

CETMEF/DI/IE/IAR N° 13-005  
SHOM/DOPS/MIP/HDC N° 9

**Objet :** Note méthodologique relative au produit « *Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France* » Edition 2012

**Pièces complémentaires en téléchargement sur le site du CETMEF et du SHOM :**

Cartes des niveaux marins centennaux maximums des produits 2008 et 2012

- carte à l'échelle des côtes de France (Manche et Atlantique)
- cartes par secteur

**Sommaire:**

Résumé

1. Introduction
2. Présentation de la méthode
3. Limites de la méthode
4. Explication des différences observées entre les produits 2008 et 2012
5. Conseils pour l'utilisation des données
6. Pistes d'amélioration du produit
7. Annexe : éléments cartographiques complémentaires téléchargeables

## Résumé

La connaissance des niveaux marins extrêmes est essentielle dans le cadre de la sécurité de la navigation, du dimensionnement des ouvrages et de la prévention des risques de submersion. Deux approches permettent d'apprécier les niveaux marins extrêmes : une approche empirique « historique » de recensement des niveaux atteints dans le passé ou une approche théorique déduisant les niveaux extrêmes d'une analyse statistique de mesures marégraphiques.

Cette dernière approche a été initiée en 1994 pour améliorer la délimitation du domaine public maritime. Depuis, et pour répondre à des problématiques plus larges, des rapports d'étude sont régulièrement publiés par le SHOM et le CETMEF sur les statistiques des niveaux marins extrêmes le long des côtes de la Manche et de l'Atlantique. L'étude des niveaux marins extrêmes de pleine mer y est réalisée par analyse statistique des mesures marégraphiques en plusieurs sites (dits "principaux" pour des points disposant de plus de 10 ans de mesure et dits "secondaires" pour des points disposant de moins de 10 ans de mesure), puis par interpolation géographique entre ces points, permettant ainsi la production de cartes de niveaux marins de période de retour donnée (10, 20, 50 et 100 ans).

Un produit résultant de ces études a été publié en 2008. Une réactualisation de ce produit a été diffusée en 2012. L'évolution des résultats entre ces deux éditions s'explique par l'évolution des jeux de données utilisés et par des évolutions méthodologiques. Les jeux de données ont pu bénéficier d'une période d'observation plus longue : la qualité des résultats obtenus pour l'ensemble des sites d'observations retenus pour l'étude 2012 (ports principaux et sites secondaires) est ainsi fortement améliorée. La principale différence méthodologique entre l'édition 2008 et l'édition 2012 concerne l'application de la méthode d'interpolation entre les points de mesure : l'amélioration du processus de sélection des sites secondaires retenus pour l'édition 2012 a permis l'utilisation d'une interpolation par plaque mince "exacte" plutôt que l'utilisation d'une interpolation par plaque mince "pondérée" utilisée en 2008. Les incertitudes associées aux différentes méthodes d'interpolation géographique n'ont toutefois pas encore été étudiées.

Des différences importantes, de l'ordre de plusieurs dizaines de centimètres, entre les niveaux marins centennaux de pleine mer des études de 2008 et de 2012 ont été constatées à distance des points de mesure. L'absence d'estimation des incertitudes liées à l'interpolation ne permet pas de quantifier la fiabilité des résultats en dehors des points de mesure. Dans le cadre d'une première approche de connaissance des niveaux marins extrêmes jusqu'à la période de retour centennale, les résultats des produits SHOM-CETMEF sur les niveaux marins extrêmes peuvent être considérés et utilisés en connaissance de leurs limites. Il est à ce jour conseillé de retenir aux points de mesure principaux les résultats du produit 2012, en retenant que l'estimation statistique est toujours associée à un intervalle de confiance, et, en dehors de ces points de mesure, le niveau marin maximal des produits de 2008 et de 2012 (cf. Figure 1). Ces résultats ne constituent toutefois qu'une première approche de l'estimation des niveaux marins extrêmes qu'il est recommandé d'approfondir systématiquement (recherche d'observations ou de mesures de niveaux hauts historiques, analyse des phénomènes composant le niveau marin...).

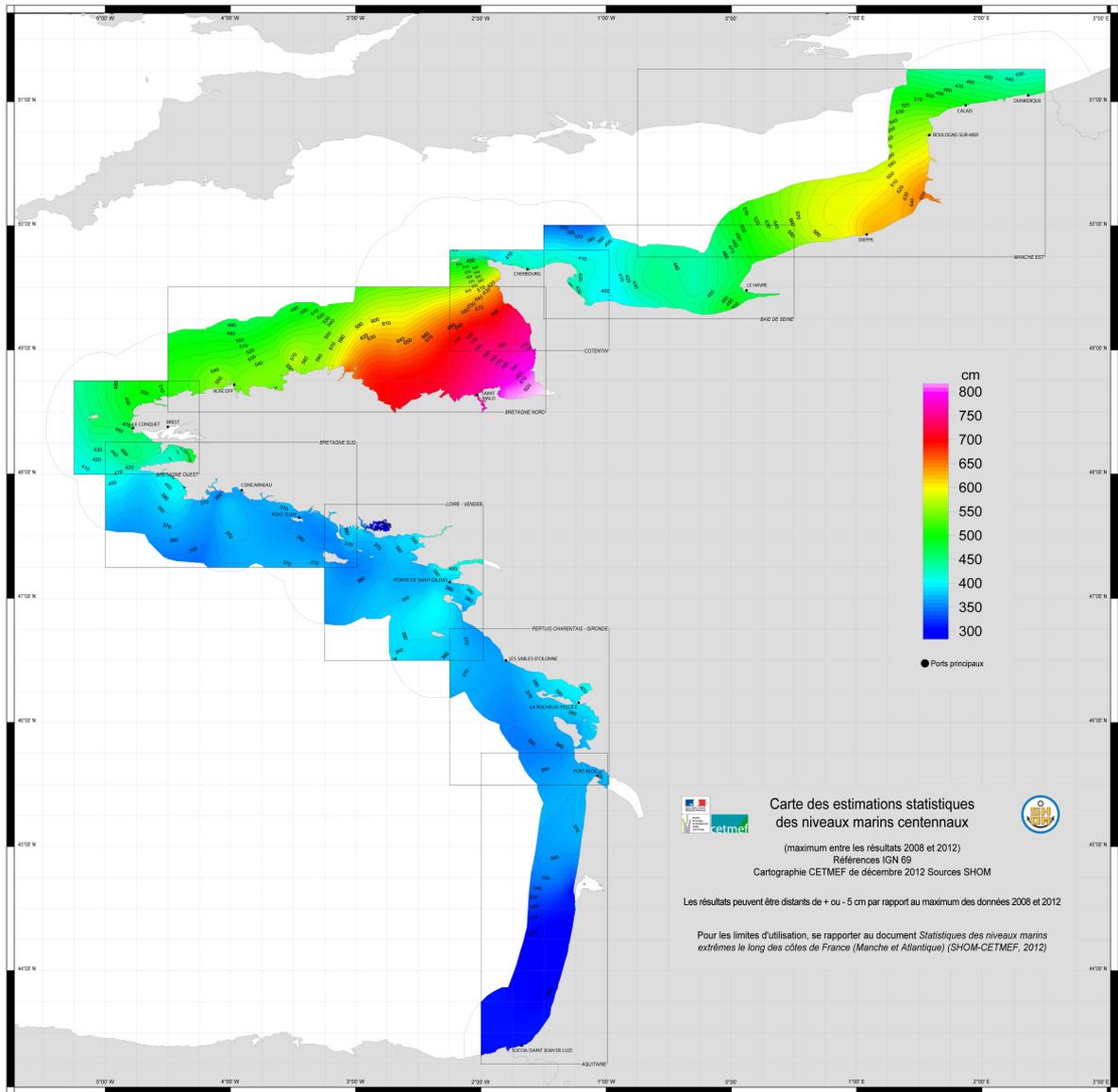


Figure 1 : Carte composite des niveaux marins centennaux maximums des produits 2008 et 2012. Les niveaux sont cotés par rapport à l'IGN69.

## 1 Introduction

Le niveau marin observé, à un instant donné, résulte de la combinaison de plusieurs composantes associées à différents phénomènes élémentaires. Ce niveau oscille autour du niveau moyen des mers en fonction de :

- la marée : ce phénomène est déterministe et prédictible. Il est directement lié aux mouvements des astres et à leurs variations saisonnières. Sa composante principale sur les côtes de l'Atlantique et de la Manche a une périodicité semi-diurne.
- les surcotes/décotes d'origine météorologique : ces phénomènes sont la manifestation des effets des paramètres atmosphériques que sont la pression (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, trait de côte, nature des fonds marins). Une tempête peut générer des pics de surcotes pendant quelques heures à 2 ou 3 jours.
- la surcote liée aux vagues : surcote supplémentaire (wave set-up) à la côte générée par le déferlement des vagues.
- 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).

Par ailleurs, l'eustatisme est une variation lente du niveau moyen des mers, observable à l'échelle mondiale. Cette évolution, actuellement à la hausse, liée à la variation des niveaux des continents, est accentuée par les effets du changement climatique actuellement observés (fonte des glaces, dilatation, modification de la circulation océanique générale, ..).

Ces phénomènes élémentaires se produisent à des échelles de temps différentes. Le niveau marin observé subit ainsi des variations temporelles complexes. Les dépressions atmosphériques, engendrant des surcotes météorologiques, peuvent être à l'origine de niveaux marins particulièrement hauts. Afin d'estimer la probabilité que soient atteints ou dépassés ces niveaux hauts, et ainsi estimer leur période de retour, une analyse des observations disponibles est nécessaire. La période de retour est définie comme le temps moyen séparant deux réalisations d'un événement ; si cet événement est le dépassement par une variable d'un seuil donné, la période de retour désigne le temps moyen séparant deux dépassements successifs de seuil. Par contre elle ne fait pas référence à la périodicité d'un phénomène dans le temps. L'événement peut ainsi se produire deux fois de suite puis rester très longtemps sans se produire.

Les mesures marégraphiques sont parmi les principales sources d'information sur les niveaux marins à la côte. Ils permettent une estimation statistique des niveaux marins extrêmes aux points de mesure. Cependant, les marégraphes sont généralement situés dans les ports. Ils n'enregistrent donc pas l'ensemble des phénomènes côtiers qui peuvent intervenir en dehors de ces points de mesure spécifiques. En dehors des ports, les surcotes liées aux vagues peuvent être plus importantes. Aussi, les analyses menées à partir des seules mesures marégraphiques portuaires ne permettent qu'une estimation des niveaux marins extrêmes sans prise en compte de l'ensemble des effets, notamment ceux liés aux vagues.

## 2 Présentation de la méthode

La cartographie des niveaux marins extrêmes repose sur l'évaluation statistique des niveaux marins pour des ports principaux (ports pour lesquels il existe plus de 10 ans de mesures consolidées) et pour des sites secondaires (ports côtiers ou sites au large pour lesquels on dispose de moins de 10 ans de mesures consolidées). Une cartographie continue des niveaux marins est obtenue *in fine* par application d'une méthode d'interpolation spatiale permettant de relier les statistiques obtenues pour chacun des sites.

Pour chaque port principal/site secondaire, les niveaux extrêmes statistiques correspondant à une période de retour donnée sont évalués à partir de lois de probabilité calculées à partir des observations de niveaux d'eau (marégraphes) et des prédictions de marée. La méthode retenue pour le calcul de ces lois de probabilité repose séparément, d'une part sur l'analyse statistique des surcotes, d'autre part sur le calcul des probabilités des niveaux générés par les marées prédites de pleine mer, puis sur la combinaison des deux lois de probabilité obtenues (méthode des probabilités conjointes).

Pour les ports principaux, la loi de probabilité retenue pour l'ajustement des surcotes de pleine mer est la loi de Gumbel. Les paramètres de cette loi sont ajustés aux données disponibles pour chaque site, la loi adoptée permettant ensuite d'extrapoler les calculs pour des périodes de retour allant jusqu'à 100 ans. Pour les sites secondaires, le nombre de valeurs de surcotes observées n'est pas suffisant pour ajuster directement une loi à l'échantillon (moins de 10 ans d'observation). La loi de répartition des surcotes de pleine mer pour un site secondaire est alors déduite de celle du port principal le plus proche (en distance ou en similarité de comportement hydrodynamique). Pour cela, on s'appuie sur l'évaluation de la corrélation entre les surcotes observées au site secondaire et celles observées simultanément au port principal choisi. In fine, pour chaque site, la loi de probabilité conjointe permet d'associer un niveau d'eau à une probabilité d'occurrence dont on déduit la période de retour. Les valeurs des niveaux déterminés en chaque point de mesure pour une période de retour donnée (10, 20, 50 ou 100 ans) sont les valeurs utilisées en entrée de la méthode d'interpolation spatiale.

La méthode d'interpolation spatiale retenue est celle de la plaque mince, avec une plaque mince pouvant passer exactement ou au voisinage de chaque point de mesure. Les points de mesure sont les ports principaux et sites secondaires. L'application de la méthode d'interpolation spatiale permet de fournir pour chaque période de retour une représentation d'ensemble du niveau extrême sur une grille maillée à l'échelle du littoral Manche et Atlantique, puis une représentation cartographique sous forme d'isolignes de niveaux.

### La méthode permet de fournir :

- **pour tous les ports principaux, la loi de probabilité des niveaux extrêmes de pleine mer permettant de déduire les niveaux correspondant à une période de retour donnée;**
- **une cartographie générale des niveaux extrêmes de pleine mer sur les côtes de la Manche et de l'Atlantique (isolignes de niveaux), pour plusieurs périodes de retour (10, 20, 50 ou 100 ans).**

### 3 Limites de la méthode

Les sources d'incertitudes des résultats et les limitations de la méthode ont fait l'objet d'un paragraphe dans le rapport du produit Statistiques de Niveaux Extrêmes (§2.3.3-2.3.4 pages 30-31) et ne seront pas intégralement rappelées ici. Les principales limitations impactant la compréhension ou l'utilisation du produit sont :

- La méthodologie mise en œuvre ne prend pas en compte la contribution des seiches, vagues et phénomènes haute fréquence, non mesurés, pour établir les niveaux marins extrêmes de référence. Cet aspect relève encore du domaine de la recherche et du développement.
- La méthodologie repose sur l'hypothèse d'indépendance entre marée et surcote. Cette hypothèse n'est pas systématiquement valide dans les zones de bassin et d'estuaire. Les résultats ne sont donc pas valables en zone estuarienne et dans le bassin d'Arcachon. Ces zones ne sont d'ailleurs pas couvertes par le produit cartographique.
- Les intervalles d'erreur/incertitude sur les résultats (ports principaux) n'ont pas été quantifiés : erreur liée à la qualité et durée des échantillons de données, et intervalles de confiance correspondant aux ajustements statistiques (surcotes puis niveaux). Qualitativement, pour un port principal, l'incertitude associée à un niveau statistique sera d'autant plus faible que le rapport *durée de l'échantillon/période de retour* estimée sera grand.
- La méthode suppose que les surcotes extrêmes à un port secondaire suivent, à un coefficient de proportionnalité près, la même loi de probabilité que celles du port principal le plus proche.
- La densité de points de mesure (ports principaux et sites secondaires) utilisés pour l'interpolation géographique est globalement considérée comme suffisante compte tenu de la variabilité spatiale des phénomènes étudiés, à l'exception de la zone Aquitaine, et de certaines zones en configuration de baies (baie du Mont St Michel, baie de Douarnenez...).
- La méthode d'interpolation géographique retenue (plaque mince) est une méthode purement géométrique. De plus, comme toute méthode d'interpolation, la méthode interpole entre des points de mesure, et extrapole au-delà des points de mesure. Les résultats sont modérément fiables dans les zones d'interpolation, et peu fiables dans les zones d'extrapolation où des artefacts de calcul peuvent apparaître. Les zones soumises à une extrapolation sont les fonds de baie où il n'existe pas de point de mesure simultanée au port principal le plus proche (ex : baie du Mont St Michel). Les incertitudes associées à ces interpolations n'ont pu être estimées.

**Pour l'utilisation du produit, on retiendra que :**

- **les résultats sont plus précis aux ports principaux ;**
- **les incertitudes sur les niveaux de référence croissent avec la période de retour considérée ;**
- **les incertitudes sur les résultats sont plus fortes dans les fonds de baie (typiquement Baie du Mont St Michel) et les zones littorales où il existe moins de points de mesure (Aquitaine) ;**

- **les résultats de l'étude ne sont pas valables en zone estuarienne et dans le bassin d'Arcachon.**

#### **4 Explication des différences observées entre les produits 2008 et 2012**

Les différences observées entre les résultats cartographiques des deux éditions (2008 et 2012) proviennent de l'évolution des jeux de données exploités, et de l'évolution de la méthodologie employée.

##### **4.1 Évolution entre le produit 2008 et le produit 2012 – Concernant les jeux de données**

Concernant les séries d'observations :

- le nombre de ports principaux et de sites secondaires exploités a augmenté ;
- la durée des séries d'observations des ports principaux est plus longue dans la plupart des cas (entre +2 ans et +9 ans) ;
- un nouveau contrôle qualité des séries d'observations des ports principaux et des sites secondaires a été effectué, et certaines périodes douteuses ont été supprimées dans les jeux de données ;
- la sélection des sites secondaires pour le produit 2012 a fait l'objet d'une validation à partir de critères hydrodynamiques.

Concernant les séries de prédictions:

- les constantes harmoniques nécessaires au calcul de séries de prédiction de marée ont été mises à jour entre le produit 2008 et le produit 2012 ;
- pour un port donné, le niveau moyen des prédictions est le niveau moyen calculé à la fin de la période de mesure considérée, le niveau marin moyen ayant évolué entre 2008 et 2012.

**L'ensemble des évolutions ci-dessus va dans le sens d'une meilleure qualité des résultats obtenus pour l'ensemble des sites d'observations retenus pour l'étude (observatoires principaux et secondaires).**

##### **4.2 Évolution entre le produit 2008 et le produit 2012 – Concernant la méthodologie**

On relève une seule différence d'ordre méthodologique entre l'édition 2008 et l'édition 2012. Elle concerne l'application de la méthode d'interpolation géographique (plaque mince) entre les points de mesure.

Dans l'édition de 2012, le choix a été fait de mettre en œuvre une *plaque mince "exacte"*, passant strictement par tous les points de mesure (ports principaux et sites secondaires). Dans l'édition de 2008, le choix avait été fait de mettre en œuvre une *plaque mince "pondérée"*. La *plaque mince "pondérée"* passe exactement par les valeurs des ports principaux mais n'est pas strictement contrainte par les sites secondaires. Au niveau des sites secondaires, la distance maximale autorisée entre la valeur de la plaque mince et la valeur réelle est fonction d'un degré de confiance accordé à la valeur du site.

L'amélioration du processus de sélection des sites secondaires retenus pour l'édition 2012 justifie en partie l'utilisation d'une *plaque mince "exacte"*, puisque la confiance accordée en ces points de mesure est considérée comme meilleure que pour le produit 2008. Sinon, lorsque les mesures présentent une incertitude importante, il est d'usage de rechercher une surface d'interpolation de type *plaque mince "pondérée"*.

**Il n'est pas possible aujourd'hui de distinguer directement la part liée à l'évolution des jeux de données de celle liée au choix de la méthode d'interpolation dans les différences observées dans les résultats cartographiques, et d'indiquer quel produit privilégier. Les incertitudes associées aux interpolations n'ont en effet pu être estimées. Pour cela, des recommandations d'usage sont fournies ci-après.**

## 5 Conseils pour l'utilisation des données

La réactualisation de l'étude sur les niveaux marins extrêmes publiée en 2012 a bénéficié de périodes d'observation étendues, requalifiées et de l'apport de nouveaux points de mesure. Ainsi, les résultats de cette étude aux points de mesures principaux sont à privilégier.

En dehors de ces points, l'interpolation géographique amène des incertitudes supplémentaires, d'autant plus dans les zones peu couvertes par des points de mesure. Si les résultats des analyses statistiques aux ports principaux évoluent peu (différences observées inférieures à 10 cm pour le niveau centennal), le choix de la méthode d'interpolation combiné à l'utilisation d'un réseau de points secondaires plus dense peut amener des différences significatives, de plusieurs dizaines de centimètres pour le niveau centennal, entre les 2 produits. Il n'est pas possible de savoir a priori quel produit rend le mieux compte des niveaux marins en dehors des points de mesures des ports principaux. Pour cela, il est conseillé de :

- vérifier que la zone étudiée se trouve dans le domaine de validité des résultats de l'étude (hors estuaire et bassin, dans le domaine d'interpolation entre des points d'observations principaux et/ou secondaires) ;
- situer la zone étudiée par rapport aux points de mesure : plus la zone étudiée se trouve éloignée de points de mesure, plus l'incertitude sur le résultat est grande quel que soit le produit utilisé ;
- retenir les valeurs des estimations de niveaux marins du produit 2012 aux ports principaux et en dehors de ces ports, par sécurité, retenir la valeur maximum entre le niveau marin proposé dans le produit de 2008 et celui du produit 2012.

Par ailleurs, 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 marins statistiques, puisqu'il ne s'agit en général pas de mesures issues de marégraphes. En revanche, ils permettent d'apporter une information de niveau atteint en conditions exceptionnelles. La confrontation de ces niveaux aux niveaux marins statistiques centennaux à la côte permet de déterminer l'événement de référence à retenir dans le cadre d'études d'aléa submersion marine, notamment dans le cadre des études préalables à l'élaboration de PPRL. Dans les cas où des informations sur les niveaux marins historiques n'ont pu être collectées, et en dehors des secteurs de mesures (ports principaux), compte tenu des fortes incertitudes concernant les résultats de

l'interpolation géographique, il est recommandé de retenir, à partir des produits de 2008 et 2012, le niveau marin centennal le plus haut.

## 6 Pistes d'amélioration du produit

La piste principale d'amélioration concerne la méthode d'interpolation géographique et de détermination de l'incertitude associée. La mise en œuvre d'améliorations sur cette méthode constitue un enjeu technique et opérationnel de manière à produire, au moins le long du littoral côtier, une représentation continue et de précision qualifiée des niveaux extrêmes entre les sites d'observations. Un projet commun, en cours d'élaboration entre le CETMEF et le SHOM, vise à tester d'autres méthodes d'interpolation.

Dans un premier temps, un effort d'analyse par rejeu des méthodes d'interpolation utilisées jusqu'ici (influence des jeux de données, pertinence de l'introduction de sites secondaires, comparaison des modèles d'interpolation utilisés,...) est en cours au SHOM, en vue d'estimer les incertitudes associées à la méthode d'interpolation par plaque mince choisie. Un effort supplémentaire sera également nécessaire pour explorer les domaines de validité de ces méthodes (méthodologie, données prises en compte et pré-traitement de ces données...).

L'exploration de nouvelles méthodes d'interpolation constituera la seconde étape d'amélioration. Des méthodes d'interpolation pondérée par des paramètres tels que la bathymétrie ou les intervalles de confiance sont envisagées. Des interpolations séparées des niveaux de pleine mer prédits et de la surcote, ensuite convolués, sont également envisagées. Les modalités de mise en œuvre concrète de cet effort restent à définir à ce jour.

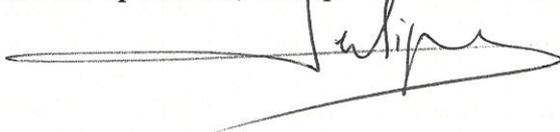
En parallèle, un contrat de recherche en cours entre le CETMEF, EDF, le SHOM et la DGPR porte sur l'«Estimation des surcotes et niveaux marins extrêmes en Manche, Atlantique et Méditerranée». Il permettra d'explorer les pistes d'amélioration des estimations statistiques aux ports principaux et à leur voisinage principalement par la prise en compte de la surélévation due aux vagues et par le calcul d'intervalles de confiance. Une méthode d'interpolation géographique devra être adaptée à ce nouvel enjeu.

## 7 Annexe : éléments cartographiques téléchargeables

Afin de permettre de suivre les recommandations formulées dans la présente note, une carte représentant la valeur maximum du niveau marin centennal entre les produits 2008 et 2012 a été fournie en résumé (Figure 1). Cette carte à petite échelle ainsi que des cartes par secteur, de meilleure résolution graphique, sont proposées au téléchargement sur les sites internet du CETMEF et du SHOM.

Fait le : 15 / 01 / 2013

Pour le directeur général du SHOM,  
l'ingénieur en chef de l'armement Laurent Kerléguer  
directeur des opérations, de la production et des services



Fait le : 21 / 01 / 2013

Le directeur du CETMEF

Pour le directeur du CETMEF  
par délégation  
le directeur adjoint

  
Olivier PIET