

NIVEAUX MARINS EXTRÊMES DE PLEINE ET BASSE MER EN MANCHE ET ATLANTIQUE

par Lucia Pineau-Guillou¹, Céline Perherin²

RÉSUMÉ

La connaissance des niveaux marins extrêmes est primordiale pour les études portant sur les risques littoraux et pour tout aménagement littoral ou portuaire. Le produit « Statistiques des niveaux marins extrêmes de pleine mer Manche et Atlantique » (CETMEF-SHOM, 2008) présentait les résultats de traitements statistiques des niveaux marins et les cartes des niveaux marins extrêmes de pleine mer pour les périodes de retour 10, 20, 50 et 100 ans aux abords des côtes françaises Manche et Atlantique.

En 2010, cette étude a été étendue aux basses mers. Les niveaux extrêmes de pleine mer ont été calculés en prenant en compte des données de plus longue durée (5 années supplémentaires) par rapport à l'étude précédente. Un modèle numérique des niveaux extrêmes de pleine et basse mers sur une grille régulière sur les côtes françaises Manche et Atlantique a été produit. Les cartes des niveaux extrêmes de pleine et basse mers pour les périodes de retour 10, 20, 50 et 100 ans ont été fournies.

Les limites de la méthode utilisée ont été analysées, en particulier un certain nombre d'améliorations est envisagé comme l'analyse comparative de différentes méthodes statistiques, la prise en compte des surcotes dues au vagues ou encore l'analyse de la problématique des horsains.

ABSTRACT

The knowledge of extreme sea levels is of the most importance for the studies dealing with coastal hazards and all coastal and port developments. The study "Statistics of extreme sea levels of the English Channel and the Atlantic Ocean" (CETMEF-SHOM, 2008) presented the results of statistical sea levels treatments and maps of high tide extreme sea levels, for return periods of 10, 20, 50 and 100 years along the French coasts of the English Channel and the Atlantic Ocean.

In 2010, this study was extended to low tide levels. High tide extreme sea levels have been computed taking into account a longer data time series (5 years more). A numerical model of high and low tide extreme sea levels has been computed along the French coasts of the English Channel and the Atlantic Ocean. Maps of high and low tide extreme sea levels, for return periods of 10, 20, 50 and 100 years, have been produced.

The limitations of the method have been studied; some improvements must be developed as comparative analysis of different statistical methods, taking into account wave set-up and also "outlier" analysis (statistical anomalies).

¹Service hydrographique et océanographique de la marine, 13 rue du Chatellier - CS92803 - 29228 Brest Cedex 2 - France
Tel : 02 98 14 99 36
lucia.pineau-guillou@shom.fr

²Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales, Technopôle Brest Iroise - BP5 - F-28280 Plouzané - France
Tel : 02 98 05 76 53
Celine.Perherin@developpement-durable.gouv.fr

1. INTRODUCTION

L'étude consiste dans le calcul des niveaux marins extrêmes à partir de l'ensemble des données marégraphiques disponibles au SHOM, jusqu'en novembre 2009. La méthodologie est identique à celle décrite dans le cédérom commun SHOM-CETMEF de l'année 2008 sur les niveaux extrêmes (CETMEF-SHOM, 2008). L'objectif est d'une part d'actualiser les études précédentes sur les niveaux extrêmes de pleine mer (Simon, 1994) et (Simon, 2008), et d'autre part, de calculer les niveaux extrêmes de basse mer.

Les niveaux extrêmes sont calculés pour des périodes de retour de 10, 20, 50 et 100 ans, et cartographiés par rapport à l'IGN69 sur les côtes de la Manche et de l'Atlantique.

Le présent article présente la méthodologie utilisée, les résultats obtenus et les améliorations envisagées. Une attention particulière a été portée à la description des sources d'incertitude et des limitations associées à cette étude.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1 Données marégraphiques

Les données des marégraphes du SHOM sont enregistrées toutes les 10 minutes, avec un pas d'intégration de 2 minutes. 36 marégraphes permanents sont installés à la date du 1^{er} novembre 2010 (Figure 1), dont 6 dans les territoires d'outre-mer, un en Principauté de Monaco et un dans le port de Toamasina (Madagascar). En complément, les données des marégraphes temporaires du SHOM (marégraphes immergés sur des périodes courtes) ont également été exploitées.

Les résultats présentés dans cette étude sont basés sur l'analyse des **données horaires** des marégraphes du SHOM (permanents et temporaires), calculées à partir de l'interpolation des données à 10 minutes. Les surcotes/décotes mentionnées sont les **surcotes/décotes de pleine ou basse mer**, calculées en retranchant à la hauteur de pleine mer observée, la hauteur de pleine (ou basse) mer prédite.

2.2 Calcul des niveaux extrêmes aux ports de référence

Les ports de référence sont les ports pour lesquels plus de 10 années de mesures sont disponibles. 17 ports de référence sont retenus pour la cartographie des niveaux (Figure 5).

La méthodologie est identique aux précédentes études (Simon, 1994) et (Simon, 2008). Les densités de probabilité des hauteurs de pleine et basse mer sont calculées à partir des prédictions réalisées sur 18 ans à partir du 1^{er} janvier 1992. Les surcotes et décotes sont ajustées à la loi de Gumbel ; le seuil appliqué est de 20 cm pour les surcotes et 40 cm pour les décotes. Les périodes de retour des niveaux extrêmes sont calculées par convolution entre la loi de probabilité des hauteurs de pleine/basse mer prédites et la loi de répartition des surcotes/décotes. Les différents graphes obtenus à Brest sont présentés Figure 3.

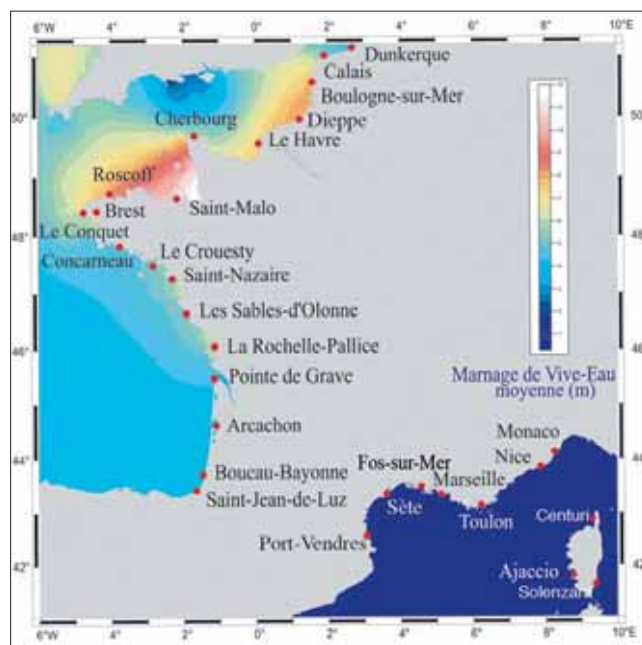


Figure 1. Réseau d'Observation du Niveau de la Mer (RONIM) du SHOM

(http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/maree/maree14.htm)

2.3 Calcul des niveaux extrêmes aux points secondaires

Les points secondaires disposent de mesures de courte durée. Seuls les points secondaires d'une durée minimale de un mois, et disposant de mesures simultanées avec le port de référence le plus proche ont été retenus. La répartition géographique de ces points est présentée Figure 2.

Les corrélations entre les surcotes au port de référence et au point secondaire permettent d'estimer la fonction de répartition des surcotes au point secondaire. Le calcul des périodes de retour des niveaux extrêmes est similaire au calcul effectué au port de référence.

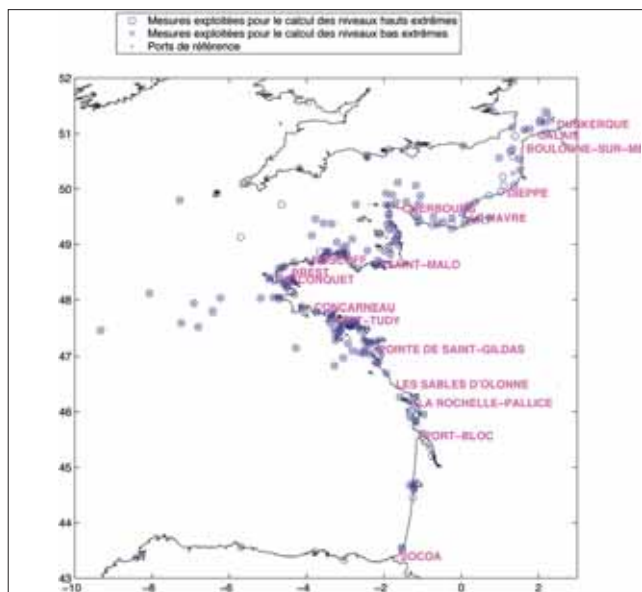


Figure 2. Mesures de hauteurs d'eau aux points secondaires exploitées pour l'interpolation spatiale

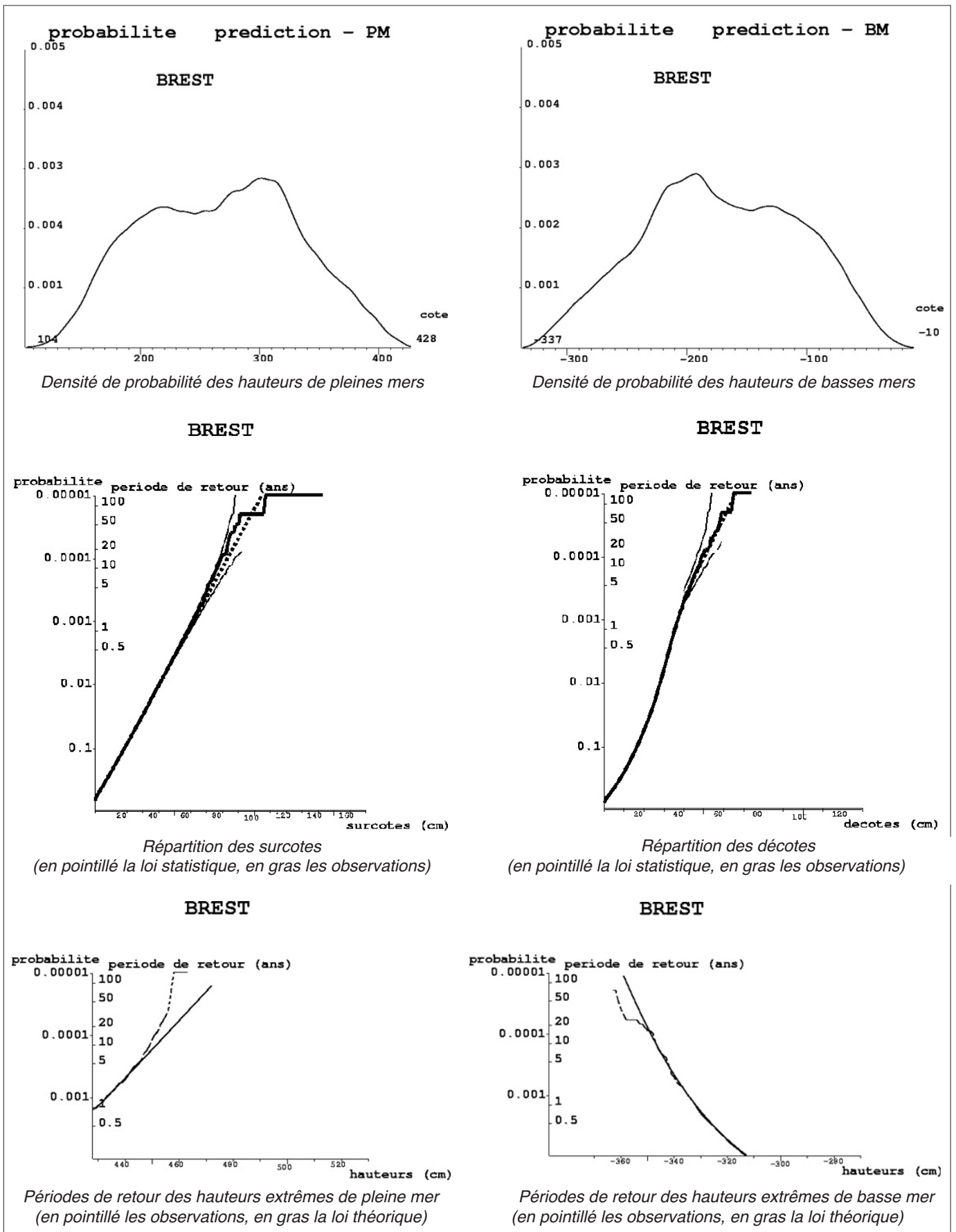


Figure 3. Statistiques des niveaux extrêmes à Brest

2.4 Interpolation des données

L'interpolation des données est effectuée à partir de la méthode de la plaque mince (Duchon, 1976), en passant exactement par chaque point de mesure. Les données sont interpolées sur une grille en différences finies, à pas constant de 1 minute. La grille est présentée Figure 4.

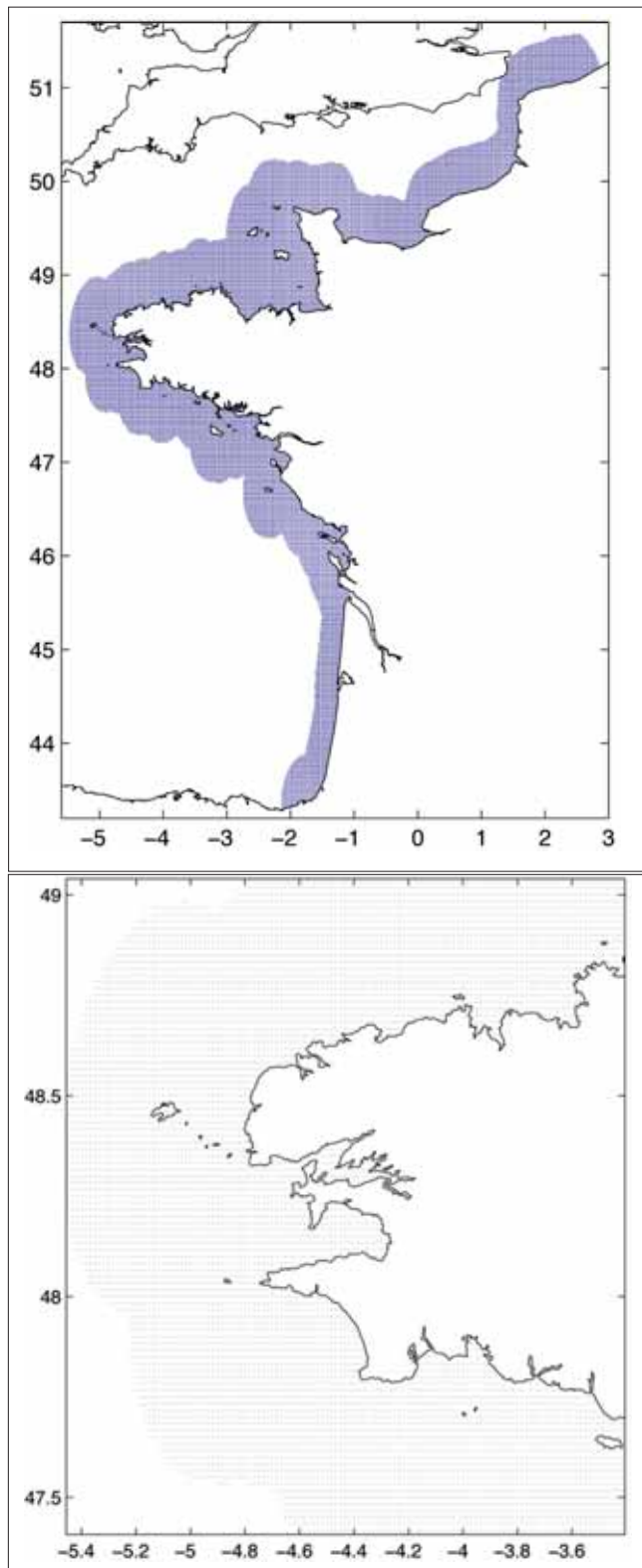


Figure 4. Grille de pas 1 minute

3. RÉSULTATS

3.1 Ports de référence

Les 17 ports de référence retenus sont présentés Figure 5. Les durées d'observations aux ports de référence sont récapitulées dans le tableau 1. La durée utile correspond à la durée d'observation sans lacune. Les valeurs numériques des niveaux extrêmes de pleine mer et basse mer ont été calculées pour les périodes de retours de 5, 10, 20, 50 et 100 ans.

3.2 Cartes des niveaux extrêmes

Les cartes de niveaux extrêmes de pleine et basse mer de période de retour 10 ans en Manche et Atlantique sont présentées Figure 6. Des cartes de niveaux extrêmes de pleine et basse mer pour des périodes de retour de 10, 20, 50 et 100 ans ont été réalisées.

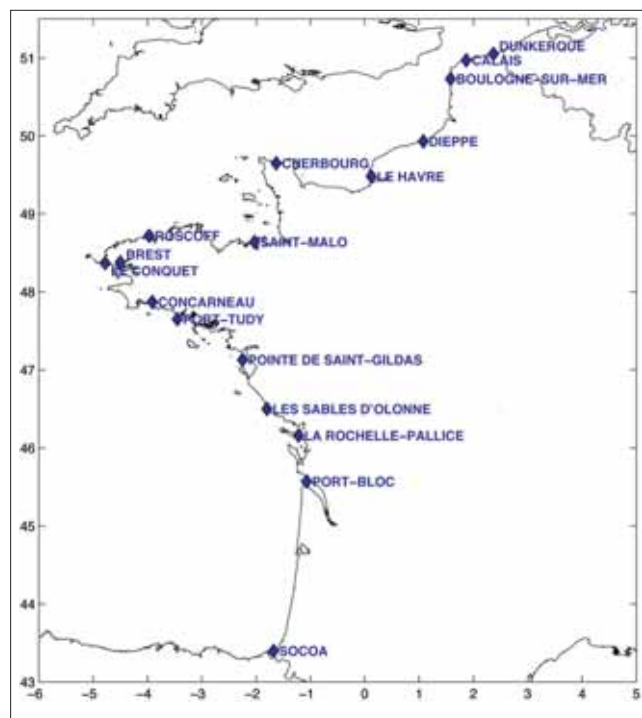


Figure 5. Ports de référence

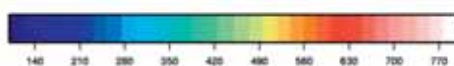
3.3 Étude de sensibilité

3.3.1 Seuil pour les surcotes

Pour l'ajustement statistique des surcotes, le seuil retenu pour les surcotes est de 20 cm. A Brest, différentes valeurs de surcotes minimales ont été testées : 20, 30, 40 et 50 cm. Cette étude de sensibilité montre que les valeurs extrêmes sont relativement peu sensibles au seuil choisi. Pour un seuil variant de 20 à 60 cm, les variations restent inférieures à 1 cm pour les niveaux centennaux.

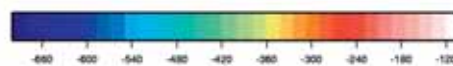
Tableau 1 : Durée d'observation aux ports de référence

| Port de référence | Début | Fin | Durée utile | Lacunes |
|-----------------------------|------------|------------|-------------|---------|
| Dunkerque | 07/06/1956 | 24/11/2009 | 41,0 ans | 23,3 % |
| Calais | 23/04/1985 | 17/06/2008 | 13,3 ans | 42,6 % |
| Boulogne-sur-mer | 08/09/1973 | 06/08/2007 | 20,8 ans | 38,6 % |
| Dieppe | 01/01/1954 | 25/11/2009 | 37,7 ans | 32,5 % |
| Le Havre | 18/09/1971 | 24/11/2009 | 35,4 ans | 7,4 % |
| Cherbourg | 26/06/1974 | 24/11/2009 | 33,7 ans | 4,8 % |
| Saint-Malo | 09/06/1986 | 24/11/2009 | 15,4 ans | 34,3 % |
| Roscoff | 01/01/1992 | 24/11/2009 | 16,9 ans | 5,7 % |
| Le Conquet | 22/12/1970 | 24/11/2009 | 37,3 ans | 4,2 % |
| Brest | 04/01/1846 | 24/11/2009 | 147,8 ans | 9,8 % |
| Concarneau | 29/06/1999 | 24/11/2009 | 10,0 ans | 3,5 % |
| Port-Tudy | 11/08/1966 | 29/12/2008 | 33,6 ans | 20,7 % |
| Pointe de Saint-Gildas | 07/06/1962 | 14/07/2005 | 24,8 ans | 42,5 % |
| Les Sables d'Olonne | 06/07/1965 | 24/11/2009 | 19,8 ans | 55,4 % |
| La Rochelle | 19/05/1941 | 24/11/2009 | 25,9 ans | 62,2 % |
| Port-Bloc (Pointe de Grave) | 19/04/1959 | 07/12/2009 | 21,9 ans | 56,7 % |
| Socoa (St Jean de Luz) | 21/11/1942 | 24/11/2009 | 37,5 ans | 44,0 % |



10 ans

cm



10 ans

cm

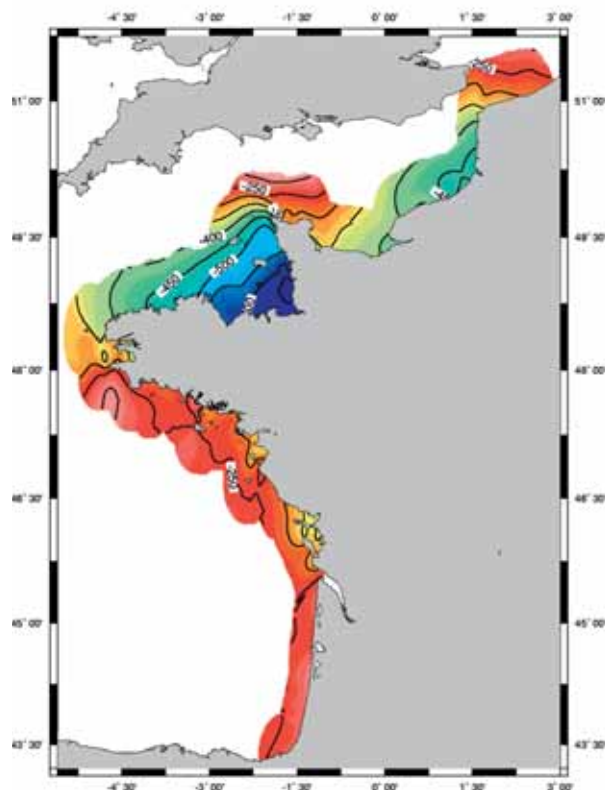
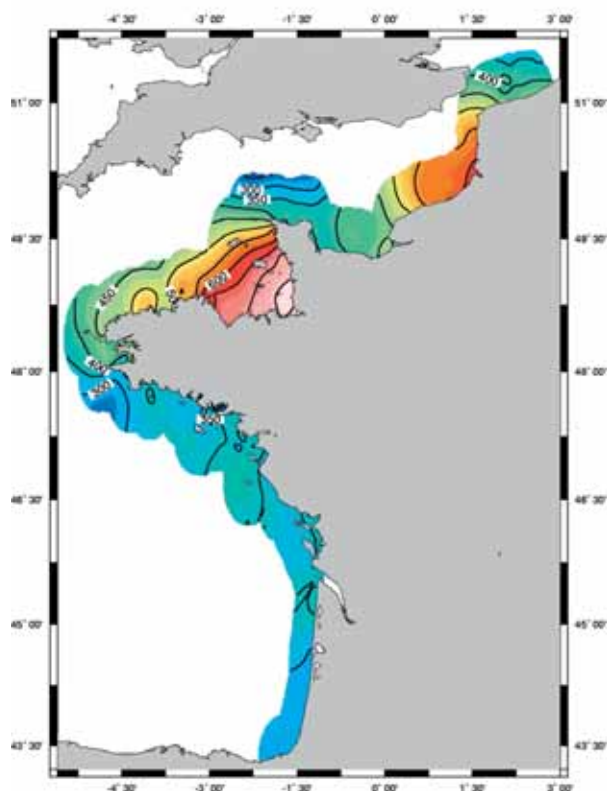


Figure 6. Niveaux extrêmes de pleine mer et basse mer de période de retour 10 ans en Manche et Atlantique

3.3.2.3 Durée des données

L'influence de la durée de l'échantillon de données a été réalisée à Brest en analysant un échantillon de durée variable : 10, 20, 50, 100 et 148 ans. Une durée de 10, 20, 50, 100 et 148 ans est associée à des niveaux centennaux respectivement de 469, 472, 472, 472 et 470 ans. Les variations restent inférieures à **2 cm**. On note en particulier que l'échantillon de 10 ans donne des niveaux extrêmes équivalents aux niveaux de référence à 1 cm près, alors que la tempête de 1987 n'est pas incluse (échantillon de données du 1/11/1999 au 24/11/2009).

Le fait de pouvoir calculer les niveaux centennaux à partir de 10 ans de données vient d'une part de la méthode de convolution, mais aussi du fait que, sur les côtes de la Manche et de l'Atlantique, la partie prédictible est bien plus importante que la partie surcotes/décotes vu l'amplitude de la marée, elle représente couramment plus de 90 % du signal ; hors la loi de répartition des hauteurs prédites est parfaitement connue. La validité des méthodes statistiques basées sur quelques dizaines d'années pour établir des périodes de retour centennales est cependant régulièrement remise en cause (Pedreros *et al.*, 2010) et (Bersani *et al.*, 2010).

3.3.2 Influence des événements historiques

Les données du 19 mai 1941 au 30 août 2010 (26,6 ans utile) ont été traitées à La Rochelle, en incluant ou pas la tempête Xynthia. Le fait d'inclure ou pas la tempête Xynthia entraîne une variation de **3 cm** sur le niveau centennal : il est estimé à 389 cm en prenant en compte la tempête Xynthia, 386 cm sans la prendre en compte.

Les données du 4 janvier 1846 au 24 novembre 2009 (147,8 ans utile) ont été traitées à Brest, en incluant ou pas la tempête de 1987. Le fait d'inclure ou pas la tempête de 1987 entraîne une variation de **1 cm** sur le niveau centennal : il est estimé à 470 cm en prenant en compte la tempête de 1987, 469 cm sans la prendre en compte. Il est probable que cet événement historique soit peu influent car l'échantillon est de durée suffisamment importante : 148 ans, alors qu'il n'y a que 26 ans à La Rochelle.

3.4 Sources d'incertitude

Les résultats présentés dans le cadre de cette étude présentent plusieurs incertitudes liées à :

- la qualité des données, aussi bien la qualité des observations que celle des prédictions. Concernant les observations, les erreurs peuvent provenir de problèmes instrumentaux (dérives en particulier), d'envasement des puits de tranquillisation des marégraphes, de numérisation des marégrammes... Concernant les prédictions, la qualité des constantes harmoniques dépend de la durée de l'observation, elles sont constamment améliorées au SHOM ;
- la durée des échantillons de données, l'ajout de plusieurs années de données impacte les résultats ;
- le choix des seuils et des lois statistiques utilisées pour ajuster la distribution des surcotes ;
- le manque de mesures dans certaines zones, comme par exemple le golfe de Gascogne (Figure 3) : l'absence de mesures au large implique que la cartographie est basée sur des extrapolations, dont la précision est faible ;

- la dépendance entre marée et surcote, bien que l'étude réalisée en 1994 (Simon, 1994) tende à prouver une indépendance entre marée et surcotes en dehors des zones estuariennes ;
- les horsains : il s'agit d'événements atypiques, dont la valeur s'éloigne de la courbe théorique, issue de l'analyse statistique des données disponibles sur le site d'observation ;
- la méthodologie d'interpolation spatiale.

3.5 Limitations

Outre les incertitudes rappelées dans le paragraphe précédent, les résultats de cette étude ne sont pas valables en zone estuarienne (car l'hypothèse de l'indépendance marée et surcotes n'est plus vraie) et dans le bassin d'Arcachon.

De plus, certains phénomènes ne sont pas toujours pris en compte au niveau des marégraphes comme le « wave set-up », le « run-up » ou encore les seiches. Le « wave set-up », ou surcote due aux vagues, correspond à l'augmentation du niveau moyen de la mer dû au déferlement des vagues. Il peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres. Le « run-up » correspond au niveau maximal atteint par le jet de rive (swash), c'est-à-dire le flux et reflux des vagues. Il n'est pas mesuré par les marégraphes, les données étant généralement intégrées sur 2 minutes. Ce niveau peut dépasser 1 mètre. Les seiches sont filtrées au niveau des marégraphes, car les données exploitées sont des données horaires, alors que la période des seiches est de l'ordre de quelques minutes. Pour autant, leur amplitude est loin d'être négligeable, elle peut atteindre jusqu'à 1,70 m à Port-Tudy, sur l'île de Groix (Devaux, 2009).

Les niveaux maximums instantanés atteints en zone très littorale peuvent donc dépasser largement les niveaux cartographiés, en particulier à cause des seiches, du « wave set-up » et du « run-up ».

3.6 Différences par rapport à la version précédente

Les résultats obtenus diffèrent des précédentes versions (Simon, 1994) et (Simon, 2008) pour les raisons suivantes :

- données de plus longue durée,
- nombre de ports de référence plus important,
- méthode d'interpolation spatiale différente,
- évolution du niveau de la mer (le niveau moyen des prédictions est celui calculé à la fin de la période de mesures, donc en 2009),
- mise à jour des constantes harmoniques.

4. AMÉLIORATIONS ENVISAGÉES

Un certain nombre d'améliorations sont à prévoir pour le calcul des niveaux extrêmes.

- Qualification des résultats :
 - calcul des intervalles de confiance sur les surcotes et les niveaux d'eau,
 - prise en compte de l'incertitude liée à la qualité de la donnée,
 - estimation de l'erreur en fonction de la durée des séries,
 - méthodologie à définir pour permettre la cartographie de la précision des résultats .
- Amélioration des méthodes :

- analyse comparative de différentes lois d'ajustement,
- amélioration des méthodes d'interpolation spatiale des données,
- analyse et amélioration de la prise en compte des hors-sains,
- analyse de la dépendance marée/surcotes,
- analyse de l'impact de la reconstitution de données, dans le cas de défaillance des instruments (en particulier la prise en compte de résultats de modèles numériques).
- Prise en compte de phénomènes physiques :
 - estimation de l'effet de la surcote liée aux vagues (wave set-up),
 - estimation de l'impact des seiches,
 - étude de l'impact du changement climatique.
- Extension géographique :
 - zones estuariennes,
 - méditerranée,
 - DOM-COM.

L'extension géographique de cette étude implique une révision complète de la méthodologie actuelle, car la méthode développée tire profit de la prépondérance de la marée par rapport aux surcotes, ce qui n'est pas le cas en Méditerranée ou dans les DOM-COM. De plus, dans les DOM-COM, une méthodologie particulière doit être appliquée sur les séries de données du fait des événements cycloniques. Enfin, dans les zones estuariennes, la méthode actuelle ne peut être appliquée car elle est basée sur l'indépendance de la marée et des surcotes, ce qui n'est plus vérifiée.

5. CONCLUSIONS

Cette étude a permis d'actualiser les études précédentes sur les niveaux extrêmes de pleine mer (Simon, 1994) et (Simon, 2008) et de cartographier, avec une méthodologie identique, les niveaux extrêmes de basse mer sur les côtes de la Manche et de l'Atlantique. Les niveaux extrêmes ont été calculés pour des périodes de retour de 10, 20, 50 et 100 ans, et cartographiés par rapport à l'IGN69 sur les côtes de la Manche et de l'Atlantique.

L'étude de sensibilité tend à montrer que la méthode employée permet en se basant sur des données d'observations de courte durée (10 ans) d'estimer des niveaux centennaux avec une précision raisonnable par rapport à un échantillon de plus longue durée : en effet, une variation de la durée des données de 10 à 148 ans à Brest a une influence inférieure à 2 cm sur le calcul des niveaux centennaux. Il apparaît également que la prise en compte d'un seul événement historique a une influence limitée sur les résultats ; en effet, la prise en compte de la tempête du 15 octobre 1987 à Brest ou de la tempête Xynthia à La Rochelle entraîne des variations sur le calcul du niveau centennal respectivement de 1 et 3 cm.

L'analyse des résultats a montré la nécessité de développements supplémentaires :

- pour mieux qualifier les résultats,
- pour améliorer la méthodologie,
- pour estimer l'impact des vagues et des seiches,
- pour prendre en compte le changement climatique,
- pour étendre géographiquement cette étude (zones estuariennes, Méditerranée, DOM-COM).

L'extension géographique de cette étude implique une révision complète de la méthodologie actuelle.

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bersani C., Dumas P., Rouzeau M., Gérard F., Gondran O., Helias A., Martin X., Puech P., Fleury B., Greff M., Bougere R., Trepos Y., (2010), « *Tempête Xynthia - Retour d'expérience, évaluation et propositions d'action – Tome I : Rapport* », Rapport du Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, Mai 2010
<http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/104000293/>

CETMEF, (2001), « *Recommandations pour le calcul aux états-limites des Ouvrages en Site Aquatique* », Cédérom ROSA 2000
<http://www.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/portuaire/rosa-2000.html>

CETMEF-SHOM, (2008), « *Statistiques des niveaux marins extrêmes de pleine mer Manche et Atlantique (2008)* », Cédérom commun SHOM-CETMEF

Devaux E., (2009), « *Analyse des seiches à partir de l'exploitation de données marégraphiques – Exploitation graphique, analyse séquentielle et recherche d'éléments déclencheurs* », Rapport ENTPE-SHOM, Juin 2009

Duchon J., (1976), « *Interpolation des fonctions de deux variables suivant le principe de la flexion des plaques minces* », Revue française d'automatique, informatique, recherche opérationnelle, série analyse numérique, vol.10, n°12, décembre 1976, pp 5-12

Lafon F., (2009), « *Refonte de la Règle Fondamentale de Sécurité relative au risque d'inondation externe* », Guide méthodologique de caractérisation des niveaux hauts extrêmes de la mer. Guide EDF, Contributeurs SHOM/CETMEF/EDF.

Pineau-Guillou L., Lathuilière C., Magne R., Louazel S., Corman D., Perherin C., (2010), « *Caractérisation des niveaux marins extrêmes et modélisation des surcotes pendant la tempête Xynthia* », Actes des XIèmes Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil
http://www.paralia.fr/jngcgc/11_73_pineau.pdf

Pedreras R., Garcin R., Krienn Y., Monfort Climent D., Murgica J., François B., (2010), « *Tempête Xynthia : compte-rendu de mission préliminaire* », Rapport BRGM/RP-58261-FR, Mars 2010.

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, 433 pages.

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