



# 16<sup>èmes</sup> Journées de l'Hydrodynamique

27-29 novembre 2018 - Marseille



## ANEMOC-3 : AMÉLIORATION DE LA BASE DE DONNÉES D'ÉTAT DE MER ANEMOC-2 PAR PRISE EN COMPTE DES EFFETS DE LA MARÉE

### *ANEMOC-3: IMPROVING THE ANEMOC-2 SEA STATE DATABASE BY ADDING TIDE EFFECTS*

C. RAOULT<sup>(1)</sup>, A. JOLY<sup>(1,2)</sup>, M. ANDREEVSKY<sup>(2)</sup>, A. JOLY-LAUGEL<sup>(3)</sup>

*cecile.raoult@gmail.com; antoine.joly@edf.fr; marc.andreevsky@edf.fr;*

*amelie.joly-laugel@edfenergy.com*

<sup>(1)</sup>Université Paris-Est, Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant, ENPC, EDF R&D, Cerema, Chatou, France

<sup>(2)</sup>EDF R&D, LNHE, Chatou, France

<sup>(3)</sup>EDF Energy R&D UK Centre, Croydon, UK

### Résumé

Afin de répondre aux besoins de l'ingénierie maritime, des bases de données d'état de mer obtenues par simulations rétrospectives sont construites. La base de données ANEMOC-3 Manche-Atlantique a été réalisée pour prendre en compte les effets des variations du niveau d'eau et les courants liées à la marée et aux conditions météorologiques sur la dynamique des états de mer. Ce qui n'était pas le cas dans ANEMOC-2. ANEMOC-3 a été construite à partir de simulations chaînées TELEMAC-2D - TOMAWAC. La validation sur des marégraphes et des bouées a permis de mettre en évidence les apports et les contributions du niveau et des courants pour la représentation des paramètres d'état de mer moyens et extrêmes le long des côtes françaises.

### Summary

With the objective to answer marine engineering needs, sea state databases are created by hindcast simulations. ANEMOC-3 database has been built to take into account the effect of water level variations and currents related to tide and weather conditions, on the wave propagation dynamic, which was not the case of ANEMOC-2. Validation on mareographs and buoys highlighted the contribution of the TELEMAC-2D - TOMAWAC modelling on the simulation of mean and extreme sea state parameters along te French coasts.

## **I – Introduction**

L'évaluation des risques côtiers, le dimensionnement de structures de protection du littoral ainsi que la caractérisation de la ressource pour les énergies marines renouvelables sont autant d'activités requérant une connaissance du climat moyen et des valeurs extrêmes des états de mer. Des bases de données d'états de mer, obtenues par simulations numériques rétrospectives, telles que les Atlas Numériques d'Etats de Mer Océanique et Côtier (i.e. ANEMOC-2, [10]) construits par le Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant (laboratoire commun entre le Cerema, EDF R&D et l'École des Ponts ParisTech) permettent de répondre aux besoins de l'ingénierie maritime, offshore et côtière, notamment du fait de leur grande couverture spatiale et temporelle nécessaire à l'étude statistique des extrêmes.

Dans cet article, la nouvelle base de données d'états de mer ANEMOC-3 Manche-Atlantique est présentée. Elle prend en compte les effets de variations de niveau d'eau et de courant liées à la marée et aux conditions météorologiques (surcotes) sur la dynamique des états de mer. ANEMOC-3 a été construite à partir de simulations chaînées TELEMAC-2D - TOMAWAC, respectivement modèle hydrodynamique 2D et modèle spectral de vague de 3<sup>ème</sup> génération. Validée sur les marégraphes et bouées des réseaux SHOM, CANDHIS et Météo-France, ANEMOC-3 Manche-Atlantique fournit les paramètres d'état de mer avec une résolution temporelle de 30 min, et les courants et hauteurs d'eau avec une résolution temporelle de 15 min. Les données sont disponibles sur une période de 32 ans (1979-2010) avec une résolution de l'ordre de 1 km le long des côtes françaises.

L'article présente les modèles numériques et les configurations utilisés pour la construction d'ANEMOC-3 (Section II). Les résultats des comparaisons aux bouées CANDHIS (Section III) ont permis l'analyse de la contribution des niveaux d'eau et des courants. Leur apport a été mis en évidence notamment à travers une analyse de Fourier des séries temporelles des hauteurs significatives. Les conclusions et perspectives sont résumées dans la Section IV.

## **II – Modèles et configurations**

### **II – 1 Maillages**

La base de données ANEMOC-3 Manche-Atlantique est construite sur deux maillages emboîtés comme ANEMOC-2 : le maillage de grande emprise dit "maillage océanique" (12340 noeuds, 23542 éléments, Figure 1.a) qui couvre l'Océan Atlantique de 60°S à 80°N et fournit les conditions limites (spectres directionnels de variance aux 129 noeuds des frontières ouvertes) au maillage "côtier" (56375 noeuds, 108551 éléments, Figure 1.b). Ce dernier couvre les façades Atlantique, Manche et Mer du Nord de la France au delà de l'isobathe des 100 m afin de ne pas couper la marche du talus continental (Figure 1.c).

Les maillages d'ANEMOC-3 ont les mêmes résolutions à la côte que ceux d'ANEMOC-2, approximativement 20 km le long des côtes européennes pour le maillage océanique et inférieure à 1 km le long des côtes françaises pour le maillage côtier. Les deux maillages ont été modifiés afin de s'assurer d'une variation de la taille des mailles plus progressive (Figure 1.d) et d'améliorer la stabilité numérique du modèle de marée. Il en résulte une amélioration de la modélisation du niveau d'eau théorique aux marégraphes situés en Manche Nord et à proximité d'Arcachon (non montré dans l'article).

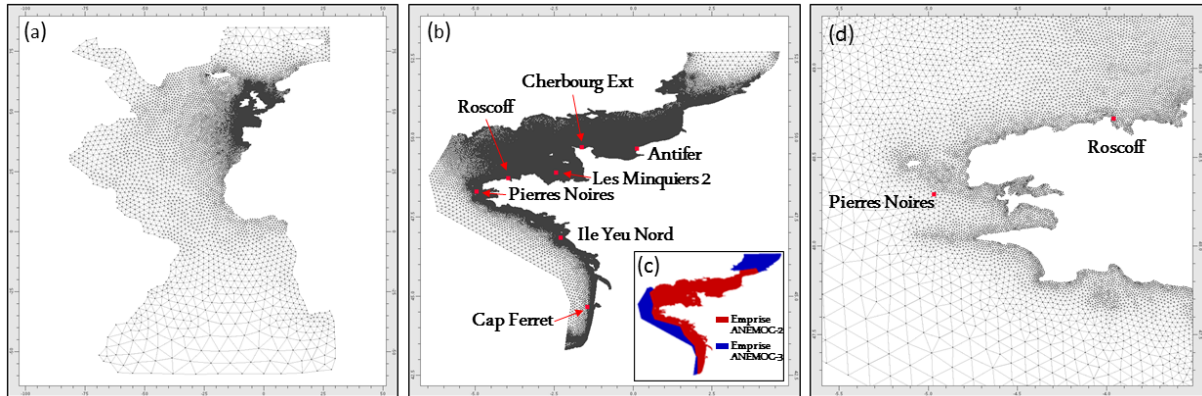


Figure 1: Maillage océanique (a) et côtier (b) d’ANEMOC-3, avec localisation des bouées CANDHIS considérées pour les comparaisons (points rouges). (c) Comparaison des emprises de l’ancien maillage côtier ANEMOC-2 (rouge) et du nouveau maillage ANEMOC-3 (bleu). (d) Zoom sur le maillage côtier au niveau de la pointe de la Bretagne.

## II – 2 Bathymétries

Les bathymétries des maillages océanique et côtier, d’ANEMOC-3 (comme ANEMOC-2) ont été interpolées, à partir de la bathymétrie “Europe” au niveau moyen, de résolution 800 m, fournie par le LEGOS (Laboratoire d’Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales). Ces données ont été complétées par la bathymétrie GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) de résolution maximale de 30 arc-secondes pour le maillage océanique sur la partie Sud et Nord-Est du maillage non-couverte par la bathymétrie du LEGOS.

## II – 3 Forçage atmosphérique

Le forçage atmosphérique d’ANEMOC-3 est identique à celui d’ANEMOC-2. Il provient de la réanalyse globale CFSR [13] de résolution horaire et résolution spatiale  $0.313^\circ \times 0.312^\circ$  disponible sur la période 1979-2010. Les champs de vent à 10 m (pour les modèles de vagues et de courant) et de pression à la surface de l’eau (pour le modèle de courant) ont été interpolés avec la fonction d’interpolation cubique 2D de Python.

## II – 4 Modèle de niveau d’eau et courants : TELEMAC 2D

Pour la prise en compte des variations du niveau d’eau et des courants liés au phénomène de marée et aux conditions météorologiques (vent et pression) dans la base d’états de mer ANEMOC-3, un modèle de marée et de surcotes a spécifiquement été construit et validé sur 15 marégraphes pendant la tempête Xynthia (Figure 2). Ce modèle est construit sur le maillage côtier d’ANEMOC-3 (Figure 1.b) en utilisant le code TELEMAC-2D ([www.opentelemac.org](http://www.opentelemac.org)) qui résout les équations de Saint-Venant (avec un pas de temps de 30 s). Suite à la réalisation d’un certain nombre de tests de sensibilité, le choix retenu pour les différentes paramétrisations est le suivant :

- Frottement sur le fond : formule de Chezy avec un coefficient constant de  $70 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$  ;
- Conditions aux limites : imposition de la hauteur d’eau  $h$  ;

- Base de données des constantes harmoniques de marée : solution “Prior” de l’atlas NEA pour 47 ondes, issue d’un modèle hydrodynamique développé par le groupe Sirroco du LEGOS (<https://sirocco.obs-mip.fr>, Florent Lyard) ;
- Coefficient de diffusion des vitesses  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  ;
- Coefficient d’influence du vent dépendant de la vitesse du vent selon Flather [5].

L’erreur quadratique (RMSE, Root Mean Square Error) a été calculée, pour chacun des marégraphes dont les données étaient disponibles autour de la date de la tempête Xynthia (entre le 17 et le 28 février 2010), pour trois variables : (i) l’élévation de surface libre pour une simulation avec marée seule, comparée à la prédiction obtenue avec le logiciel Predit v1.0 et les composantes harmoniques de 2010, (ii) l’élévation de surface libre pour une simulation prenant en compte la marée et la météo (vent et pression), comparée aux mesures du SHOM (observations REFMAR), (iii) la surcote instantanée (différence entre l’élévation de surface libre prenant en compte la marée et la météo et celle ne prenant en compte que la marée).

Les erreurs sur l’évolution de l’élévation de surface libre due à la marée et à la météo sont généralement supérieures à celles sur l’évolution due à la marée seule en restant inférieures à 30 cm.

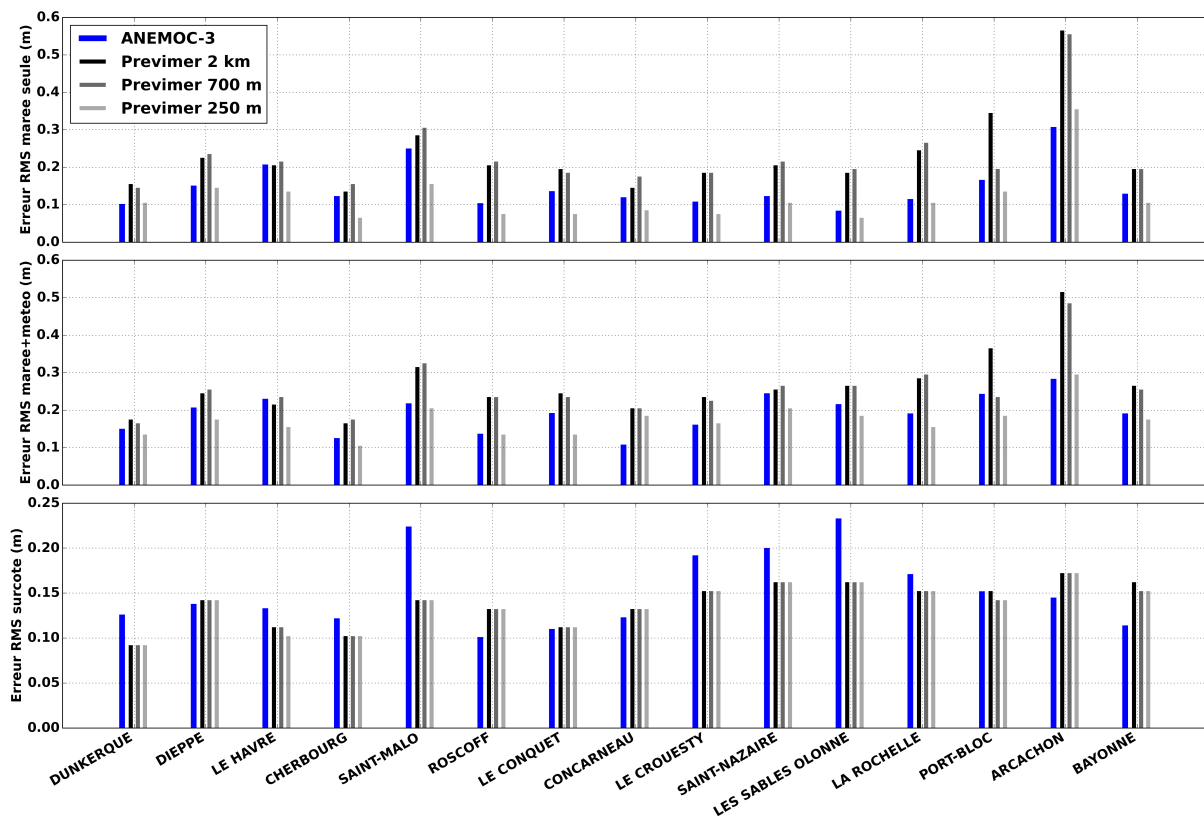


Figure 2: Erreurs RMS (m) sur l’élévation de la surface libre pour une simulation avec marée seule, avec marée et météo et sur la surcote instantanée résultante, lors de la tempête Xynthia entre le 17 et le 28 février 2010. Les résultats de validation de Prévimer [12], réalisés sur la même période, ont été rajoutés pour comparaison.

A titre de comparaison, les erreurs RMS obtenues lors de la validation du modèle de marée Prévimer [12], sur la même période, ont été rajoutées sur la Figure 2. Les trois

niveaux de gris correspondent aux résolutions des trois modèles emboîtés (du plus foncé au plus clair : 2 km, 700 m et 250 m). Les résultats du modèle pour les élévations de surface libre sont comparables à ceux du modèle de résolution 700 m de Prévimer et même pour certains marégraphes à ceux de la résolution la plus fine (le long de la côte Atlantique Sud). Les erreurs sur les surcotes instantanées sont globalement plus élevées, notamment pour les marégraphes du Crouesty, de Saint-Nazaire, des Sables d’Olonne et de la Rochelle, situés dans la zone la plus touchée par la tempête. Ces erreurs sont liées à une sous-estimation de la surcote. Les écarts avec les résultats de Prévimer peuvent en partie s’expliquer par la formulation du coefficient de friction du vent utilisé dans Prévimer. En effet, certaines études montrent que l’utilisation du coefficient de Charnock permet d’améliorer la simulation des surcotes extrêmes (e.g. [12], [11]).

## II – 5 Modèle de vagues : TOMAWAC

La génération et la propagation des états de mer a été réalisée avec le modèle spectral de vagues de troisième génération TOMAWAC [2] qui résout l’équation d’action des vagues. Cette équation est résolue avec une discrétisation de 32 fréquences de 0.0345 Hz à 0.6622 Hz (soit des périodes de 1.51 s à 29 s) et 36 directions ( $\Delta\Theta = 10^\circ$ ).

La paramétrisation d’ANEMOC-3 reprend celle d’ANEMOC-2 qui avait été calibrée à partir de 10 ans d’observations altimétriques (2000-2009) et validée pour de nombreuses bouées sur la période 1992-2009, pour les maillages océanique et côtier [10]. La génération des vagues par le vent est faite selon le modèle de Jansen [8] et [9], et la dissipation par moutonnement selon la paramétrisation BAJ [3]. Les interactions entre les quadruplets de fréquence sont calculées par la méthode DIA (Discrete Interaction Approximation) [7]. Le pas de temps pour la simulation océanique est maintenu à 5 min. Dans le cas du modèle côtier s’ajoutent les paramétrisations pour le déferlement bathymétrique selon Thornton et Guza [14] et la dissipation par interaction avec les forts courants selon Westhuysen [15].

Des améliorations de la paramétrisation d’ANEMOC-3 ont été réalisées suite à une calibration sur les bouées et correspondent à la modification du coefficient  $\beta_m$  de la génération par le vent ( $\beta_m = 1.1$ ), et la prise en compte du frottement sur le fond d’après la formulation linéaire établie lors de la campagne JONSWAP [6] et améliorée par Bouws et Komen [4] pour les deux maillages. Le pas de temps de la simulation côtière a été réduit à 30 s pour assurer la stabilité et la précision du calcul lors de la prise en compte du courant. De plus, trois sous-itérations sont utilisées pour la résolution du terme dissipatif lié au déferlement bathymétrique.

ANEMOC-3 fournit les paramètres d’états de mer suivants : la hauteur significative  $H_{m0}$ , les périodes énergétique  $T_E$ , moyenne  $T_{m02}$  et de pic  $T_p$ , la direction moyenne  $\Theta_m$ , l’étalement directionnel  $\sigma$  et le flux linéique, avec une résolution de 30 min, pour la période 1979-2010.

## II – 6 Chaînage TELEMAC-2D -TOMAWAC

Afin de prendre en compte les effets de la marée et de la météo (surcote) dans la propagation des vagues dans ANEMOC-3, les champs de hauteur d’eau et de courant, calculés avec TELEMAC-2D (Section II – 4), sont fournis à TOMAWAC. La modification de ces paramètres nécessite de recalculer les courbes caractéristiques, le long desquelles la solution est propagée et ce à chaque mise à jour des champs, entraînant une augmentation importante du temps de calcul. Un test de sensibilité des résultats à la fréquence de chaînage a été réalisé afin de déterminer une fréquence de chaînage assez élevée pour

bien prendre en compte les interactions des vagues avec le niveau et le courant, mais raisonnable pour limiter l’augmentation du temps de calcul. Une fréquence de chaînage de 15 min a été retenue pour la suite des simulations.

### III – Résultats

#### III – 1 Comparaison aux bouées CANDHIS sur la période 1990-2010

La base de données ANEMOC-3, issue d’une simulation chaînée TELEMAC-2D - TOMAWAC, est comparée à une simulation TOMAWAC seule (à paramétrisation constante) pour la période 1990-2010 (le nombre de mesures *in situ* étant significativement réduit avant 1990). Les séries temporelles de la hauteur significative des vagues  $H_{m0}$  et de la période moyenne  $T_{m02}$  sont comparées au niveau de sept bouées du réseau CANDHIS. Les indices statistiques : RMSE, biais et corrélation, sont calculés (Table 1). Ces bouées ont été choisies car elles présentent un nombre d’observations sur la période considérée supérieur à 30 000.

La prise en compte de la variation du niveau d’eau et des courants n’aboutit pas, dans la plupart des cas, à une amélioration des indicateurs statistiques. L’erreur RMS sur  $H_{m0}$  n’est diminuée qu’aux Pierres Noires. La corrélation augmente très légèrement sauf à Cherbourg Ext et au Cap Ferret où elle stagne. De même, pour  $T_{m02}$ , une diminution de RMSE n’est observée que pour les bouées de Roscoff et de l’Ile d’Yeu Nord. L’augmentation de la corrélation est un peu plus notable, excepté pour les bouées de l’Ile d’Yeu Nord et du Cap Ferret, qui restent identiques, et la bouée des Pierres Noires où la corrélation diminue.

Bouées	Bathymétrie (m)	Indices statistiques $H_{m0}$			Indices statistiques $T_{m02}$		
		RMSE (m)	Biais (m)	Corr	RMSE (s)	Biais (s)	Corr
Antifer	20.6	0.263	0.114	0.926	1.06	-0.667	0.563
		0.270	0.145	0.932	1.16	-0.878	0.596
Cherbourg Ext	27.8	0.235	0.119	0.930	1.15	-0.877	0.515
		0.253	0.157	0.928	1.26	-1.02	0.612
Minquiers 2	43.3	0.219	0.033	0.954	1.34	-0.862	0.767
		0.223	0.077	0.956	1.46	-1.093	0.771
Roscoff	8.9	0.205	0.089	0.870	1.99	0.091	0.572
		0.236	0.155	0.875	1.57	-0.386	0.608
Pierres Noires	63.1	0.367	0.091	0.957	1.14	-0.499	0.855
		0.349	0.120	0.963	1.31	-0.814	0.831
Ile Yeu Nord	16.3	0.285	0.156	0.924	1.44	0.337	0.828
		0.285	0.166	0.928	1.37	0.176	0.826
Cap Ferret	55.9	0.314	-0.083	0.965	1.06	-0.615	0.875
		0.311	-0.072	0.965	1.09	-0.673	0.875

Table 1: Comparaison des indicateurs statistiques RMSE, Biais et Corrélation (Corr) pour les variables  $H_{m0}$  et  $T_{m02}$  pour une simulation sans ( “TOMAWAC seul” en bleu) et avec ( “ANEMOC-3” en rouge) prise en compte de la marée et des surcotes sur la période 1990 à 2010 (voir Figure 1 pour la localisation des bouées).

Néanmoins, lorsque l’on s’intéresse directement aux séries temporelles de  $H_{m0}$  et de  $T_{m02}$ , l’effet de la prise en compte de l’évolution des niveaux d’eau et du courant est



bien visible pour certaines bouées. Prenons l'exemple des Pierres Noires, une modulation du signal de  $H_{m0}$  apparaît (Figure 3.a), augmentant sa variabilité qui se rapproche de celle des mesures. Une analyse de Fourier a été appliquée aux observations de  $H_{m0}$ , aux résultats ANEMOC-3 et à la simulation TOMAWAC seul, sur une durée de 212 jours (du 26 octobre 2008 au 26 mai 2009) correspondant à la plus grande durée pour laquelle le signal mesuré est régulièrement échantillonné. Nous observons la présence d'un pic dans le spectre en amplitude d'ANEMOC-3 à la même fréquence que dans le spectre des mesures et correspondant à une période d'environ 12h25, caractéristique du phénomène de marée dans la zone considérée (Figure 3.b). L'absence de pic pour la simulation TOMAWAC seul confirme que la modulation qui apparaît dans le signal est bien due aux effets de l'évolution du niveau d'eau et du courant sur la propagation des vagues.

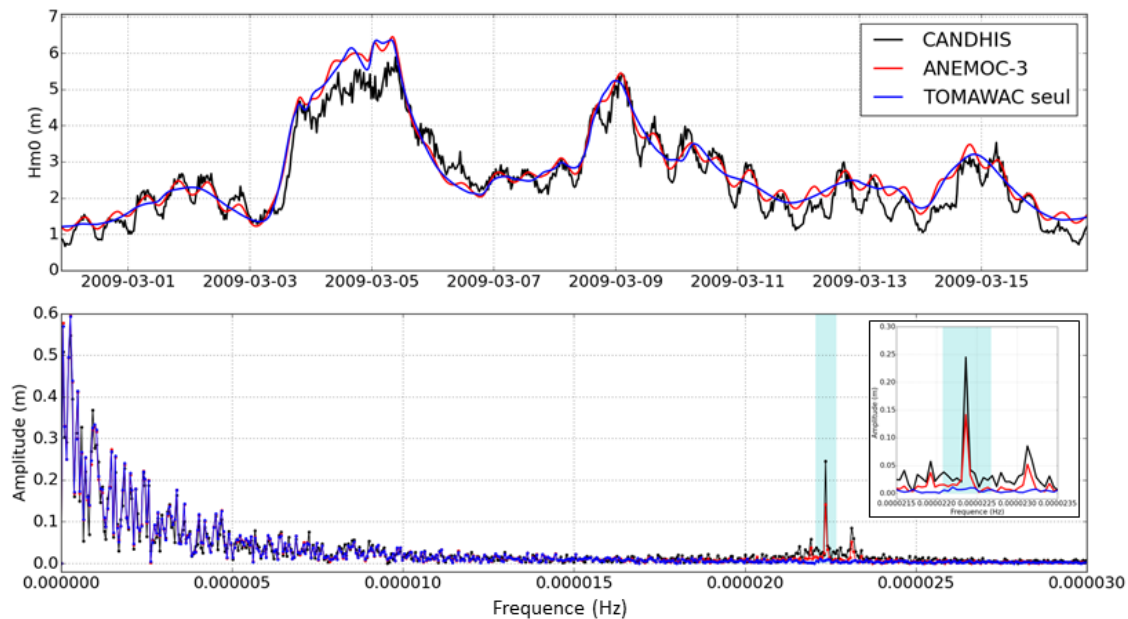


Figure 3: (a) Extrait de la série temporelle de  $H_{m0}$  à la bouée de Pierres Noires utilisée pour l'analyse de Fourier. Comparaison des mesures (noir), d'ANEMOC-3 (rouge) et de la simulation TOMAWAC seul (bleu). (b) Comparaison des spectres en amplitude issus de l'analyse de Fourier sur la période du 26 octobre 2008 au 26 mai 2009 pour les trois signaux présentés ci-dessus. La zone bleutée représente la plage des fréquences autour de la fréquence correspondant à une période de 12h25 (zoom à droite).

Malgré le faible impact de la prise en compte de la variation du niveau et des courants sur les indices statistiques, il s'avère que le chaînage TELEMAC-2D - TOMAWAC réalisé pour ANEMOC-3 améliore la représentation de la dynamique d'évolution des séries temporelles de  $H_{m0}$  et de  $T_{m02}$  en enrichissant leur contenu spectral à la fréquence caractéristique de la marée.

### III – 2 Analyse de la contribution des niveaux d'eau et du courant

Les interactions des vagues avec la marée et les surcotes peuvent être de différentes natures, d'une part celles liées aux courants, qui peuvent entraîner des modifications de la direction de propagation des vagues (réfraction) ou de blocage pouvant aller jusqu'au déferlement si celles-ci se propagent en sens opposé à un gradient de courant, etc [1]. D'autre part, celles liées à la variation du niveau d'eau, qui donnent également lieu à de la réfraction et

peuvent impacter la localisation du déferlement. Afin d'étudier les contributions propres aux courants et à la variation du niveau d'eau, les résultats de trois simulations ont été comparés aux mesures de  $H_{m0}$  et  $T_{m02}$  sur un cycle de marée autour de la pleine mer de coefficient 107 ayant eu lieu le 9 mars 2008 à 18h17 à Brest, la veille de la tempête Johanna. Les simulations sont nommées :

- "ANEMOC-3" pour la simulation chaînée TELEMAC-2D - TOMAWAC avec les effets de courant et de niveau ;
- "chaînage niveau" pour la simulation chaînée TELEMAC-2D - TOMAWAC avec les effets de niveau uniquement (courants nuls imposés dans TOMAWAC) ;
- "TOMAWAC seul" pour la simulation TOMAWAC sans les effets de courant ni de niveau.

Les effets de la marée sont d'autant plus attendu que le coefficient de marée est élevé, avec des variations du niveau d'eau de grande amplitude associées à de forts courants. Certaines bouées situées en grande profondeur comme celle du Cap Ferret (non montrée ici) ne sont pas du tout sensibles à ces effets, alors que d'autres comme celle des Pierres Noires sont sensibles aux courants mais pas au niveau (Figure 4). A la bouée de Cherbourg Ext, la variation du niveau d'eau n'a pas d'effet alors que la série temporelle de  $H_{m0}$  présente une légère sensibilité aux courants, beaucoup plus prononcée pour la  $T_{m02}$ . Enfin à la bouée de l'Île d'Yeu Nord, située dans des eaux beaucoup moins profondes (16 m), la  $H_{m0}$  est sensible en premier lieu au niveau d'eau, alors que le courant impacte de manière plus importante la  $T_{m02}$ .

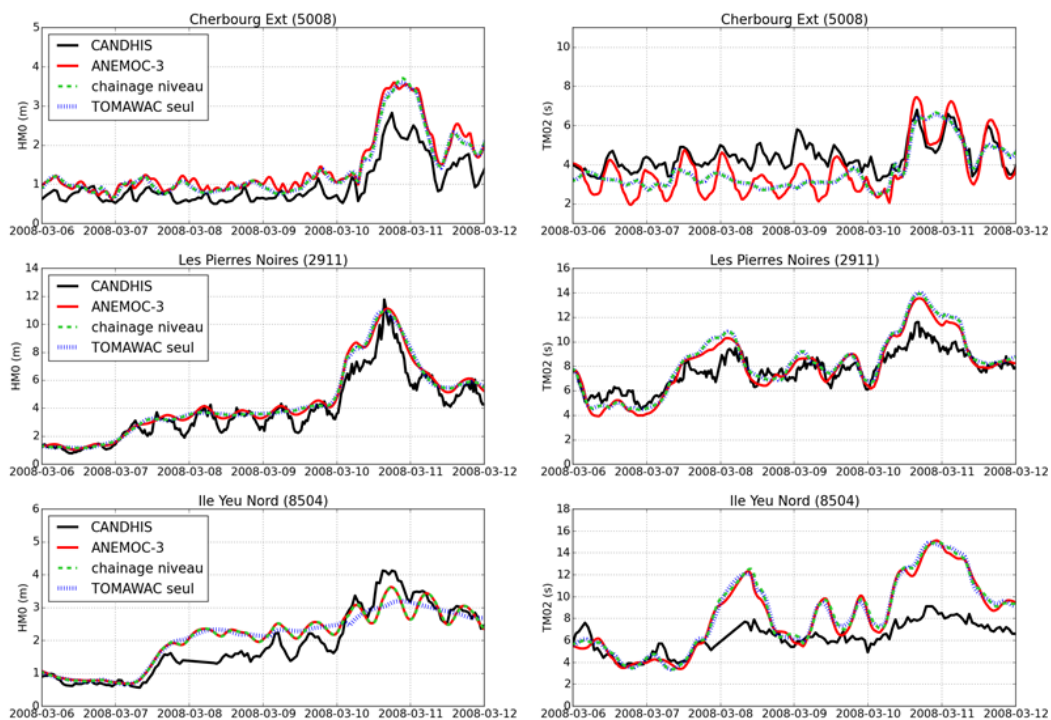


Figure 4: Comparaison des séries temporelles de  $H_{m0}$  et  $T_{m02}$  mesurées (noir) et issues des trois simulations ANEMOC-3 (rouge), chaînage niveau (bleu clair) et TOMAWAC seul (bleu).



La Figure 5 propose une représentation spatiale des effets de niveau d’eau et de courant sur  $H_{m0}$  et  $T_{m02}$ , sur l’emprise du maillage côtier. Les figures a, b, c, d, e et f représentent respectivement les cartes de variation relative maximale du niveau d’eau, de vitesse instantanée maximale du courant, de différence maximale de  $H_{m0}$  et  $T_{m02}$  entre les simulations “chaînage niveau” et “TOMAWAC seul” puis entre les simulations “ANEMOC-3” et “TOMAWAC seul”, sur la période allant du 9 mars 2008 à 5h au 10 mars 2008 à 14h.

Lorsque seules les variations du niveau d’eau sont prises en compte (différence entre les simulations “chaînage niveau” et “TOMAWAC seul”), les différences de  $H_{m0}$  les plus importantes (supérieurs à 30 cm) sont localisées près de côtes (Figure 5.c), en cohérence avec les variations relatives maximales du niveau d’eau (Figure 5.a). La  $T_{m02}$  est beaucoup moins sensible aux variations de niveau d’eau (Figure 5.d). Les différences maximales supérieures à 1 s sont observées uniquement à proximité immédiate de la côte.

La prise en compte des courants (différence entre les simulations “ANEMOC-3” et “TOMAWAC seul”) entraîne des différences plus importantes, sur des zones plus étendues. Il apparaît une forte corrélation spatiale entre les différences maximales sur la  $T_{m02}$  (Figure 5.f) et la vitesse du courant, certainement liée à la modification de la relation de dispersion lors de la propagation des vagues en présence de courant (effet Doppler). Cette cohérence est moins marquée pour les  $H_{m0}$ , qui présentent néanmoins des différences supérieures à 30 cm dans une grande partie de la Manche (Figure 5.e), où les courants sont les plus forts (Figure 5.b).

### III – 3 Amélioration de la représentation des événements extrêmes?

La représentation des événements extrêmes est un enjeu majeur dans de nombreux domaines comme le dimensionnement de structures de protection côtières contre les risques de submersion ou des systèmes relevant des énergies marines renouvelables. Dans la base de données ANEMOC-3, l’ajout de la variation du niveau d’eau et des courants au modèle de propagation d’états de mer a permis d’améliorer la modélisation des  $H_{m0}$  extrêmes pour cinq des sept bouées considérées. Les améliorations les plus importants concernent les quantiles les plus élevés comme on peut le voir pour les bouées d’Antifer, des Minquiers 2 et de l’Ile d’Yeu Nord (Figure 6). Cette amélioration peut atteindre jusqu’à 50 cm pour le quantile cent. Par ailleurs, aucune amélioration n’est observée à la bouée de Cherbourg Ext. Quant à la bouée du Cap Ferret, le quantile cent présente une légère détérioration de l’ordre de 10 cm (pour des vagues supérieures à une dizaine de mètres).

L’amélioration reste toute fois limitée et la sous-estimation des valeurs extrêmes reste importante. La modélisation des états de mer extrêmes pourrait être améliorée en utilisant un maillage plus raffiné, ce qui devrait améliorer la représentation des courants et de leurs gradients ainsi que les variations complexes de bathymétrie en zone proche côtière. D’autres aspects liés à la paramétrisation des phénomènes physiques du modèle de vagues sont aussi à considérer pour l’amélioration des états de mer extrêmes.

## IV – Conclusions et perspectives

Dans cette nouvelle version d’ANEMOC-3 Manche-Atlantique les niveaux d’eau et courants induits par la marée astronomique et les conditions météorologiques (surcotes) calculés par TELEMAC-2D sont pris en compte dans la propagation des états de mer, par le biais d’une simulation chaînée avec TOMAWAC. La comparaison d’ANEMOC-3 aux observations de bouées du réseau CANDHIS montre que cette amélioration n’est pas notable au

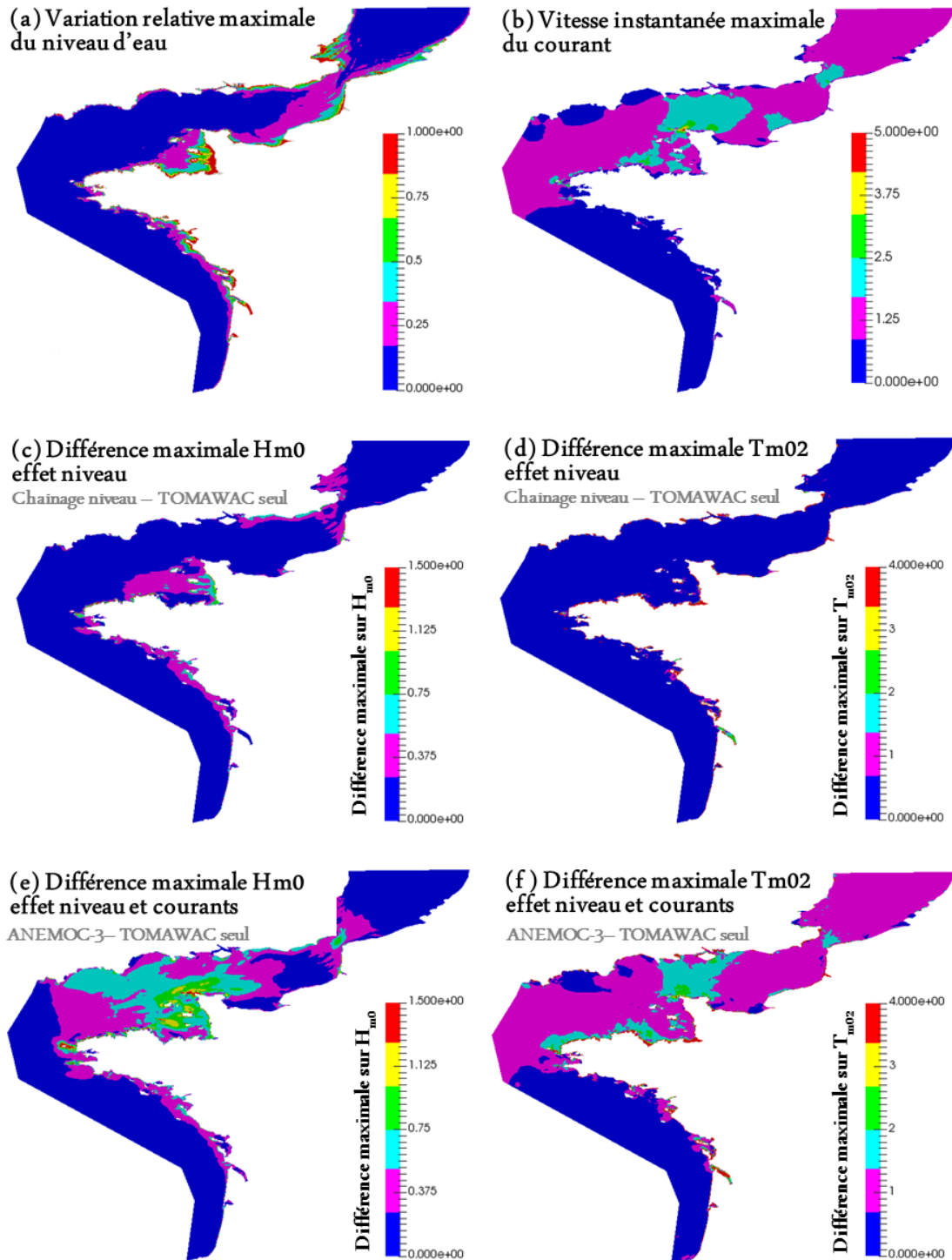


Figure 5: Cartes des variations relatives maximales du niveau d'eau (a) et de la vitesse instantanée maximale du courant (b). Comparaison des différences maximales sur  $H_{m0}$  et sur  $T_{m02}$ , lors de la prise en compte des variations du niveau d'eau seul (chaînage niveau) ((c) et (d)) ou du niveau d'eau et des courants (ANEMOC-3) ((e) et (f)) par rapport à une simulation TOMAWAC seul sur la période allant du 9 mars 2008 à 5h au 10 mars 2008 à 14h.

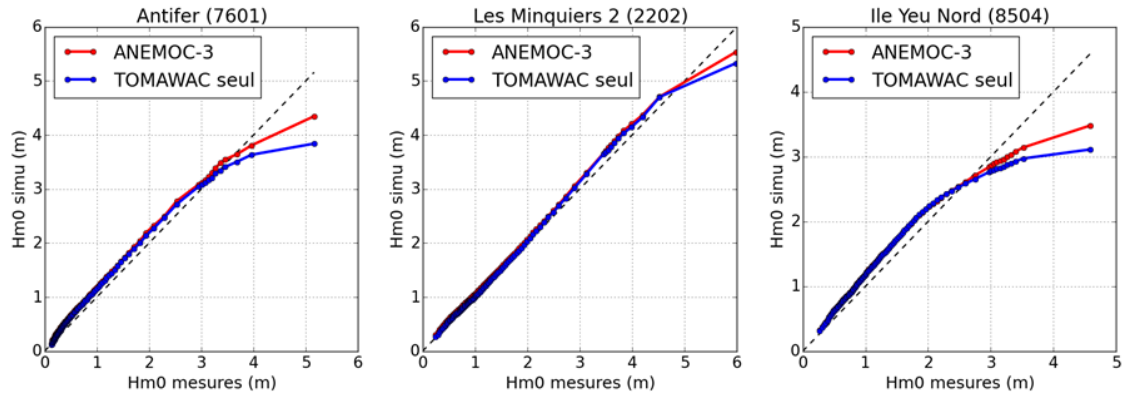


Figure 6: Diagrammes quantile-quantile pour la variable  $H_{m0}$  issue d’ANEMOC-3 (rouge) et d’une simulation TOMAWAC seul (bleu) en comparaison aux mesures disponibles de 1990 à 2010, aux bouées Antifer, Les Minquiers 2 et Ile Yeu Nord pour lesquels les effets de la marée sont notables.

niveau des indices statistiques. Cependant, la visualisation des séries temporelles rend compte de l’apport du chaînage dans la dynamique de l’évolution de  $H_{m0}$  et  $T_{m02}$  pour un certain nombre de bouées. Une analyse de Fourier met en évidence l’enrichissement du contenu spectral de  $H_{m0}$  et  $T_{m02}$  à la fréquence caractéristique de la marée, du fait du chaînage. Cela améliore également, dans une certaine mesure, la représentation des hauteurs de vagues extrêmes.

Les résultats pourraient être améliorés d’avantage en raffinant le maillage, au niveau de la côte, afin de mieux modéliser les détails de bathymétrie et les variations locales de courant. De plus, certains phénomènes ne sont pas pris en compte dans le modèle, comme par exemple la réflexion à la côte ou les interactions entre triplet de fréquence (trop coûteux en temps de calcul pour une emprise telle que celle du maillage côtier). D’autre part, les paramétrisations associées à la génération des vagues par le vent et au moutonnement demanderaient à être adaptées pour une modélisation plus réaliste des événements extrêmes.

## Remerciements

Les auteurs remercient la NOAA pour la mise à disposition de la réanalyse CFSR utilisée dans ce travail. De même les instituts CEREMA, LEGOS et GEBCO sont remerciés pour les observations *in situ*, les bases de composantes harmoniques de marée et les bases bathymétriques.

## References

- [1] F. Ardhuin, A. Roland, F. Dumas, A.-C. Bennis, A. Sentchev, P. Forget, J. Wolf, F. Girard, P. Osuna, and M. Benoit. Numerical wave modeling in conditions with strong currents : dissipation, refraction, and relative wind. *J. Phys. Oc.*, 42:2101–2120, 2010.
- [2] M. Benoit, F. Marcos, and F. Becq. Development of a third generation shallow-water wave model with unstructured spatial meshing. In *Proceedings of the 25th Int. Conf. on Coastal Engineering*, Orlando, USA, 1996.

- [3] J.-R. Bidlot, P. Janssen, and S. Abdalla. A revised formulation of ocean wave dissipation and its model impact. ECMWF tech. rep. memo 509, ECMWF, Reading, UK, 2007.
- [4] E. Bouws and G. Komen. On the balance between growth and dissipation in an extrem depth-limited wind-sea in the southern North Sea. *J. Phys. Oc.*, 13:1653–1658, 1983.
- [5] R. Flather and A. Davies. The application of numerical models to storm surge prediction. Report n°16, Institute of Oceanographique Sciences, Cheshire, Royaume Uni, 1975.
- [6] K. Hasselmann, T. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D. Cartwright, K. Enke, J. Ewing, H. Gienapp, D. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Muller, D. Olbers, K. Richter, W. Sell, and H. Walden. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Reihe a (8°), nr.12, Deutsches Hydrographisches Institute, Hamburg, Allemagne, 1973.
- [7] S. Hasselmann and K. Hasselmann. Computations and parametrizations of the non-linear energy transfer in gravity-wave spectrum. part I : a new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral. *J. Phys. Oc.*, 15:1369–1377, 1985.
- [8] P. Janssen. Wave induced stress and the drag of air flow sea waves. *J. Phys. Oc.*, 19:745–754, 1989.
- [9] P. Janssen. Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting. *J. Phys. Oc.*, 21:1631–1642, 1991.
- [10] A. Laugel, A.-L. Tibery-Wadier, M. Benoit, and G. Mattarolo. ANEMOC-2 Atlantique et Méditerranée: calibration et validation de deux nouvelles bases d'états de mer construites par simulations numériques rétrospectives sur 1979-2010. In *Acte des XIII<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil*, Dunkerque, France, 2014.
- [11] A. Pasquet, H. Michaud, L. Aouf, R. Baraille, C. Bru, S. Correard, F. Gouillon, D. Jourdan, G. Morvan, P. Ohl, and D. Paradis. Implémentation d'un nouveau modèle opérationnel de prévision des vagues et surcotes marines. In *Acte des XIII<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil*, Dunkerque, France, 2014.
- [12] L. Pineau-Guillou. PREVIMER: Validation des modèles hydrodynamiques 2D des côtes de la Manche et de l'Atlantique. Rapport Ifremer, Projet PJ0303, Ifremer, Plouzané, France, 2013.
- [13] S. Saha and Coauthors. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91:1015–1057, 2010.
- [14] E. Thornton and R. Guza. Transformation of wave height distribution. *J. Geophys. Res.*, 88:5925–5938, 1983.
- [15] A. Van der Westhuysen. Spectral modeling of wave dissipation on negative current gradients. *Coast. Eng.*, 58:17–30, 2012.