 cm. De même que sur Brest, l'impact du choix du seuil sur l'ajustement des surcotes est très faible.

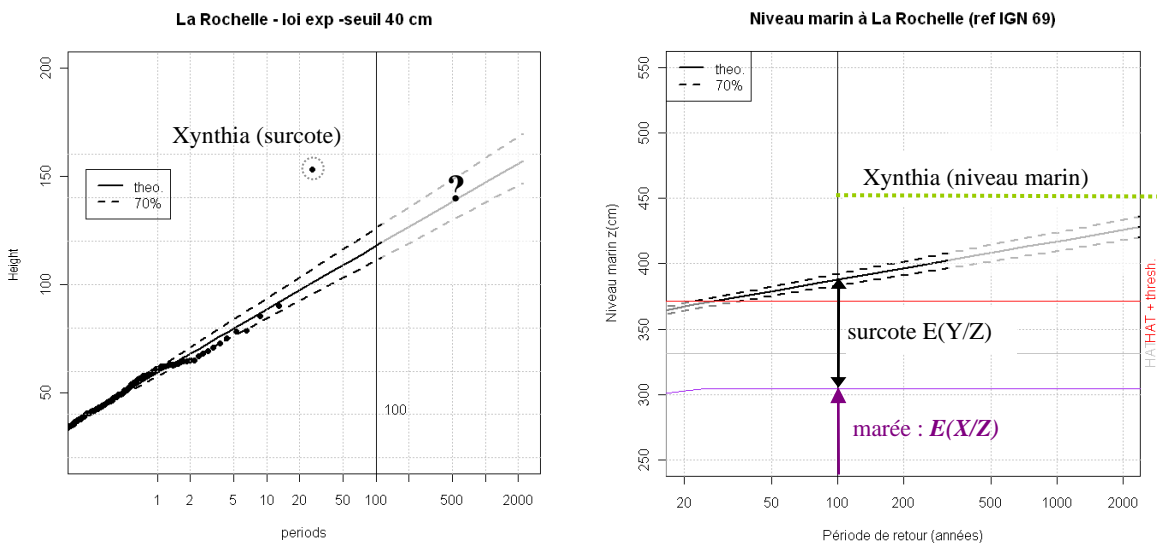


Figure 5 : Ajustement des surcotes par une loi exponentielle (seuil = 40 cm) (gauche) et calcul de convolution du niveau marin à La Rochelle (droite) - Intervalles de confiance 70 %

De la même façon que sur Brest, l'analyse menée dans ce cas à partir de l'espérance conditionnelle du niveau de marée de pleine mer montre que le calcul de niveaux marins par convolution à partir d'une distribution locale des surcotes est pertinent au moins jusqu'au niveau centennal estimé à environ 390 cm (IGN 69).

Cependant, lors de la tempête Xynthia, c'est un niveau marin de 450 cm (IGN 69), bien supérieur au niveau centennal, qui a été observé. Comme indiqué par [Pineau-Guillou, et al.-1, 2011], l'attribution d'une période de retour au niveau marin observé lors de la tempête Xynthia n'apparaît pas accessible en l'état actuel des connaissances. La tempête Xynthia s'est d'ailleurs caractérisée par la concomitance à pleine mer d'une grande marée avec une surcote exceptionnelle de 153 cm qui, apparaissant comme un horsain dans la



distribution empirique des surcotes (point cerclé sur la figure 5), confirme la nécessité d'analyser et d'améliorer la prise en compte de ces surcotes exceptionnelles [Pineau-Guillou, et al.-2, 2011].

Une distribution des surcotes de pleine mer régionales a été testée afin d'identifier les apports de ce développement méthodologique récent dans les calculs de convolution. Compte tenu des développements encore en cours sur cette méthode, nous avons retenu ici des hypothèses arbitraires de surcotes spatialement dépendantes entre elles, ajustées avec une loi GPD. L'ajustement présenté pour les surcotes est ensuite dénormalisée en multipliant les surcotes adimensionnelles par la surcote de pleine mer annuelle empirique de La Rochelle établie à 61 cm.

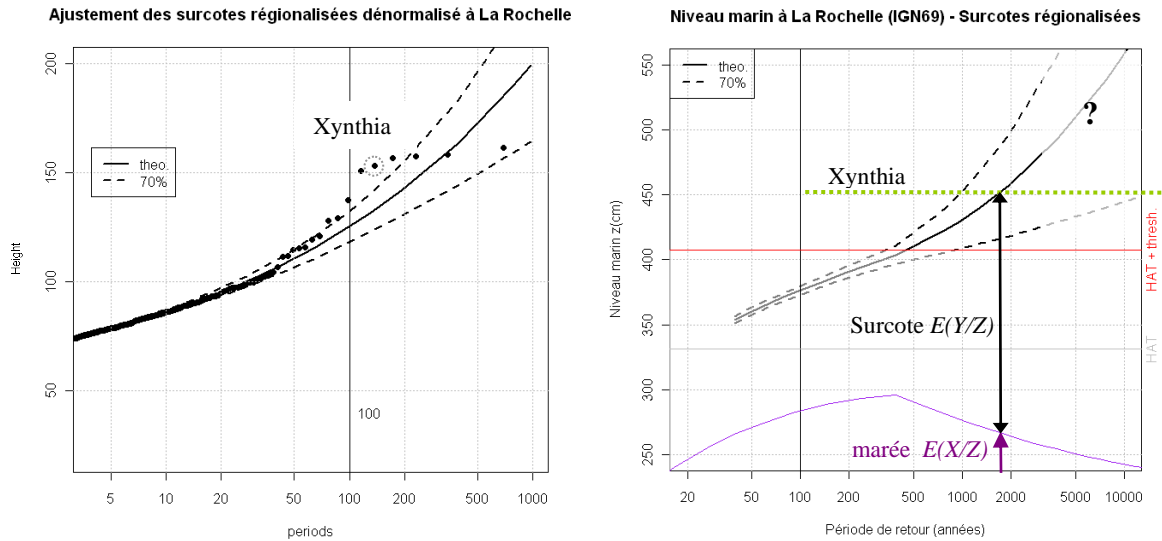


Figure 6 : Ajustement régional des surcotes (surcotes dépendantes, région Atlantique+Manche, loi GPD) (gauche) et calcul de convolution du niveau marin à La Rochelle (droite) - Intervalles de confiance 70 %

En premier lieu, on peut noter que l'utilisation d'une loi régionale permet d'étendre le domaine de pertinence du calcul de convolution vers les très grandes périodes de retour. Cependant, l'analyse régionale tend à montrer un comportement « hyper-exponentiel » qui implique une décroissance de l'espérance conditionnelle de la marée pour les grandes périodes de retour. En conséquence, l'extension du domaine de pertinence du calcul de convolution vers les grandes périodes de retour s'avère finalement relativement faible.

La visualisation des intervalles de confiance confirme ce premier point. En effet, au-delà d'une période de retour de 1000 ans, les intervalles de confiance s'agrandissent très rapidement, traduisant une forte diminution de la pertinence du calcul de convolution.

Il demeure très délicat d'associer une période de retour au niveau marin atteint lors de l'épisode Xynthia. Néanmoins l'intervalle de confiance à 70 % tend à montrer que celle-ci est probablement supérieure au millénaire. Cet ordre de grandeur n'est pas modifié si l'on prend en compte d'autres hypothèses que celles retenues figure 6 pour la régionalisation des surcotes.

Enfin, l'extension du domaine de pertinence du calcul de convolution vers les grandes périodes de retour se fait au détriment de l'estimation des niveaux marins plus faibles, qui sont exclus du domaine de validité du calcul (niveaux inférieurs au niveau *HAT*+seuil).

#### IV CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les calculs de convolution sur Brest et La Rochelle montrent que pour ces deux ports, le niveau marin centennal correspond en moyenne à une surcote dont la période de retour est bien inférieure à 100 ans. Par conséquent, les ajustements de surcotes réalisés à partir de données locales semblent suffisants pour calculer des niveaux marins allant jusqu'au centennal. Pour ce type d'application, le programme *SeaLev* permet d'utiliser des lois à trois paramètres et d'évaluer des intervalles de confiance relatifs à l'échantillonnage des surcotes.

De façon plus générale, il est important de s'assurer de la bonne adéquation de la loi de surcotes sur les périodes de retour intervenant dans le calcul. Pour les périodes de retour inférieures à cent ans, il pourrait être envisagé de choisir une distribution de surcotes davantage paramétrée, voire de forme non-paramétrique.



---

Pour des périodes de retour supérieures au centennal, le comportement extrême des niveaux marins dépend davantage de la queue de distribution des surcotes. Une amélioration possible consiste comme dans [Dixon, et Tawn, 1994] à raccorder une loi de surcote de forme non-paramétrique avec une loi de type GPD, de manière à couvrir des périodes de retour allant de quelques années jusqu'au millennial.

Cette étude a également permis d'identifier les avantages et limites de deux indicateurs liés à la convolution : l'espérance conditionnelle de la marée et l'évolution de la taille des intervalles de confiance qui pourraient être utilisés pour définir des critères permettant d'estimer la fiabilité du calcul. Ils montrent que l'évaluation des niveaux marins exceptionnels, parfois observés, reste très délicate. Dans cette perspective, les travaux récents sur les méthodes de régionalisation des surcotes ouvrent des pistes pour pouvoir réaliser des calculs de convolution plus pertinents pour des périodes de retour dépassant le centennal. Néanmoins, les incertitudes associées aux surcotes extrêmes sont très importantes et se répercutent sur les niveaux marins. Les intervalles de confiance associés au niveau marin permettent de rendre compte des ordres de grandeurs des incertitudes associées à ce type de calculs. Il apparaît nécessaire de conforter la modélisation probabiliste des surcotes extrêmes pour faire progresser l'évaluation des niveaux marins extrêmes.

## V REFERENCES ET CITATIONS

Bardet L., Duluc C.-M., Rebour V. et L'her J. (2011). - Regional frequency analysis of extreme storm surges along the French coast. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **11**:1627-1639.

Bardet L., Duluc C.-M. (2012). - Apports et limites d'une analyse statistique régionale pour l'estimation de surcotes extrêmes en France. *Congrès SHF : «Evènements extrêmes fluviaux et maritimes»*, Paris, 1-2 février 2012.

Bernardara P., Andreewsky M. et Benoit M. (2011). - Application of regional frequency analysis to the estimation of extreme storm surges. *Journal of Geophysical Research*, **116**(2).

Coles S. G. et Tawn J. A. (1990). – Statistics of coastal flood prevention. *Phil Trans. R Soc*, **332**:457-476.

Coles S. (2001). - An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. *Springer Series in Statistics*.

Dixon M. J. et Tawn J. A., (1994). – *Extreme sea-levels at the UK A-class sites: site-by-site analyses*. Proudman Oceanographic Laboratory.

Hawkes P. J. (2005) – *Use of Joint Probability Methods in Flood Management*. Defra Environment Agency.

Pugh D. T. et Vassie J. M. (1980). – Application of the joint probability method for extreme sea level computations. *Proc. Instn Civ Engrs, Part 2*, **69**:959-975.

Pugh D. T. (1987). - *Tides, Surges and Mean Sea-Level*, Wiley. John & Sons, Chichester, 472 pages.

Pugh D. T. (2008). - *Changing Sea Levels, Effects of Tides, Weather and Climate*. Cambridge University Press.

Pineau-Guillou L., Lathuilière C. Magne R., Louazel S., Corman D. et Perherin C. (2011). – Caractérisation des niveaux marins et modélisation des surcotes pendant la tempête Xynthia. *Annales Hydrographiques du SHOM*, 6<sup>e</sup> série, **Vol.8**.

Pineau-Guillou L. et Perherin C., (2011). – Niveaux marins extrêmes de pleine et basse mer en Manche et Atlantique, *Annales Hydrographiques du SHOM*, 6<sup>e</sup> série, **Vol.8**.

R Development Core Team (2011). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3900051070, URL <http://www.Rproject.org/>.

Simon B. (1994). - Statistique des niveaux marins extrêmes le long des côtes de France. *Rapport d'étude SHOM n°001/94*.

---

Simon B. (2007). - *La marée océanique côtière*. Editions de l'Institut Océanographique.

Simon B. (2008). - *Les niveaux marins extrêmes le long des côtes de France et leur évolution*. Extrait du cédérom (CETMEF-SHOM, 2008).

SHOM-CETMEF (2008), *Statistiques de niveaux marins extrêmes de pleine mer Manche et Atlantique*. cédérom SHOM-CETMEF.

SHOM-CETMEF (2012), *Statistiques de niveaux marins extrêmes de pleine mer Manche et Atlantique*. cédérom SHOM-CETMEF.