

Rapport d'une étude de modélisation des états de mer et du niveau marin lors d'une tempête fictive dans la baie du Mont St Michel

01/04/2015

Météo-France, Division Marine et Océanographie : Alice Dalphinnet, Denis Paradis, Lotfi Aouf /
SHOM : Audrey Pasquet, Héloïse Michaud, Rémy Baraille, Didier Jourdan

1	Contexte	1
2	Solution de rejeu retenue, limite d'usage	2
3	Forçage météo	4
3.1	Choix de la tempête	4
3.2	Choix du forçage de vent	5
4	Modélisation du niveau marin	10
4.1	Modèle et configuration	10
4.1.1	Modèle HYCOM et configuration	10
4.1.2	Performances globales du modèle de marée et de surcote	11
4.2	Méthode	12
4.2.1	Calcul des surcotes, création des forçages pour WW3	12
4.2.2	Estimation du recalage temporel	12
4.3	Résultats	12
4.3.1	Résultats de la simulation de la tempête réaliste	12
4.3.2	Résultats de la simulation de tempête fictive	14
4.4	Améliorations	15
5	Modélisation des états de mer	15
5.1	Modèle utilisé	15
5.2	Simulation de la tempête réelle	17
5.2.1	Comparaison aux observations	18
5.2.2	Impact des forçages de niveau d'eau et de courant	21
5.3	Simulation de la tempête fictive	23
5.3.1	Impact du courant	23
5.3.2	Analyse des états de mer	26
6	Conclusion	28

1 Contexte

Suite au courrier du MEDDE (19 janvier 2015) reçu par Météo-France et le SHOM, leur demandant de participer à un comité d'experts techniques chargé d'évaluer les éventuelles spécificités de la Baie du Mont St Michel à faire jouer dans l'établissement du plan de prévention des risques de submersion des marais de Dol, une réunion de ce comité s'est tenue à Rennes le 4 février 2015. Au cours de cette réunion, il a été demandé de réaliser une simulation de fortes vagues sur une tempête passée, avec marée fictive. L'objectif est de montrer ce que Météo-France et le SHOM peuvent simuler aujourd'hui avec leurs outils opérationnels dans une zone particulière (baie du Mont St Michel) en termes de niveaux marins et d'états de mer.

La baie du Mont-Saint-Michel est naturellement protégée des forts états de mer du proche Atlantique entrant en Manche, par la bathymétrie (faible profondeur dissipant les vagues par déferlement), le trait de côte et les îles anglo-normandes qui font écran. La question est de savoir

jusqu'à quelle hauteur les vagues peuvent déferler dans la baie, ou du moins d'avoir une estimation des forts états de mer possibles près de la digue protégeant les marais de Dol.

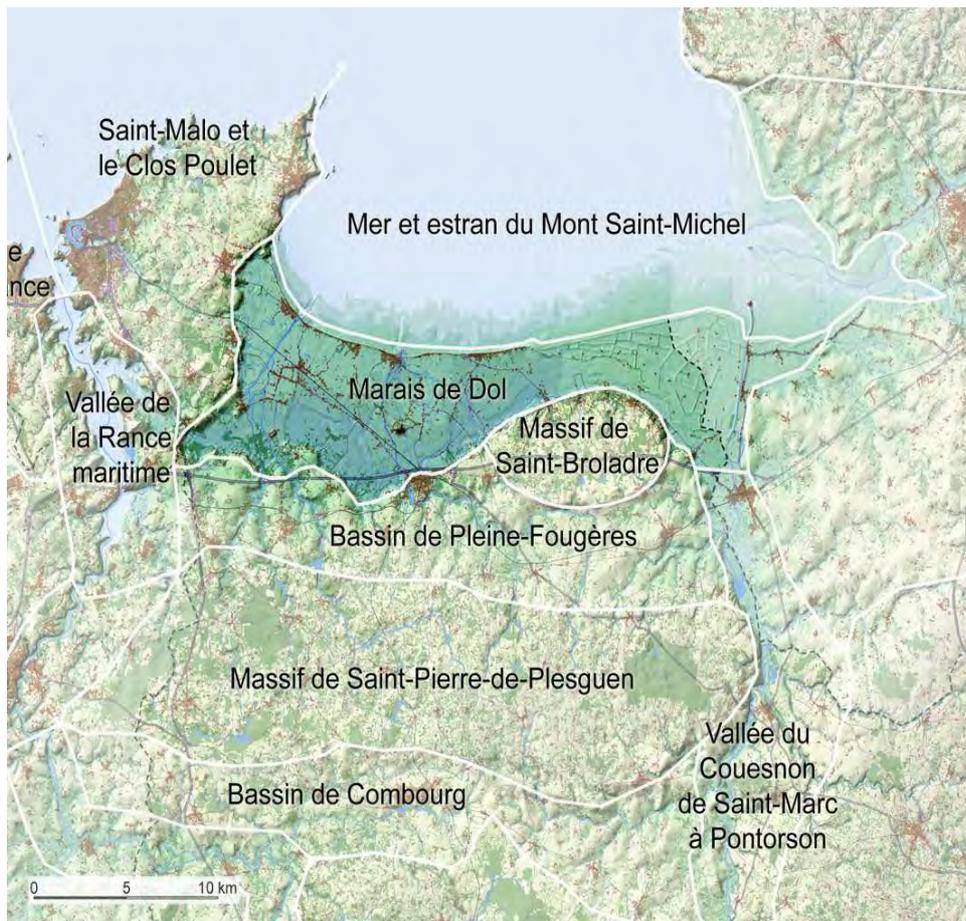


Figure 1: Localisation du marais de Dol

La présente étude donne des éléments de réponse au moyen des outils disponibles au SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) et à Météo-France.

2 Solution de rejeu retenue, limite d'usage

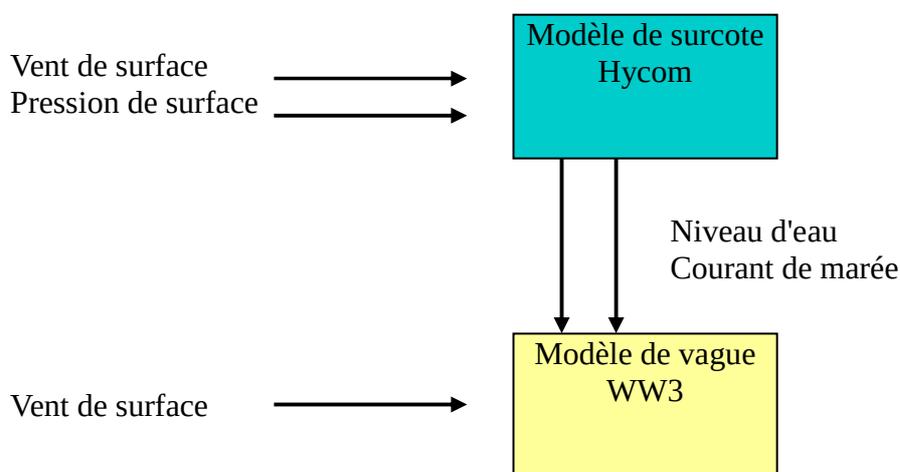
L'objectif de la présente étude est de mieux connaître le risque d'état de mer dangereux dans la baie du Mont-Saint-Michel en simulant un cas de tempête. L'événement du 13 février 2005 qui a été retenu, présente des caractéristiques intéressantes en durée, force et direction du vent, pour générer des vagues d'ouest susceptibles de rentrer dans la baie. Son étude seule ne permettra pas de tirer des conclusions sur le risque maximal de vagues près de la digue, protégeant les marais de Dol, par exemple relevant d'un événement cinquantenaire ou pluri-centenaire. La tempête et les hauteurs de vague associées sont donc à considérer comme un exemple d'événement possible, sans supposition précise sur sa fréquence d'apparition.

Cet événement est simulé par le modèle de surcotes Hycom2D et par le modèle de vagues WaveWatch3, utilisés dans des configurations proches de celles du dispositif de vigilance vagues submersion de Météo-France, développées en collaboration avec le SHOM. Le rapport aborde les

aspects de niveau d'eau, comprenant marée et surcote, car des données de ce type ont été utilisées pour simuler les vagues. Lors du 13 février 2005, le coefficient de marée était peu élevé (91). Nous rejouons donc également cette tempête en considérant une grande marée de sorte que la pleine mer survienne lors du pic de la tempête. Cette marée fictive prend son sens dans l'optique de la problématique de submersion. Cependant les résultats de l'étude se focalisent ici sur les états de mer, qui n'est qu'un aspect du risque de submersion.

Le coefficient de marée du 13/02 était de 91 à la pleine mer de 09h09 UTC à Cancale (13,12m). La marée fictive utilisée est celle du 11/02 à 07h55 UTC, correspondant à un coefficient de 108 (13,90m), c'est à dire à une grande marée.

Le schéma ci-dessous rend compte des flux entrants nécessaires à la simulation des états de mer avec prise en compte de la marée.

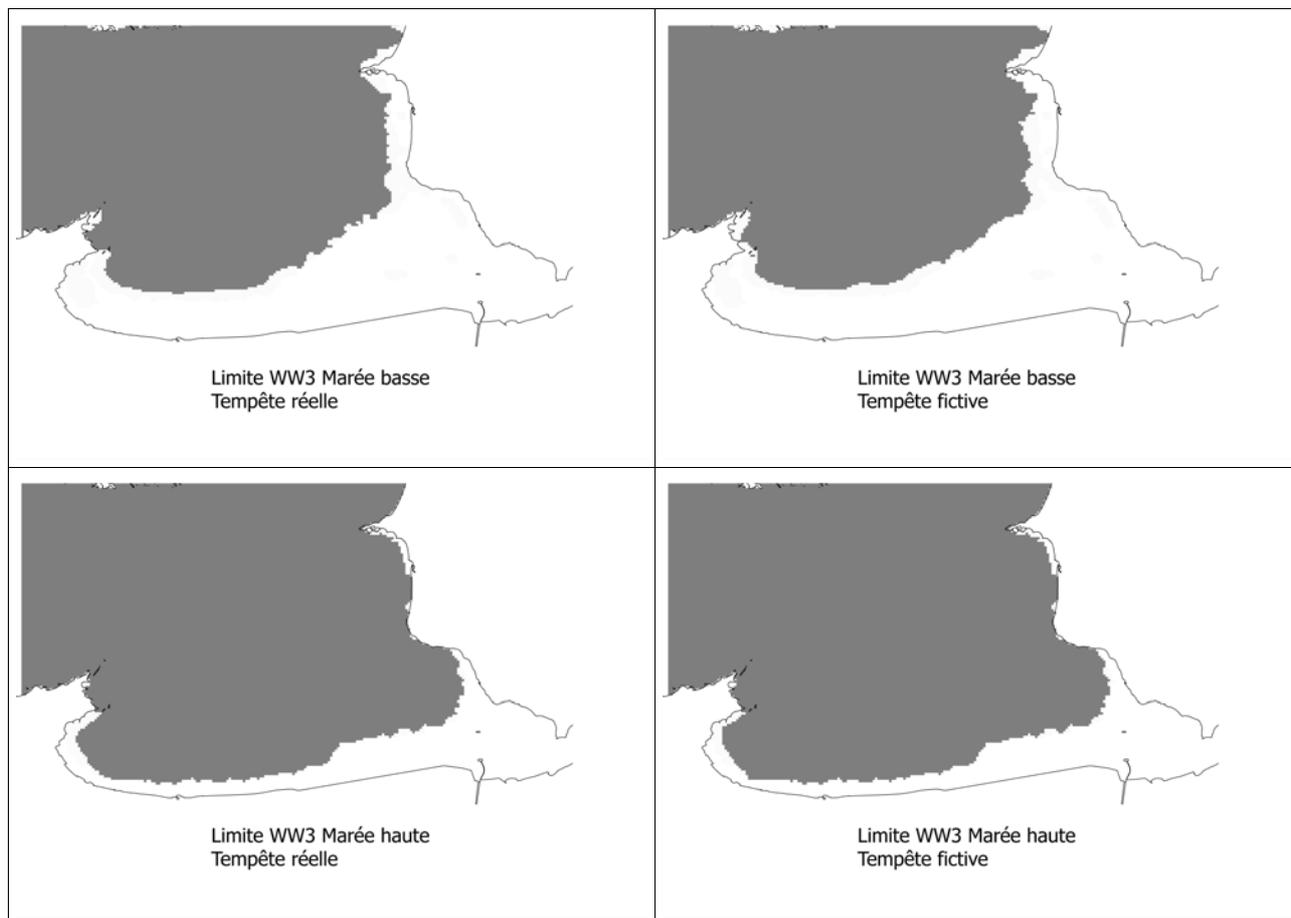


A noter que la configuration opérationnelle du modèle de surcote ne permet pas de simuler le découvrement : les points mer qui pourraient se découvrir à marée basse sont donc artificiellement conservés en mer en changeant la bathymétrie. On impose une profondeur plus importante afin qu'ils restent immergés. Cela revient à creuser l'estran de la baie du Mont St Michel partout où le fond peut se découvrir à basse mer (par fort coefficient notamment).

Le modèle de vagues WW3, forcé par les hauteurs d'eau calculées par Hycom, a été paramétré pour simuler l'état de mer aux points ayant au moins 1 mètre de hauteur d'eau. C'est pourquoi les simulations finales de WW3 rendent compte d'un découvrement lors de la basse mer, bien que le modèle de surcote ne les modélise pas (la hauteur d'eau calculée par Hycom dans ces zones est inférieure à 1 m).

Cependant le modèle de vagues reste contraint par l'extension, fixe, du domaine de calcul de Hycom, qui correspond à l'extension de la Manche, au niveau moyen de la mer (marée nulle). Elle ne recouvre pas la baie jusqu'à la digue dans le modèle, ce qui est le cas en réalité avec un coefficient de marée de 108. L'extension de la mer est bloquée lors de la montée de la marée. Les cartes ci-dessous montrent ainsi que la mer ne s'étend pas davantage en marée fictive qu'en marée réelle car elle est bloquée déjà avant la pleine mer.

La simulation en marée fictive garde son intérêt car les forts trains de vagues entrent davantage dans la baie avant d'être arrêtés par la limite virtuelle du trait de côte, comme le montrent les isolignes des cartes de hauteur de vagues des parties suivantes.



Extension de la mer pour le modèle de vagues WW3 dans diverses configurations

Par ailleurs, les erreurs du modèle WaveWatch 3 peuvent être dues à plusieurs facteurs : la qualité du forçage de vent, les approximations dans la physique des vagues, et la bathymétrie ou la hauteur d'eau. L'étude s'attache à valider le modèle de vagues avec les mesures disponibles.

3 Forçage météo

3.1 Choix de la tempête

L'étude se base sur une tempête survenue le 13/02/2005 favorable à la propagation des vagues dans la baie du Mont-Saint-Michel. Les critères requis pour le choix de la tempête sont la direction nord-ouest du vent en entrée de Manche et le passage de la trajectoire du maximum de vent près de la zone d'étude, afin de générer une importante mer du vent.

Une dépression se forme dans le Nord de l'Irlande le 12 février à 00 h UTC. Elle se décale vers l'Est de l'Angleterre (carte 1) puis vers la mer Baltique (carte 2 et 3) en se creusant. Les hautes pressions présentes sur l'Atlantique se décalent vers l'Est et participent au maintien du gradient de pression (flèche bleue – cartes 1 à 3).

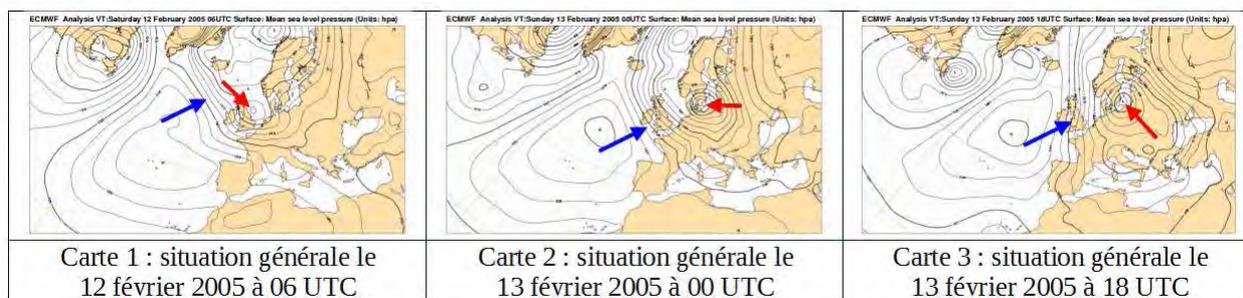


Figure tirée de la fiche tempête du projet Vimers1 (cartes de pression réduite au niveau mer)

La carte des rafales maximales ci-dessous montre que des rafales autour de 100 km/h ont été observées près de la baie. La rafale maximale à Dinard, de 108 km/h, est inférieure à la durée de retour 5 ans de ce poste (116 km/h). Néanmoins la situation présente l'intérêt d'un vent moyen soutenu durable, avec 9 heures consécutives de vent moyen maximal supérieur à 50 km/h à Dinard, ce qui correspond à 7 beaufort.

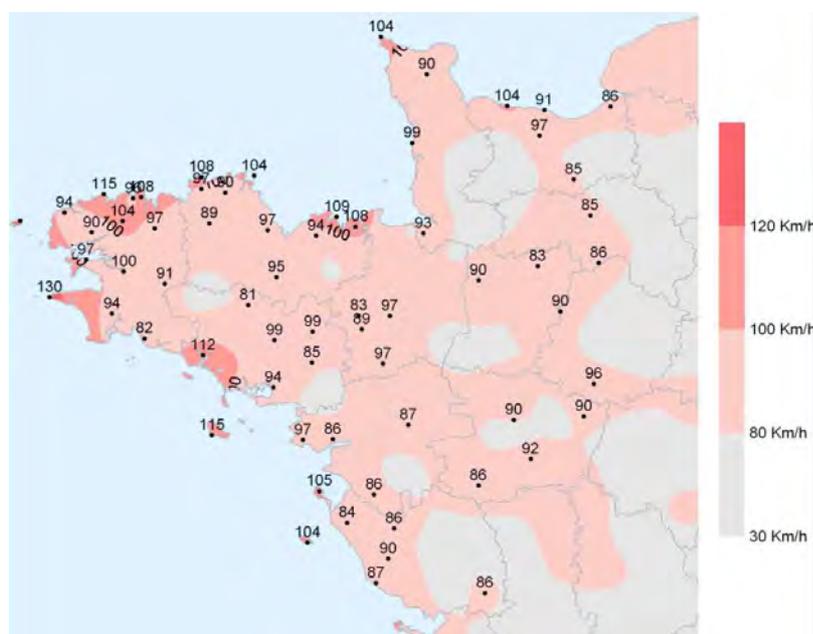


Figure 2: Rafales maximales observées le 15 février 2005 (figure extraite de la fiche tempête du projet Vimers1)

3.2 Choix du forçage de vent

Plusieurs champs de vent de différents modèles étaient disponibles pour rejouer la tempête. Parmi ceux-ci, le rejeu Aladin 0.1° présente de nombreux avantages. Il est issu d'une réanalyse prenant en compte davantage d'observations et il présente la plus fine résolution horizontale, en l'occurrence 0.1°.

Une précédente étude¹ sur la tempête du 13/02/2005 avait toutefois montré que le champ de vent de surface (à 10 m) du rejeu Aladin 0.1° sous-estimait significativement les valeurs de vent comparées aux observations terrestres en Bretagne. Il avait alors été préconisé d'utiliser un champ de vent en surface plus soutenu et plus proche des observations, en l'occurrence le champ de vent à 50 m

1 Projet Vimers

d'altitude de ce même rejeu.

	vitesse du vent observée à 10 mètres (m/s)	vitesse du vent prévue à 10 mètres (m/s)	vitesse du vent prévue à 50 mètres (m/s)
Pte de la Hague	17	15	18
Ploumanac'h	11	17	20
Brignogan	22	17	21
Ile d'Ouessant	22	18	21
Pte du Raz	25	17	21
Pte de Penmarc'h	18	16	19
Belle-Ile	17	17	20
Noirmoutier	10	15	19

Tableau 2 : comparaison entre la vitesse du vent observée et celles prévues à 10 mètres et 50 mètres le 13 février 2005 à 15 UTC

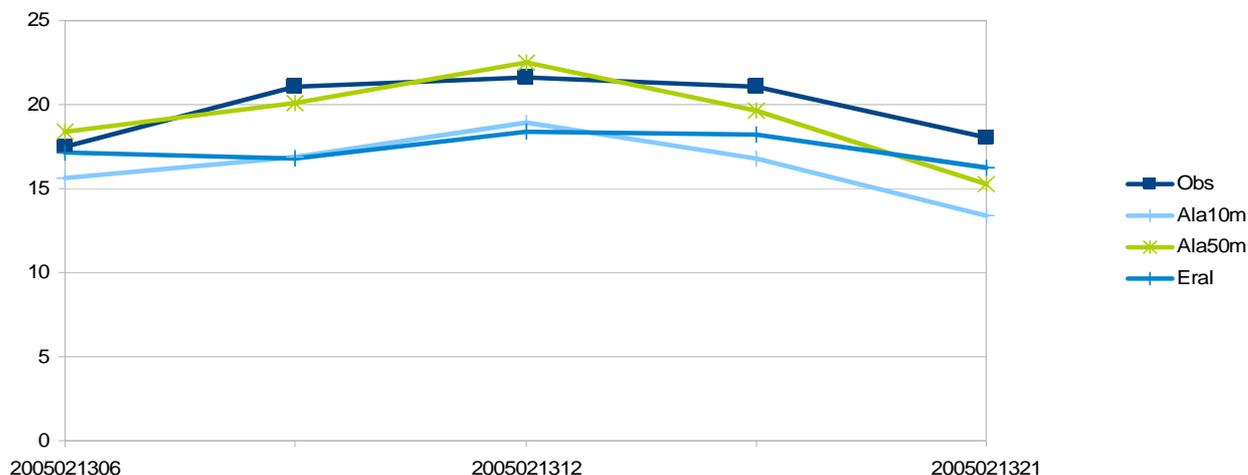
Figure 3: Extrait du rapport "Validation météorologique des rejeux des 25 situations de référence" du projet Vimiers, octobre 2014 (en jaune le modèle sous-estime, en bleu le modèle surestime)

L'évaluation de la qualité du forçage météo en mer est importante pour les simulations océanographiques que nous souhaitons faire. Nous avons complété l'analyse faite dans Vimiers par une comparaison des champs de vent sur des points d'observation en mer. Les trois champs de vent étudiés sont :

- le vent à 10 m de la réanalyse Era-Interim du CEP à 0.5° ;
- le vent à 10 m du rejeu Aladin 0.1° entre le 11 et le 13/02, complété par la réanalyse Era-Interim ;
- le vent à 50 m du rejeu Aladin 0.1° le 13/02, complété par le vent à 10 m du même rejeu et la réanalyse Era-Interim.

La figure 5 montre l'emplacement des bouées utilisées pour la validation du modèle. Les observations de vent à ces bouées indiquent que le champ à 50 m est plus juste que les autres champs. Le vent à 10 m d'Aladin 0.1° ou d'Era-Interim sous-estime en effet le pic de la tempête de 3 m/s environ, soit de 15 %.

Vent près du sol (m/s) à la bouée Scilly 62107



Vent près du sol (m/s) à la bouée Channel 62103

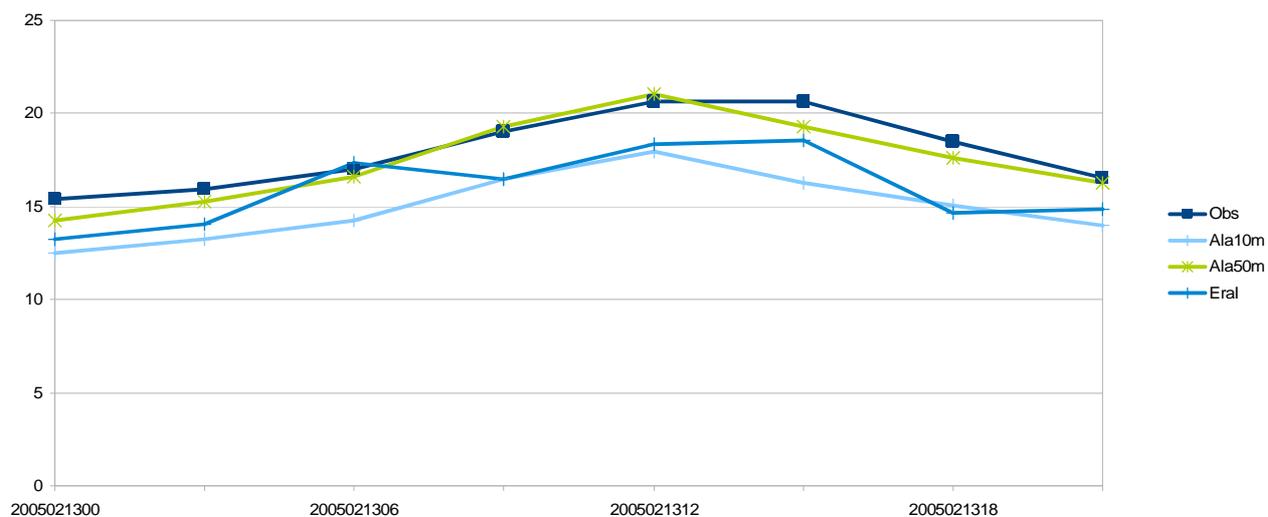


Figure 4: Comparaison aux observations de vent à 10m des bouées Scilly et Channel, des 3 champs de vent modèle (le vent à 10 et à 50 m d'Aladin et le vent à 10 m d'Era-Interim)

Afin de disposer d'une validation la plus étendue possible, compte-tenu de la rareté des mesures en mer, les observations de hauteur de vagues issues de ces bouées ont également été utilisées pour vérifier les vents.

Pour cela, nous avons utilisé le modèle de vagues opérationnel de Météo-France (MFWAM) à la résolution de 0.1° (environ 10 km) avec les trois forçages de vent. Puis les sorties du modèle ont été comparées aux observations de hauteur de vagues, afin de choisir le forçage le plus pertinent pour l'étude des états de mer dans la baie du Mont-Saint-Michel.

La localisation des bouées, figurée sur la carte ci-dessous, est donnée avec en arrière-plan la

différence de hauteur de vagues entre les simulations forcées par le vent à 10 m et celui à 50 m, au plus fort de la tempête, à 15 h UTC.

On remarque de fortes différences de hauteurs, plus de 1 m près de la pointe Bretagne, dues à un forçage de vent de 10 à 30 % plus fort.

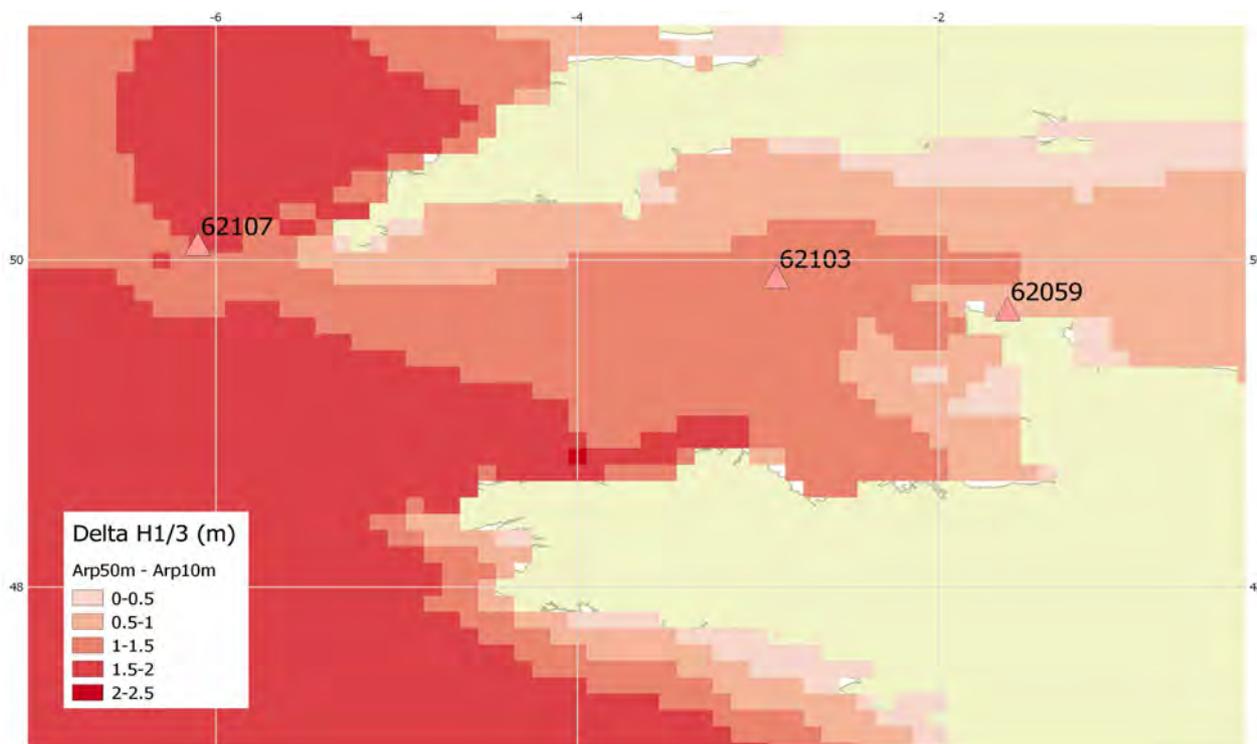


Figure 5: Emplacement des 2 bouées Channel (62103) et Scilly (62107) ayant servi au contrôle du vent et champ de différence des hauteurs de vagues (ΔH_s en m) entre les modèles MFWAM forcés par les vents Aladin à 50 m (« Arp50m ») et à 10 m (« Arp10m »), le 13 février 2005 à 15 UTC.

La bouée 62059 se trouve sur une maille à la limite terre/mer du modèle MFWAM 0.1. Sa proximité à la côte tend à lui préférer les résultats aux 2 autres bouées pour valider le forçage.

Le tableau ci-dessous reprend l'écart entre le pic de hauteurs des vagues simulé et observé, ainsi que le décalage temporel. Aux bouées 62107 et 62103, le score de MFWAM forcé par le vent à 50m (« Ala50m ») est dégradé par rapport aux autres forçages. Il sur-estime fortement les vagues et donne un pic supérieur de 1,3 m et 1,8 m respectivement par rapport aux observations des 2 bouées.

Bouée	Obs moyenne (m) entre le 13/02 00UTC et le 14/02 12UTC	Forçage	Δ du pic (m)	Δ temporel du pic (heure)
62059	2,2	EraI	-0,4	0
		Ala10m	-0,9	-3
		Ala50m	-0,1	-3
62103	2,5	EraI	+1	0

		Ala10m	+0,7	0
		Ala50m	+1,8	0
62107	3,4	EraI	+0,1	-3
		Ala10m	-0,4	-3/-6
		Ala50m	+1,3	-6

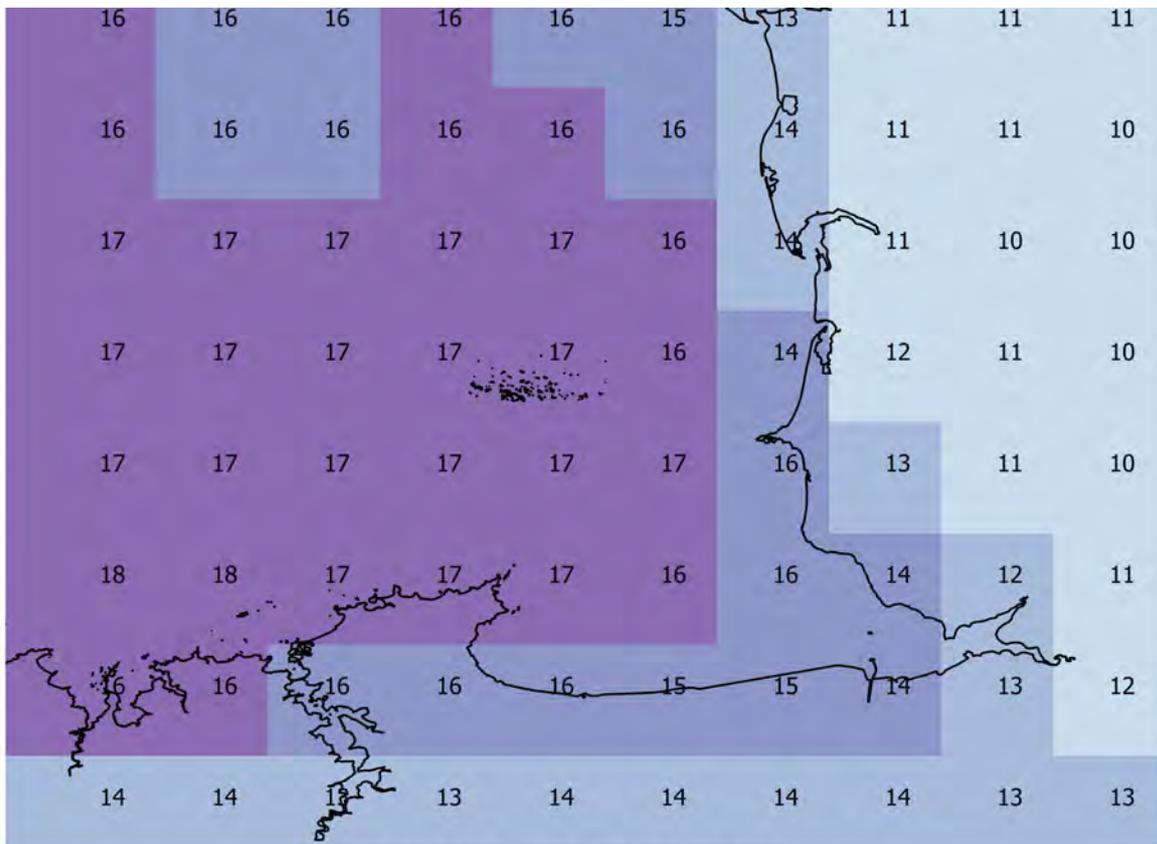
Par ailleurs, le modèle MFWAM forcé par Era-Interim (« EraI ») reproduit le pic de hauteur des vagues de façon comparable à MFWAM forcé par d'Ala10m. La corrélation de MFWAM-EraI avec l'observation est en revanche légèrement moins bonne, ce qui peut être le signe d'une connaissance moins fine des phénomènes météorologiques d'échelle 0.1°.

Pour le choix du forçage le plus pertinent, on préfère se baser sur la comparaison aux hauteurs de vagues plutôt qu'au vent, car il s'agit du paramètre de l'étude que l'on souhaite approcher le mieux. Le forçage de vent du rejeu Aladin à 10 m paraît donc préférable sur le domaine Manche ouest, si l'on exclut la bouée près de Cherbourg qui est trop proche des côtes. Ce résultat se base seulement sur la mesure de hauteurs des vagues de 2 bouées.

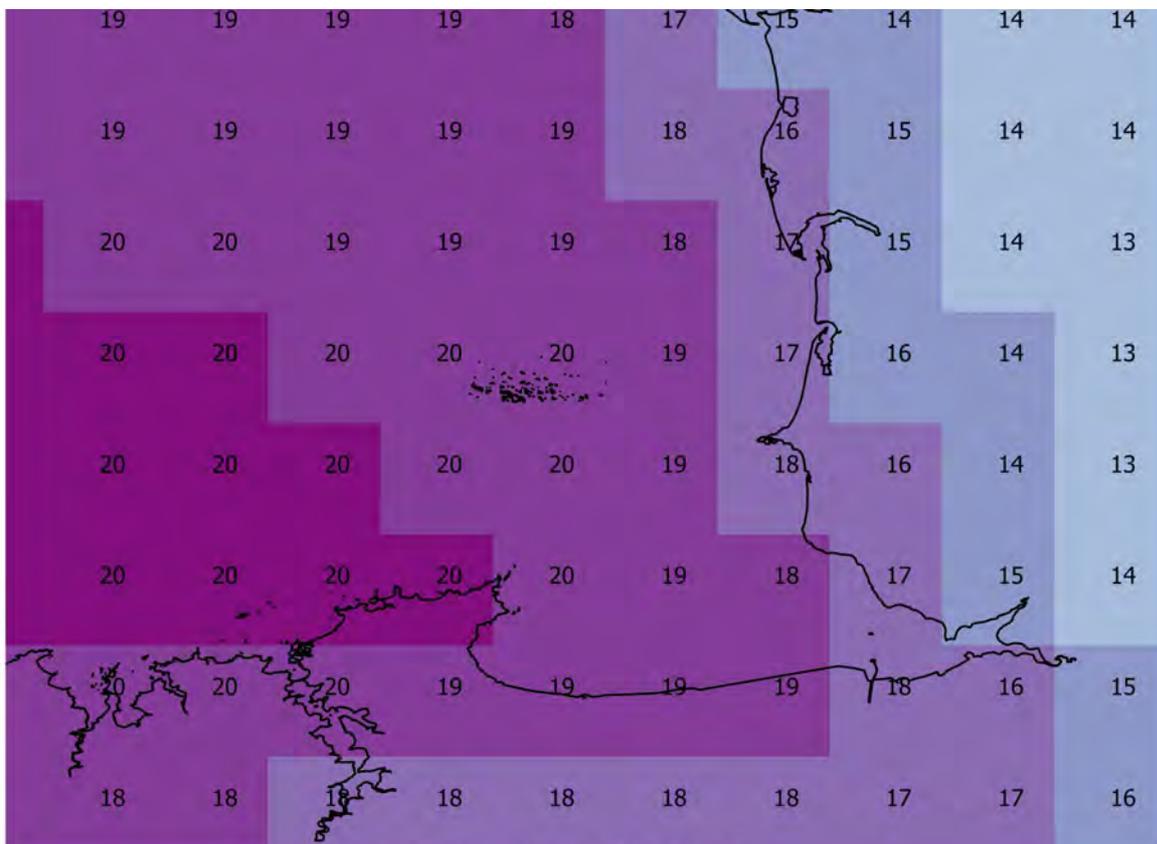
Sur la partie proche Atlantique, la comparaison aux bouées montre que le rejeu Aladin à 10 m sous-estime parfois significativement le vent et que le champ de vent, plus soutenu, à 50 m est alors préférable.

Dans la suite de l'étude, le vent à 10 m du rejeu Aladin 0.1° est considéré comme la référence. Mais les simulations ont aussi été lancées en parallèle avec le forçage de vent dit soutenu, c'est à dire pris à 50 m, afin de donner un encadrement supérieur aux états de mer arrivés en baie lors de la tempête du 13/02/2005.

En guise d'illustration, les deux champs de vent au plus fort de la tempête sont représentés sur les cartes ci-dessous. La différence est d'environ 3 m/s, soit 15 à 20 %.



Aladin 0.1 - Vent à 10m (m/s)



Aladin 0.1 - Vent à 50m (m/s)

Figure 6: Comparaison entre la force du vent au plus fort de la tempête, à 15 h UTC le 13/02/05, du vent à 10 m d'Aladin (en haut) et de celui à 50 m (en bas)

4 Modélisation du niveau marin

4.1 Modèle et configuration

4.1.1 Modèle HYCOM et configuration

Le modèle HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) (version du *SHOM*, Baraille&Filatoff, 1995, Bleck, 2002) en configuration barotrope est le modèle de prévision des surcotes mis en place dans la VVS depuis Janvier 2014. Il est ici utilisé pour le calcul des niveaux d'eau et courants en entrée du modèle WW3.

La dynamique est modélisée sur un domaine couvrant 43°N à 62°N et 9°W à 10°E.

La grille utilisée est curvilinéaire et permet une résolution de l'ordre du kilomètre aux côtes françaises et de 400 m dans le Golfe Normand Breton. Le modèle utilise la bathymétrie fournie par le LEGOS (*Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales, Toulouse*) référencée au niveau moyen. Il est forcé en élévation de surface par les 15 composantes de l'atlas de marée NEA Optimal 2011 (données fournies par F. Lyard du LEGOS). La friction de fond est spatialement variable et spécifiquement adaptée à la dissipation numérique du modèle.

Le calcul de la tension de vent est obtenu selon les équations de Charnock dont le coefficient empirique représentatif de l'effet des vagues sur la tension de surface est choisi à 0.025 (Charnock, 1955).

Les forçages atmosphériques utilisés sont issus de rejeux Aladin 0,1° à 10 m ou 50 m selon le cas d'étude, comme décrit dans la section précédente.

Dans cette configuration, HYCOM ne gère pas les découvements. Dans les zones découvrantes et dont la topographie se situe en dessous du niveau moyen, il a été nécessaire d'approfondir la bathymétrie au niveau des plus basses mers moins un mètre. Une configuration avec gestion des découvrants est en cours d'étude.

4.1.2 Performances globales du modèle de marée et de surcote

Le modèle HYCOM dans la configuration présentée ici a fait l'objet d'une validation approfondie avant sa mise en opérationnel dans la VVS (Paradis et al. 2013). Le modèle a été testé sur un ensemble de onze tempêtes présentant de fortes surcotes et sur une simulation longue d'un an.

Les résultats montrent que le modèle représente les fortes marées (de coefficient supérieur à 95) avec une erreur moyenne en écart type de l'ordre de 15 cm et 36 cm sur, respectivement, les amplitudes des pleines mers et basses mers, et un déphasage moyen de 16 minutes.

Localement à Saint-Malo, ses valeurs moyennes atteignent 24 cm et 50 cm sur les amplitudes de pleines et basses mers, soit des erreurs de 4 et 8 % du marnage observé par forte marée. Le déphasage moyen est de 10 minutes. Une comparaison des amplitudes et phases des principales harmoniques entre la marée modélisée et les données récentes du marégraphe installé à proximité du Mont-Saint-Michel permet d'étendre les résultats de Saint-Malo sur la baie du Mont-Saint-Michel.

Le modèle permet de modéliser la surcote avec une erreur moyenne en écart type de 8cm. Cette valeur atteint 9,5 cm localement sur Saint-Malo, et est associée à une erreur moyenne aux pics de surcote de 13 cm sur la surcote et de 19 cm sur la hauteur totale.

4.2 Méthode

4.2.1 Calcul des surcotes, création des forçages pour WW3

Une première simulation HYCOM avec la marée et les effets de pression et de vent fournit les niveaux d'eau et les courants à une fréquence temporelle de 10 minutes. Ses données sont ensuite interpolées sur une grille régulière de résolution spatiale de 400 m et utilisées comme forçages en élévation et courant dans le modèle WW3.

Une seconde simulation HYCOM avec marée seule permet d'obtenir la surcote par simple différence entre les hauteurs d'eau des deux simulations. La surcote ainsi calculée est composée des effets de pression et de vent sur le niveau d'eau, ainsi que des interactions entre marée et surcote. Cette dernière composante peut être significative dans le Golfe Normand Breton.

Les simulations HYCOM couvrent la période du 03 au 18 février 2005. La dynamique est installée après 3 jours de simulation.

4.2.2 Estimation du recalage temporel

Les premiers rejeux utilisant les forçages Aladin à 10 m et 50 m (sur la journée du 13 février) ont permis d'estimer un décalage optimal afin d'aligner le pic de surcote, représenté par le modèle le 13 février entre 14 et 15 UTC, et la marée de coefficient 108 du 11 février à 7 h 50 UTC.

Un premier décalage simple de - 54 h a été jugé non satisfaisant en raison des interactions entre marée et surcote dans le modèle ; ces interactions peuvent avoir pour effet de légèrement déphaser le pic de surcote par rapport à la pleine mer. Un décalage des forçages atmosphériques de - 51 h dans les simulations a finalement permis une bonne synchronisation du pic de surcote et de la pleine mer.

4.3 Résultats

4.3.1 Résultats de la simulation de la tempête réaliste

Les comparaisons aux données marégraphiques à Saint-Malo permettent de quantifier l'erreur du modèle sur l'événement considéré.

La marée en sortie d'HYCOM (Figure 7) est bien modélisée sur l'événement, sans déphasage significatif et avec une faible erreur en amplitude sur les pleines mers de l'ordre de 10 cm (sous-estimation du modèle). Les basses mers sont moins bien représentées avec une erreur pouvant atteindre 50 cm, soit moins de 10 % du marnage total.

La pleine mer modélisée du 11 février atteint une valeur de 6,20 m vers 08 h UTC.

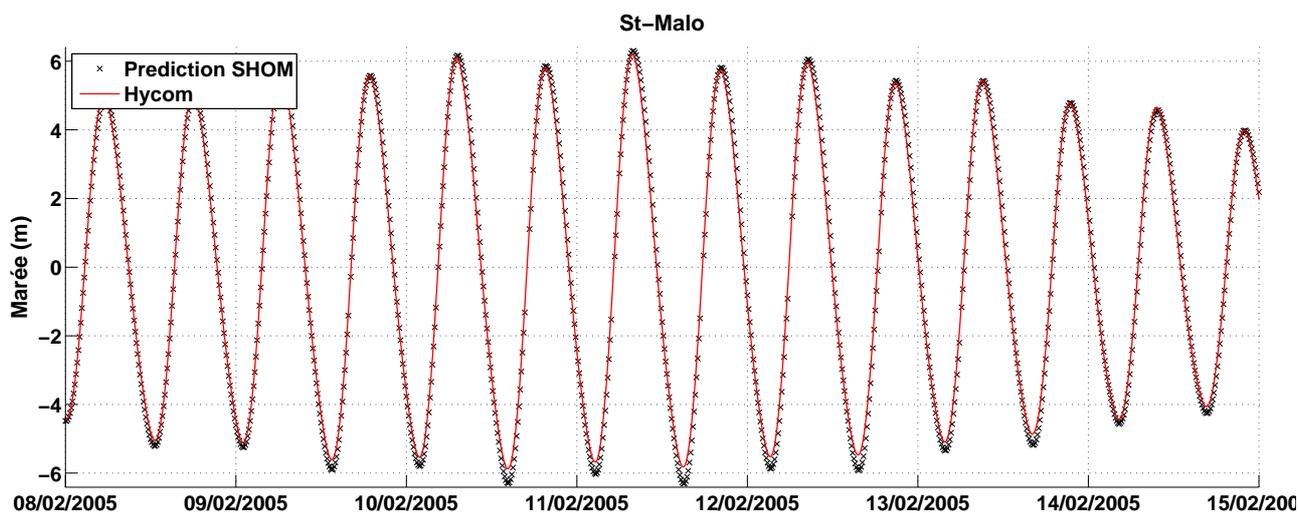


Figure 7: Marée modélisée (en rouge) et prédiction de marée du SHOM (en noir) à Saint-Malo

Les surcotes observée et modélisées à Saint-Malo sont représentées Figure 8. La surcote observée atteint 58 cm vers 15 h UTC (croix noires). La surcote modélisée avec forçages réels et un vent à 10 m (trait plein rouge) est correctement phasée avec les observations, mais n'atteint que 30 cm. La simulation avec le vent à 50 m (trait tireté rouge) permet d'atteindre 45 cm au pic et montre une meilleure représentation de la surcote dans les 12 heures après le pic.

Sur l'événement considéré, le modèle permet donc une représentation des niveaux d'eau sans déphasage mais avec une sous-estimation de la surcote entre 15 et 28 cm selon le vent considéré. La marée modélisée sous estime très légèrement les pleines mers de l'ordre de 10 cm.

On notera que, bien que la tempête ait été choisie en fonction de sa direction et de son intensité, elle survient pendant une période de faible surcote, voire de décote, et entraîne une élévation du niveau marin relativement faible; cette tempête affecte davantage l'état de mer. La quantification de l'erreur du modèle de surcote reste nécessaire pour la fourniture des forçages au modèle de vagues WW3.

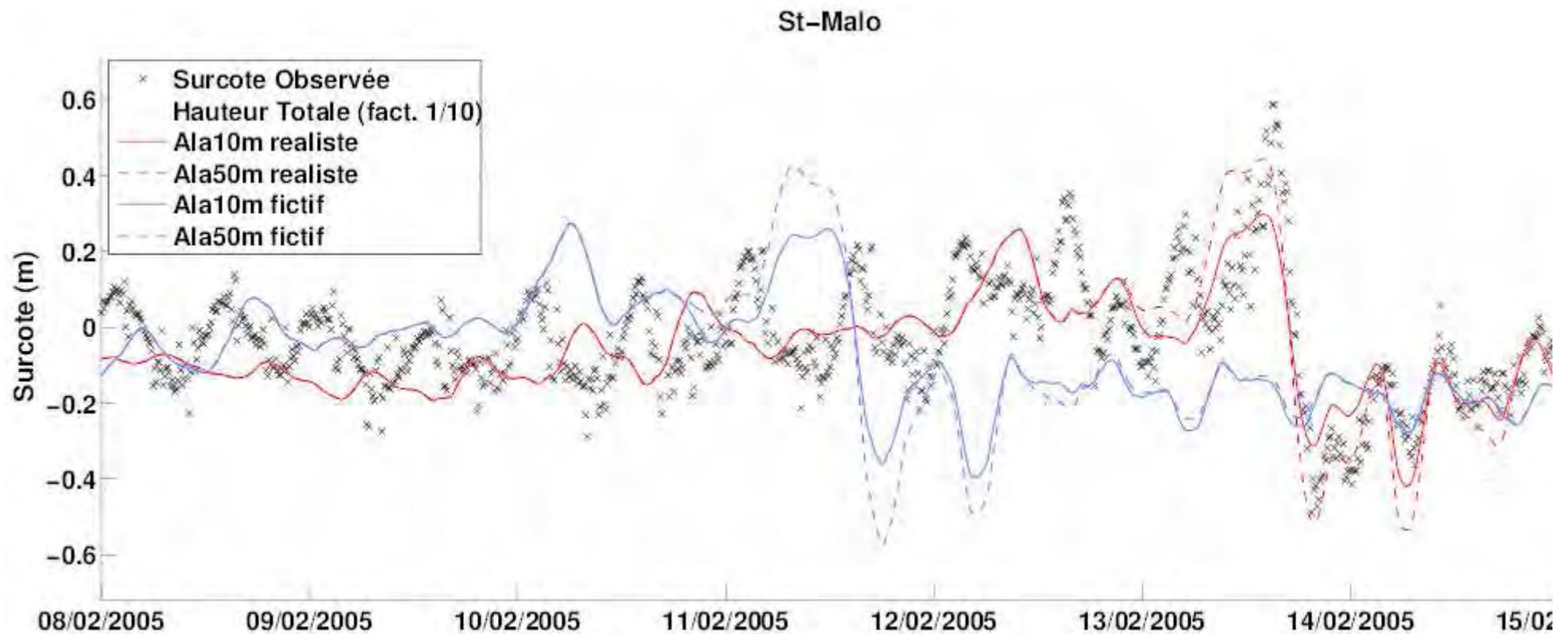


Figure 8: Surcote modélisée avec forçages réels (en rouge) et décalés (fictifs, en bleu) et surcote observée (croix en noir) à Saint-Malo. La hauteur d'eau totale modélisée est représentée avec un facteur 1/10 en pointillés noirs. Les courbes en trait tireté représentent les simulations avec le vent à 50 m (« Ala50m »).

4.3.2 Résultats de la simulation de tempête fictive

Les surcotes modélisées avec forçages fictifs sont également représentés Figure 8 pour le marégraphe de Saint Malo. La surcote avec le vent à 10 m (trait plein bleu) atteint 24 cm au moment de la pleine mer du 11 février au matin. La simulation avec le vent à 50 m (trait tireté bleu) permet d'atteindre 42 cm.

On note peu d'impact de la pleine mer sur le pic de surcote, avec même une légère baisse du niveau modélisé par rapport à la simulation réaliste. La hauteur totale modélisée sur Saint-Malo dans le cas d'une synchronisation de la tempête et de la marée de coefficient 108 atteint une valeur comprise entre 6,5 m et 6,7 m à l'erreur modèle près.

Les surcotes modélisées avec forçages réalistes et fictifs sont également représentées Figure 9 au point A de coordonnées $[-1,61^{\circ}\text{E } 48,66^{\circ}\text{N}]$, situé à 4 km au nord de la digue de la Duchesse-Anne protégeant les marais de Dol.

La simulation réaliste montre des surcotes de respectivement 40 cm et 60 cm pour les vents à 10 m et 50 m, associées à des hauteurs totales de 6 m et 6,30 m respectivement. La simulation fictive montre un niveau d'eau similaire pour le vent à 50 m, et un peu moindre (36 cm) pour le vent à 10 m. Les hauteurs totales atteintes sont alors de respectivement 6,90 m et 7,15 m.

La synchronisation de la tempête et du fort coefficient de marée augmente donc le niveau total de l'ordre d'un mètre. Les interactions marée/surcote sont négligeables sur l'amplitude maximale de hauteur d'eau atteinte dans ce cas de tempête et sur la zone considérée. L'augmentation du niveau

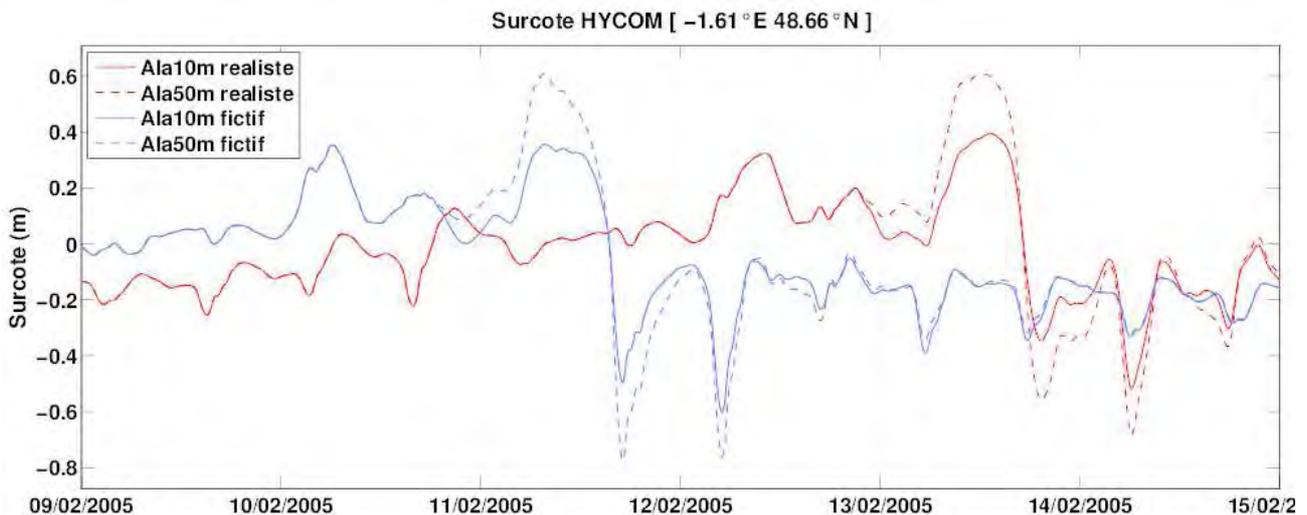


Figure 9: Surcote issue du modèle Hycom en entrée de baie au point $[-1,61^{\circ}\text{E } 48,66^{\circ}\text{N}]$, pour la tempête du 13/02 dite réaliste (rouge) et pour la tempête fictive (bleu), avec le forçage de vent nominal (trait plein, « Ala10m ») ou soutenu (tireté, « Ala50m »)

d'eau est principalement due au marnage plus important par fort coefficient.

4.4 Limite d'usage et perspectives d'améliorations

La topographie sur l'estran du Mont-Saint-Michel présente des zones découvrantes qui s'assèchent à marée basse, ainsi que des courants variables pouvant être localement très élevés. La modélisation sans gestion des découvrants permet une première approche de la dynamique barotrope dans la zone, mais l'interprétation des résultats reste délicate ; la bathymétrie dans le fond du golfe Normand Breton a en effet été approfondie de l'ordre de 8 m, ce qui ne permet pas une représentation réaliste des basses mers et peut engendrer une erreur sur la valeur du niveau marin à la pleine mer, erreur que l'on peut estimer de l'ordre de 10 %. En outre, le trait de côte du modèle est donné par le niveau moyen, ce qui réduit la propagation des eaux sur des zones émergées pouvant être localement immergées durant les pleines mers.

Des études en cours sur la mise en place de la gestion des découvrants, ainsi que l'utilisation de bathymétries (*Biscara et al. 2014*) permettant les débordements dans HYCOM, pourront fournir des résultats plus proches de la dynamique observée.

Il est aussi à noter que les résultats de cette étude préliminaire ont été obtenus avec un modèle barotrope qui ne modélise pas les processus 3D.

L'effet des erreurs inhérentes aux approximations faites dans le modèle de surcote sur le modèle WW3 reste à quantifier dans une étude plus approfondie.

5 Modélisation des états de mer

5.1 Modèle utilisé

WAVEWATCH III (WW3 version 4.18) est un modèle de troisième génération développé entre autres, par la NOAA/NCEP/NWS (Tolman, 2002) dans l'esprit du modèle WAM (Komen et al., 1994). Le spectre de houle est discrétisé avec une résolution directionnelle constante et une résolution fréquentielle logarithmique en fréquence. La version 4.18 utilisée pour cette étude et à Météo-France permet de simuler les états de mer des eaux profondes jusqu'aux zones littorales grâce à l'implémentation de plusieurs paramétrisations (Ardhuin et al, 2010). Il prend en effet en compte une paramétrisation unifiée du large à la côte du déferlement (Filipot et Ardhuin, 2012), la réflexion à la côte (Ardhuin et Roland, 2012), la réfraction due au courant ou à la bathymétrie (Ardhuin et al, 2012) et la friction sur le fond.

La configuration développée par le SHOM et Météo-France a la particularité de reposer sur une maille irrégulière triangulaire qui permet une représentation fine du littoral, jusqu'à 200 m, notamment dans la baie du Mont-Saint-Michel. Ce modèle haute résolution est forcé à sa frontière par le modèle de Météo-France MFWAM.

L'étude sur les forçages de vent a montré l'intérêt de tester un champ de vent plus soutenu (Aladin à 50 m), donnant un encadrement supérieur probable du vent réel lors de l'événement. Par la suite, la désignation de simulations WW3 ayant utilisé le champ de vent soutenu sera complétée par « FF ». Le vent Aladin à 10 m sera quant à lui qualifié de « nominal »

La configuration de WW3 choisie pour cette étude prend en compte la variation de hauteur d'eau due notamment à la marée. Cette caractéristique était nécessaire étant donné les spécificités de la baie du Mont-Saint-Michel et le très important marnage qui la caractérise.

Le modèle de vagues utilise donc en entrée :

- le vent nominal issu du modèle atmosphérique Aladin de résolution 0,1°, pris à 10 m.
- la hauteur d'eau issue du modèle de surcote et marée Hycom
- les courants barotropes issus du modèle de surcote et marée Hycom

Dans l'étape de validation du modèle, l'apport des forçages de hauteur d'eau et de courants est évalué en comparant la configuration nominale décrite ci-dessus avec des versions de WW3 n'utilisant pas ces forçages. On désigne alors :

- beta : la configuration n'utilisant ni hauteur d'eau, ni courant
- beta_niveau: la configuration utilisant la hauteur d'eau, mais pas le courant

Sachant qu'il existe deux forçages de vent, on compte en tout pour la phase de validation du modèle 6 configurations, récapitulées dans le tableau ci-dessous.

Configuration	vent	niveau d'eau	courant
WW3	nominal	X	X
WW3_beta_niveau	nominal	X	
WW3_beta	nominal		
WW3_FF	soutenu	X	X
WW3_FF_beta_niveau	soutenu	X	
WW3_FF_beta	soutenu		

5.2 Simulation de la tempête réelle

L'examen de la tempête en marée réelle permet d'avoir un premier aperçu des états de mer générés par le vent. Il permet surtout d'évaluer la qualité de la configuration du modèle WW3 que nous mettons en œuvre, à l'entrée de cette zone particulière, grâce à l'existence de quelques observations en Manche.

La carte des hauteurs et direction à 14 h UTC de la mer totale sur la façade du Cotentin (figure 10) est une illustration de l'intérêt de la tempête du 13/02/2005. Le vent orienté nord-ouest fait entrer les trains de vague dans la baie du Mont-Saint-Michel, même si celle-ci est en partie protégée par des îlots et l'avancée de St-Malo. A 14 h UTC, le modèle simule des vagues de 2 m en entrée de baie.

L'examen des périodes des vagues et de leurs hauteurs, différenciées entre houle et mer du vent montre qu'il n'y a quasiment pas de houle arrivant dans la baie. Il s'agit surtout d'une mer du vent, avec des périodes courtes et donc peu énergétiques.

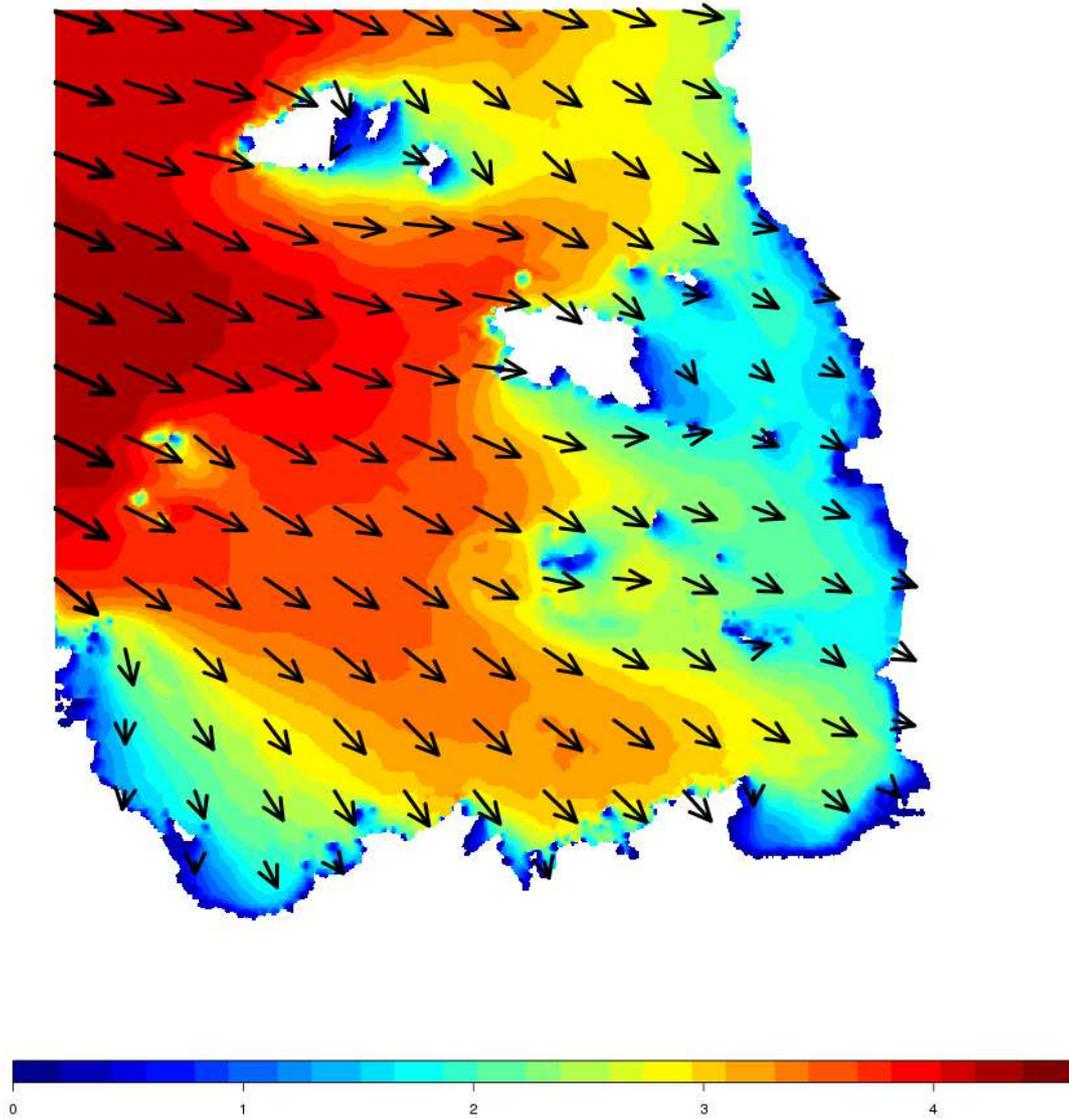


Figure 10: Hauteur significative et direction des vagues pour WW3 le 13/02 à 14UTC (m) entre les côtes d'Ille-et-Vilaine et du Cotentin (golfe breton-normand)

L'objectif de cette partie consiste à estimer la qualité du modèle en comparant ses résultats aux observations disponibles sur la zone d'étude et à analyser l'impact de la prise en compte des forçages de hauteur d'eau et de courant. Hauteur d'eau et courant interviennent en effet dans l'évolution des vagues. Leur prise en compte dans WW3, qui doit apporter plus de réalisme, n'est pas effectuée dans la version utilisée aujourd'hui à Météo-France, d'où l'intérêt d'évaluer cet impact.

5.2.1 Comparaison aux observations

WaveWatch3 a été lancé avec 3 configurations, comprenant tout ou partie des forçages de niveau d'eau et de courant, pour chacun des deux forçages de vent retenus.

Les observations disponibles à proximité, sur l'épisode, se limitent aux mesures de deux bouées, dont l'emplacement est donné sur la carte ci-dessous :

- Bouée 62103, Manche (49,9N – 2,9W, UK Met Office) ancrée avec une hauteur d'eau de 65 m, éloignée des effets côtiers et bon indicateur de la capacité du modèle à simuler la chronologie et

l'amplitude de l'événement, en amont de la zone d'intérêt.

- Bouée 62059, Cherbourg (49,7N – 1,62W, Cerema) ancrée avec une hauteur d'eau de 25 m, soumise à des effets côtiers spécifiques.

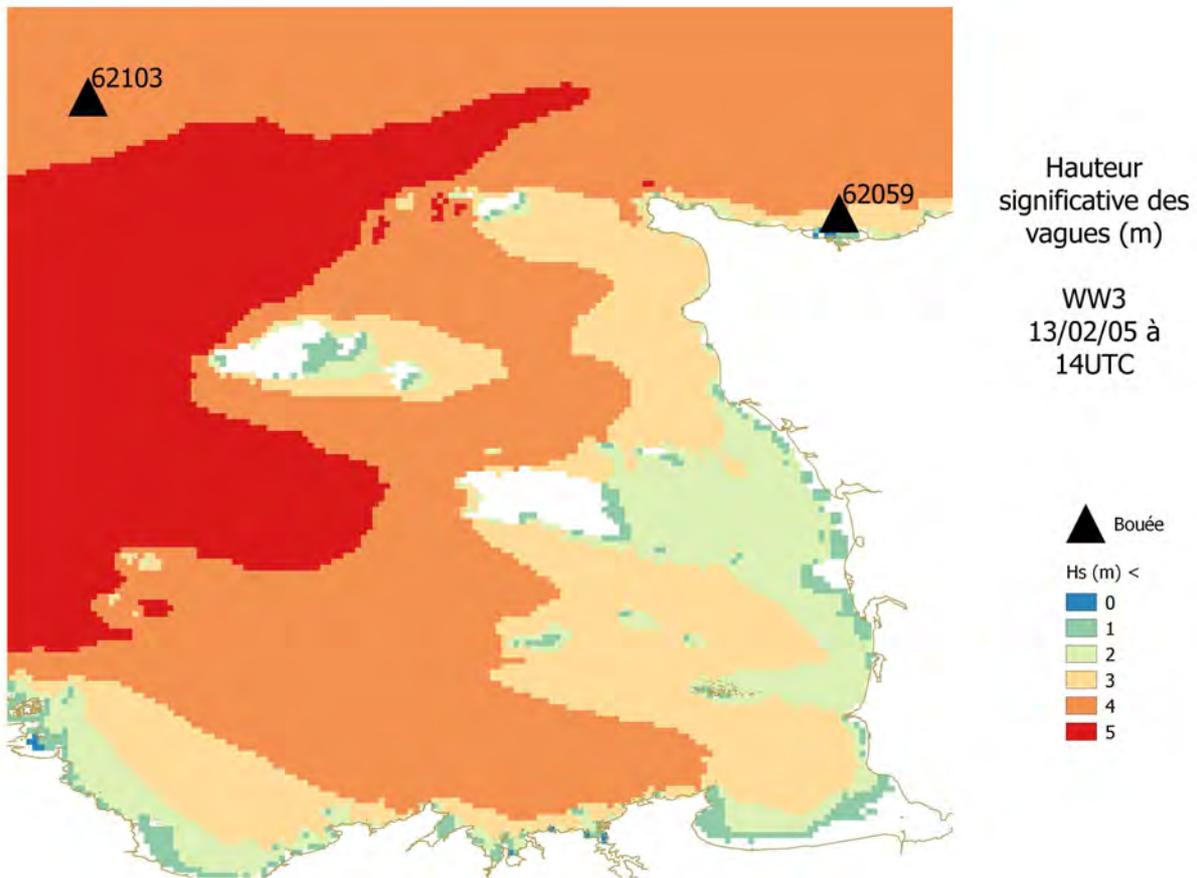


Figure 11: Emplacement des deux bouées utilisées pour la validation du modèle. En arrière-plan, le champ de hauteur de vagues issu du modèle WW3 lors du pic de la tempête.

Les résultats de la comparaison entre les observations et les simulations avec forçage de vent brut sont donnés dans les graphiques ci-dessous. Le modèle a tendance à surestimer les valeurs par rapport à l'observation avant et pendant la tempête du 13/02. Le biais est beaucoup plus faible par la suite.

Il y a de légères différences de hauteur de vagues entre la simulation sans et avec courants (jusqu'à 30 cm par moments). Mais au plus fort de la tempête il n'y a pas de différence significative. On n'observe pas non plus d'écart de hauteur entre la simulation sans et avec niveau d'eau.

Hauteur significative (m) à la bouée Manche

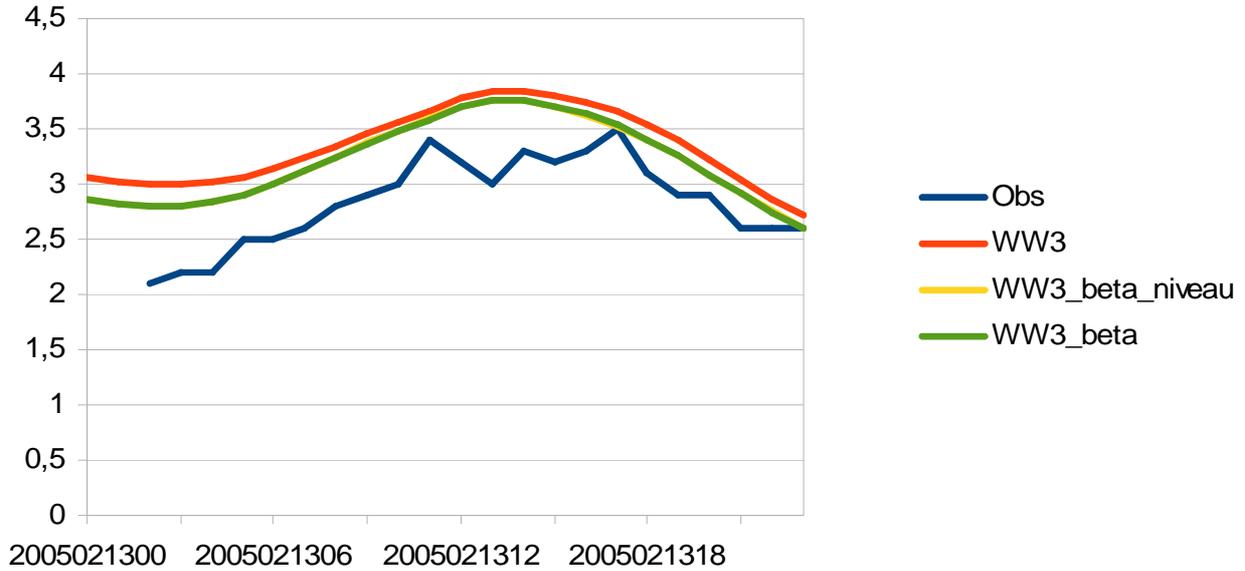


Figure 12: Hauteur des vagues à la bouée Manche le 13 février 2005 entre 0 et 24 UTC pour l'observation et les simulations du modèle WW3 selon 3 configurations différentes (avec toujours le forçage de vent nominal)

Hauteur significative (m) à la bouée Cherbourg

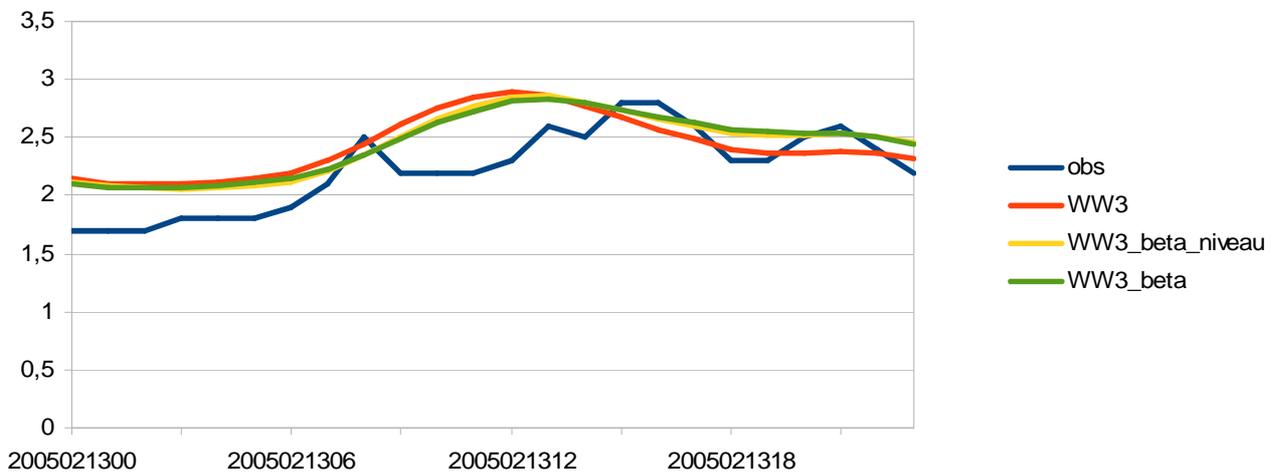


Figure 13: Hauteur des vagues à la bouée Cherbourg le 13 février 2005 entre 0 et 24 UTC pour l'observation et les simulations du modèle WW3 selon 3 configurations différentes (avec toujours le forçage de vent nominal)

Les simulations de WW3_FF, illustrées ci-dessous, surestiment fortement l'observation aux deux bouées. On remarque que la prise en compte des courants a un effet significatif lors de la tempête à Cherbourg. Elle tend à corriger la simulation en faisant diminuer la hauteur des vagues.

Hauteur significative (m) à la bouée Manche

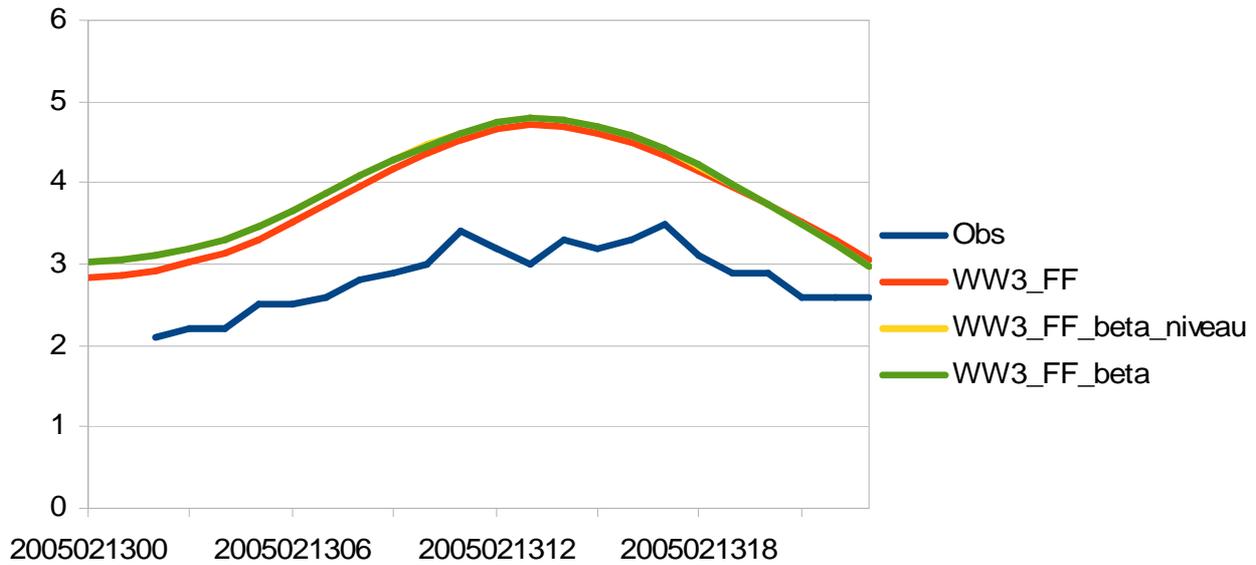


Figure 14: Hauteur des vagues à la bouée Manche le 13 février 2005 entre 0 et 24 UTC pour l'observation et les simulations du modèle WW3_FF selon 3 configurations différentes (avec toujours le forçage de vent soutenu)

Hauteur significative (m) à la bouée Cherbourg

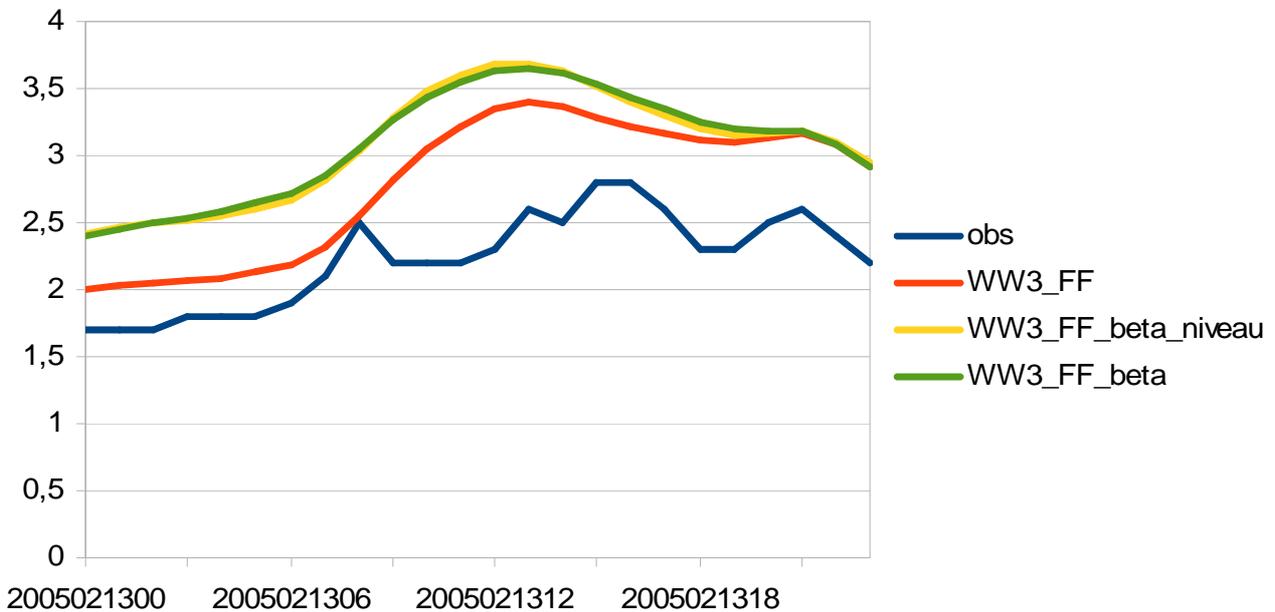


Figure 15: Hauteur des vagues à la bouée Cherbourg le 13 février 2005 entre 0 et 24 h UTC pour l'observation et les simulations du modèle WW3_FF selon 3 configurations différentes (avec toujours le forçage de vent soutenu)

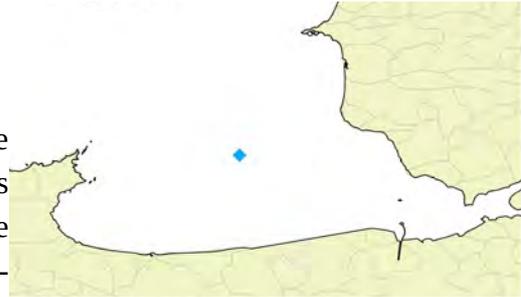
La simulation WW3 est de bonne qualité et donne de meilleurs résultats que celle WW3_FF aux deux bouées. Elle ne surestime le pic de hauteurs des vagues du 13/02 que de 30 cm, contre 1,2 m

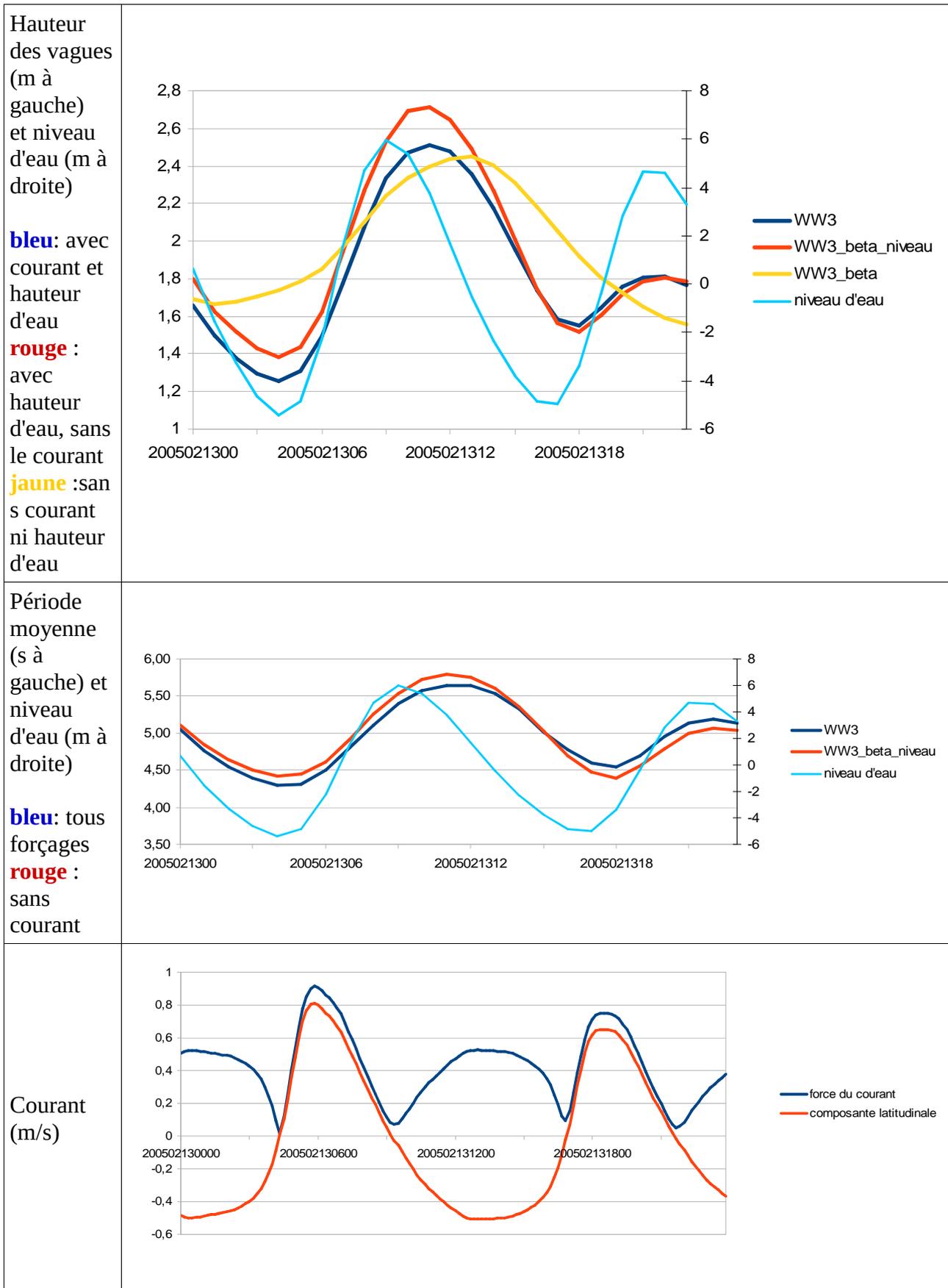
pour WW3_FF à la bouée Manche. A la bouée Cherbourg, WW3 est moins bien corrélé à l'observation que WW3_FF mais estime bien le pic de l'événement, alors que WW3_FF surestime le pic de 60 cm.

Étant donné l'analyse faite aux bouées, sur le vent, mais surtout sur la hauteur des vagues, on pourra considérer la réalité comprise entre la simulation réalisée avec le vent nominal et celle avec le vent soutenu, avec, très probablement, moins d'erreur pour la première.

5.2.2 Impact des forçages de niveau d'eau et de courant

Le tableau ci-dessous permet de comparer le champ de hauteur de vagues et de période moyenne pour des simulations prenant tout ou partie des forçages, avec le vent nominal, en un point en entrée de la baie (cf carte ci-contre). La courbe de hauteur d'eau permet de repérer la marée. La force du courant est également tracée.





Séries temporelles des modèles WW3 et Hycom en entrée de baie lors de la tempête du 13/02/05 (0 à 24 h UTC).

La prise en compte des niveaux d'eau augmente légèrement la hauteur des vagues qui entrent dans la baie lors de la marée haute, de 30 cm environ (soit de 12 %), et décale le pic d'état de mer. Inversement, elle a pour conséquence de diminuer la hauteur en basse mer, de 40 cm le matin par exemple (soit de 25% environ, courbes jaune et rouge du premier graphique) toujours en décalant la survenue du minimum. On voit que les états de mer rentrent davantage dans la baie. La prise en compte des niveaux d'eau permet aussi de simuler le découverture par WW3 lors de la marée basse.

Le courant simulé par Hycom avec le forçage de vent nominal va jusqu'à 0,9 m/s au point étudié, en direction du fond de l'estran, alors que la marée est montante le matin. Le courant inverse de marée descendante l'après-midi est moins marqué (0,5 m/s), ce qui est cohérent avec l'impact du flux contraire de vent de surface.

La simulation prenant en compte le courant simule une hauteur de vagues légèrement plus faible de 10 à 20 cm jusqu'à 15 h UTC environ (soit 8% environ, courbes bleu et rouge du premier graphique). Entre 5 h et 8 h, la baie se trouve dans une période de flot, favorisant une légère diminution de la hauteur des vagues, puis le courant s'inverse et il apparaît un faible jusant entre 12 h et 16 h. L'heure pivot de 15 h, à partir de laquelle l'impact des courants diminue, correspond au pic du jusant, et aussi au début de la diminution du vent. L'impact est similaire pour la période de vent. Elle est d'abord plus faible de 5 à 10 % quand le courant est pris en compte, puis légèrement plus forte après 15 h UTC (2^e graphique).

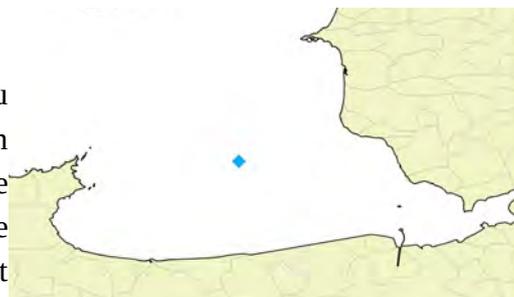
Le point étudié a été comparé au reste de la baie, avec forçage nominal et soutenu, par des données non tracées dans le présent rapport. Il apparaît que le courant est maximal à l'entrée ouest de la baie, au large de Cancale, avec un pic le matin pouvant atteindre 1,8 m/s. Ailleurs les valeurs de courant sont proches de celles du point étudié.

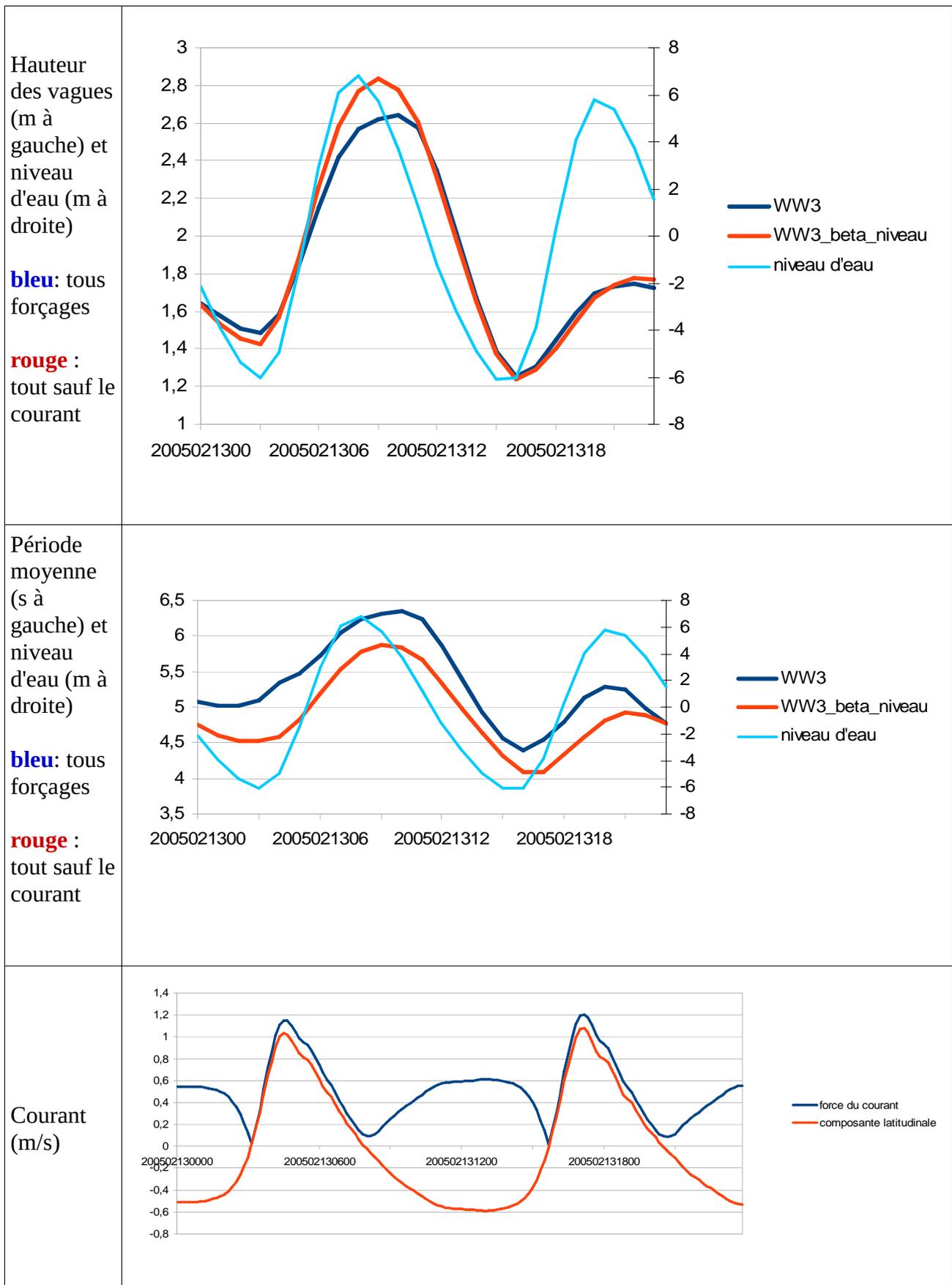
Avec le forçage soutenu, les courants sont similaires. Si l'on excepte la côte nord de Cancale, les courants sont plutôt faibles (inférieurs à 1 m/s) et ont relativement peu d'impact, 20 cm environ au plus, alors que le pic de hauteurs des vagues est de 2,5 m en vent nominal (8%), ou 3,3 m en vent soutenu (6%) au point traité.

5.3 Simulation de la tempête fictive

5.3.1 Impact du courant

La chronologie entre la marée et la tempête étant différente du cas réel, le courant et donc son impact sont à réanalyser. On retrouve dans le tableau ci-dessous l'effet de la prise en compte du forçage de courant sur la hauteur des vagues et la période moyenne au même point, en entrée de baie, pour un vent nominal.





Séries temporelles des modèles WW3 et Hycom en entrée de baie lors de la tempête fictive (marée du 11/02/05 mais vents du 13/02/05).

Le courant atteint jusqu'à 1,2 m/s lors des deux marées montantes de la journée. On remarque que

cette valeur est légèrement supérieure au cas de la tempête réelle, ce qui est cohérent avec le coefficient de marée plus élevé.

Le pic de la tempête, concomitant avec l'étale de la pleine mer, est soumis à un faible courant, inférieur à 0.6 m/s. Le courant a cependant un impact modéré sur la hauteur des vagues en début de journée, lorsqu'il est dans le sens du vent. Il contribue à atténuer le pic de hauteurs des vagues de 20 cm environ (soit de 7%). Il a aussi pour effet d'augmenter la période des vagues de 0,2 à 0,5 s lors de l'événement (soit de 9%).

Les cartes ci-dessous montrent la répartition spatiale des courants lors de deux pics relatifs : le matin à 4 h 20 UTC avec un courant rentrant dans la baie et à 15 h UTC avec un courant inverse. On remarque que la partie sud-ouest est relativement épargnée par les courants, comparativement au nord de Cancale et à la zone est.

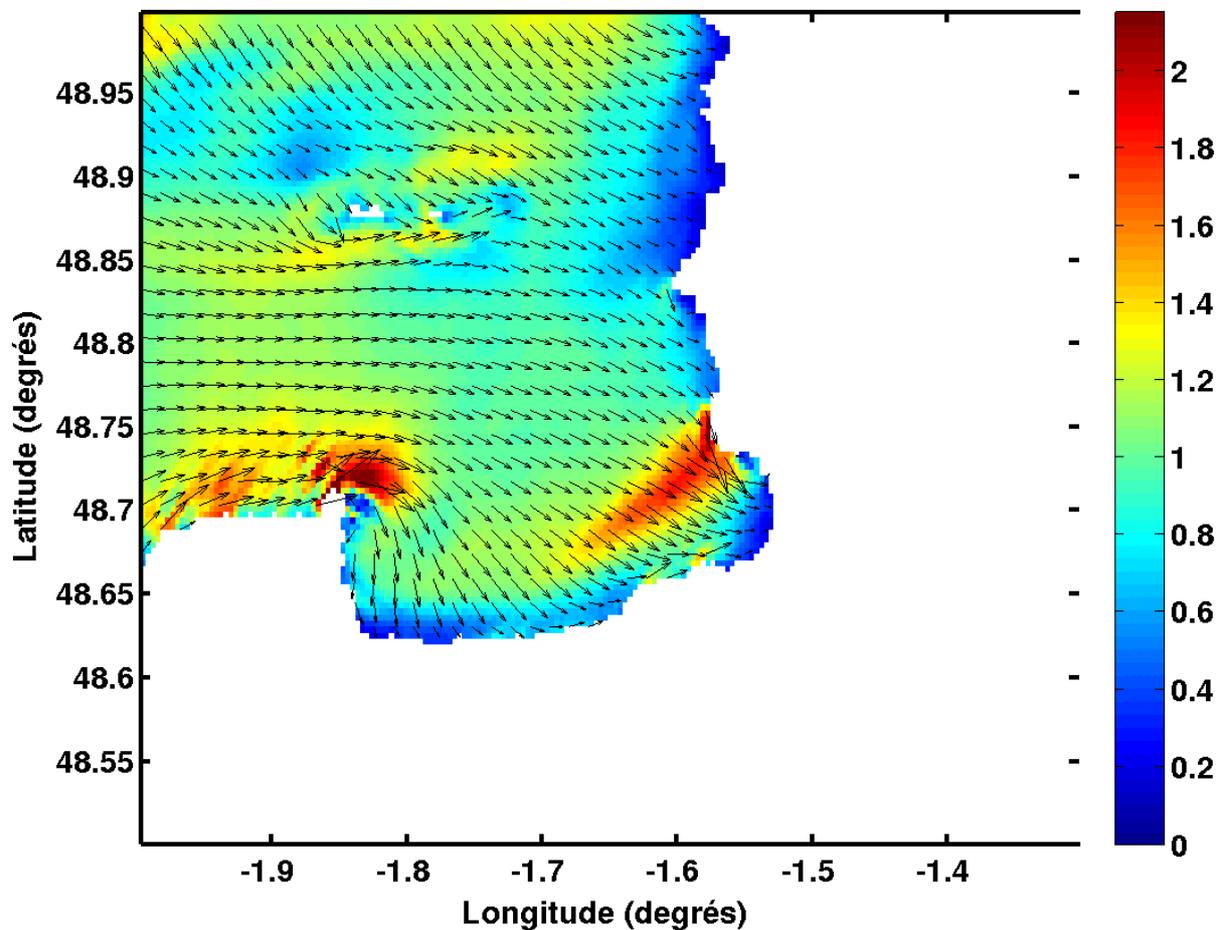


Figure 16: Courant barotrope issu d'Hycom à 4 h 20 UTC lors de la tempête fictive, orienté vers le fond de la baie (flot de la marée)

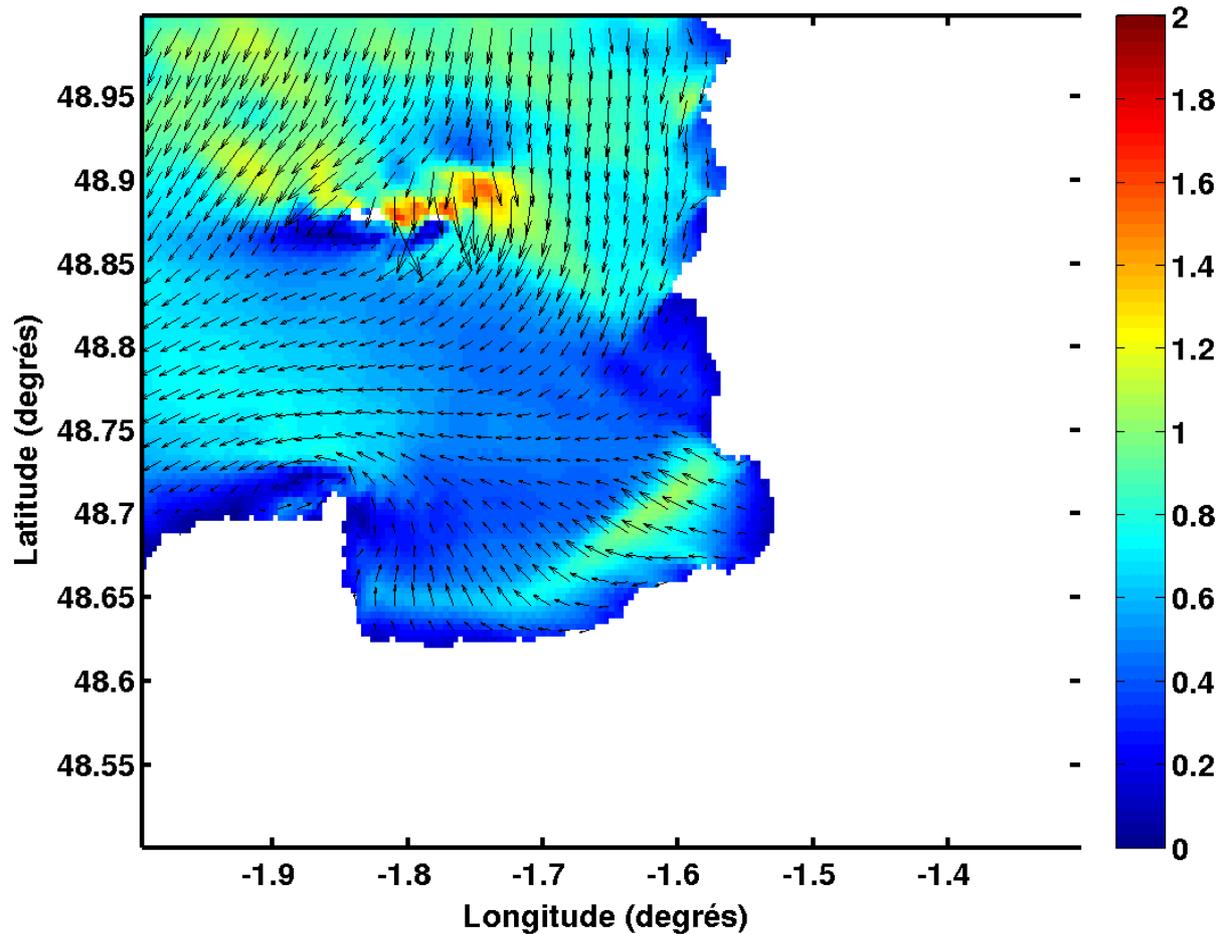


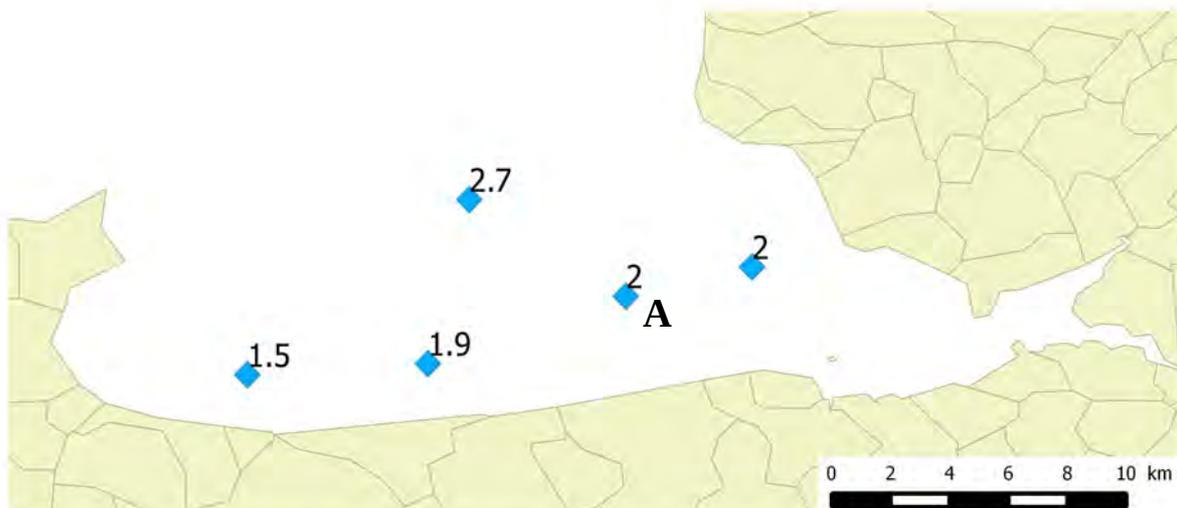
Figure 17: Courant issu d'Hycom à 15 h UTC, lors de la tempête fictive, orienté vers le nord-ouest (jusant de la marée)

Lorsque le modèle est forcé par le vent soutenu, les différences entre les simulations avec et sans courant sont nettement amoindries sur la hauteur et la période moyenne.

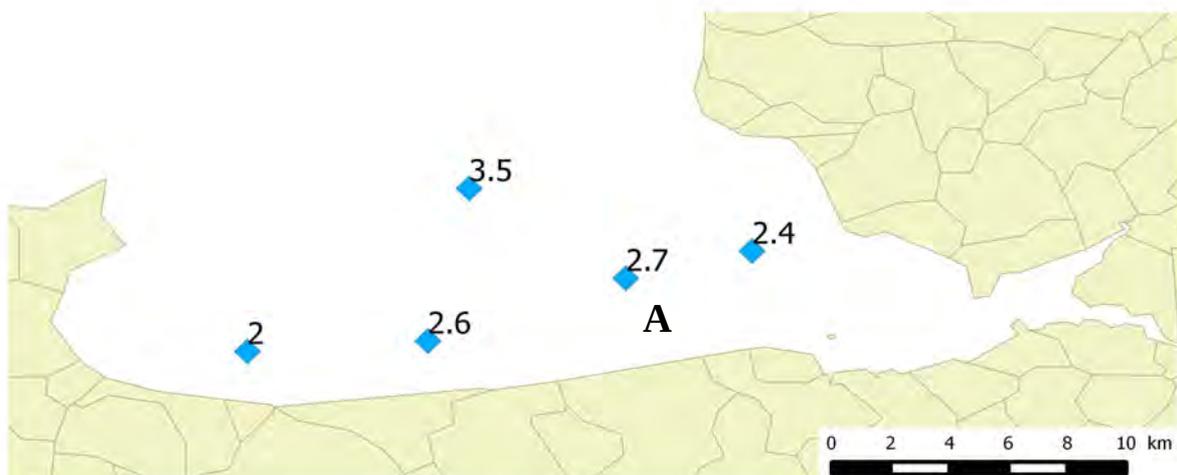
On trouve donc, en marée fictive, des valeurs de courant non négligeables lors de la montée de la marée, atteignant 1 m/s dans la baie. Ce courant influe modérément sur la hauteur des vagues, de 20 cm au plus (7%), et contribue à l'allongement de la période des vagues. L'état de mer reste cependant caractéristique d'une mer du vent, avec des périodes relativement courtes.

5.3.2 Analyse des états de mer

La tempête fictive, jouée avec la marée du 11/02 de 108, a été étudiée sur plusieurs points répartis dans la baie. Les quatre points alignés au sud sont découverts en marée basse. La hauteur des vagues atteinte lors du pic de tempête, coïncidant avec la haute mer, pour WW3 et WW3_FF est indiquée sur les cartes ci-dessous. Ce pic d'état de mer survient un peu plus tard, de l'ordre d'une heure, pour les deux points les plus à l'est, car ils ne sont pas directement exposés au flux entrant dans la baie.



Hauteur significative des vagues maximale lors de la tempête fictive pour la version WW3 (m)



Hauteur significative des vagues maximale lors de la tempête fictive pour la version WW3_FF (m)

La courbe temporelle de la hauteur des vagues au point A est figurée dans le graphe ci-dessous. Elle montre bien le phénomène de découvremment lors de la marée basse. Lors de la marée haute, la hauteur des vagues restent plus de trois heures supérieure à 1,5 m pour WW3 et à 2 m pour WW3_FF.

Hauteur significative (m) au point A

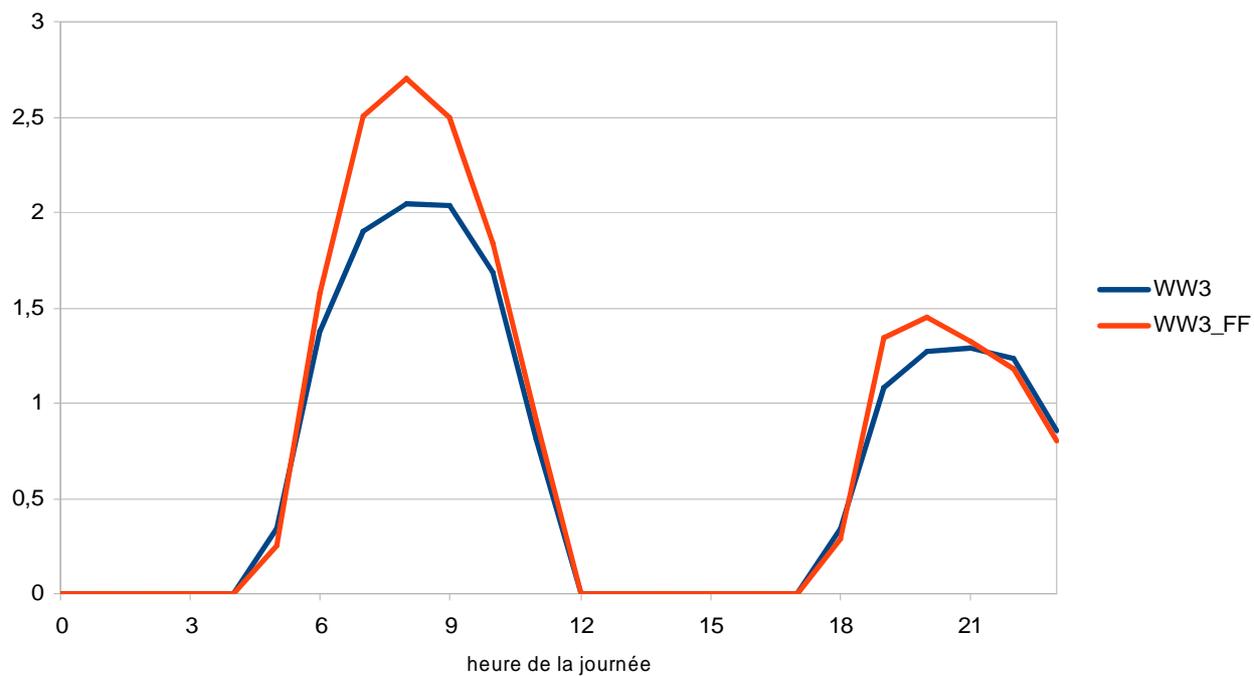
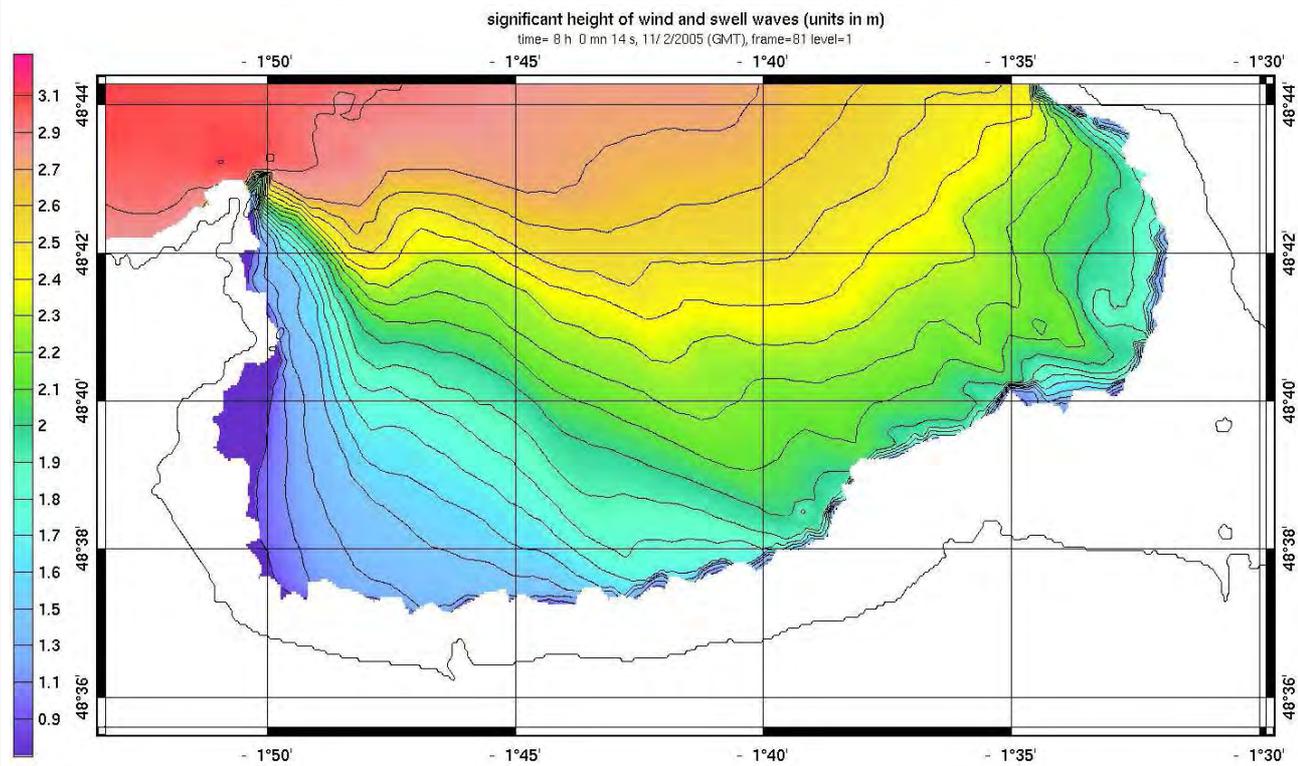
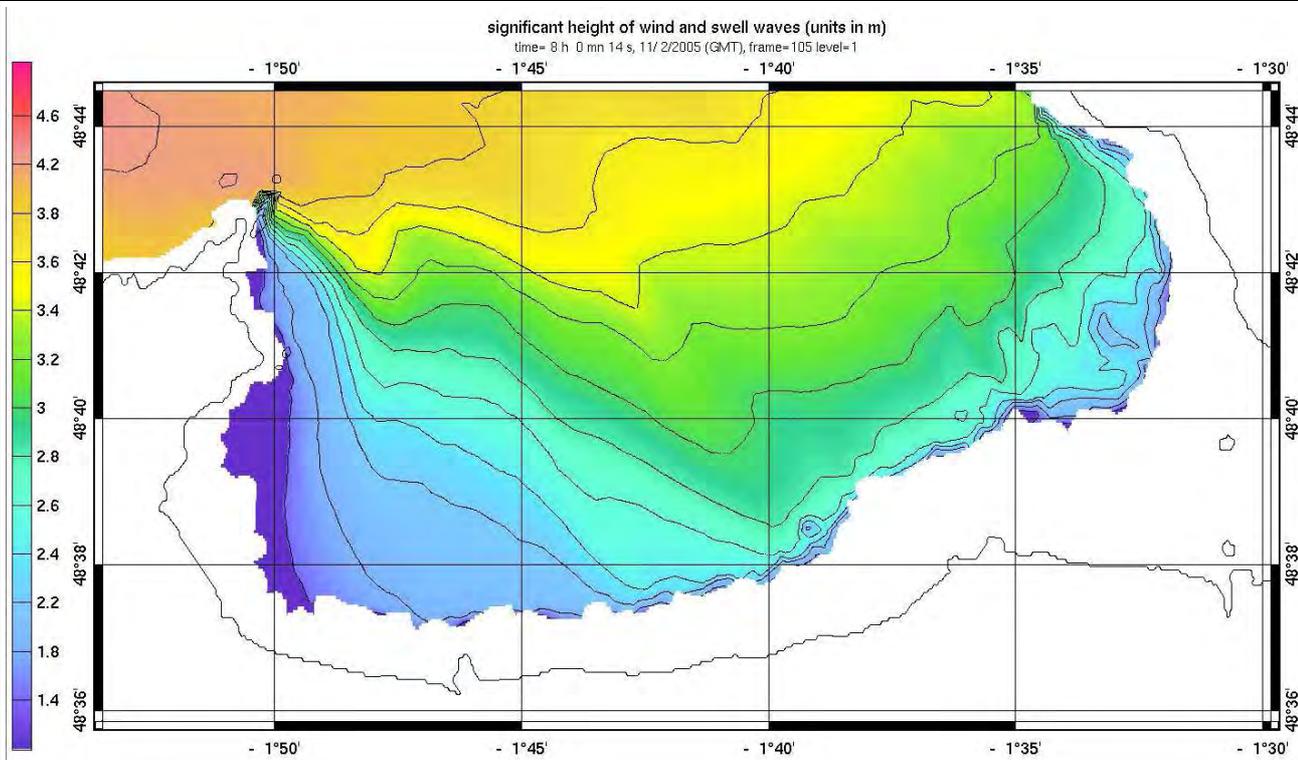


Figure 18: Sortie ponctuelle (point A au fond du golfe breton-normand) de WW3 de la hauteur des vagues lors de la tempête fictive (2 cas : vent nominal et soutenu).

Hauteurs significatives des vagues (m) du modèle WW3, lors du pic de la tempête, à 8h en prenant en compte la marée fictive, pour les 2 forçages de vent



WW3 forçage avec vent nominal



WW3 forçage avec vent soutenu

6 Conclusion

Des outils opérationnels (modèles de vagues et de surcotes) mis en œuvre dans le cadre du dispositif de vigilance vagues submersion, ont été utilisés pour rejouer un événement de tempête (13 février 2005) décalé quelques jours plus tôt pour coïncider avec une marée forte (coefficient de 108). Avec un vent réaliste de nord-ouest sur la zone d'étude, le modèle WW3 simule des hauteurs de vagues atteignant 1,5 à 2 m à 2 km de la digue, quand le pic de vent est remis en phase avec la pleine mer d'une grande marée. Dans un tel contexte, les forts états de mer auraient sévis sur une durée d'environ 3 heures, à 2 km de la digue.

La force de la tempête du 13/02 n'est pas exceptionnelle. Nous avons renforcé la vitesse du vent (+20 %) et le modèle WW3 a alors simulé des vagues allant jusqu'à 2,5 m à 2 km de la digue, toujours avec le pic de vent en phase avec une grande marée.

Ces résultats ont été obtenus avec un nouveau modèle de vagues haute résolution, jusqu'à 200 m, simulant les phénomènes spécifiques aux eaux peu profondes. Ils doivent être interprétés en ayant connaissance des limitations des modèles. WW3 a pu être validé en deux points relativement distants (rejeu de la tempête, en situation de marée réelle), avec des écarts aux observations de 15 à 20 % sur la journée du 13/02 et un pic de hauteur des vagues bien vu à 10 % près avec le vent nominal. Malheureusement il manque des observations dans la baie pour confirmer la qualité du modèle sur cette zone d'étude. Les spécificités du site, notamment son marnage exceptionnel, rendent en effet la modélisation des hauteurs d'eau, et des vagues indirectement, plus difficile.

Le modèle de surcote utilise une limite terre/mer fixe et sa bathymétrie doit être artificiellement creusée pour assurer la stabilité de la simulation. Les hauteurs d'eau en entrée de WW3 sont donc biaisées à l'intérieur de la baie, avec des valeurs plus importantes qu'en réalité, ce qui impacte indirectement la hauteur des vagues.

L'utilisation du mode « wetting and drying » du modèle de surcote, aujourd'hui en phase d'étude, mériterait d'être testé pour représenter plus fidèlement l'extension de la mer en marée haute et ainsi étudier l'état de mer au niveau de la digue et non plus seulement à 2 km.

En outre, des configurations de ces modèles, raffinés en résolution (quelques dizaines de mètres, grâce à des imbrications) et prenant en compte les interactions vagues/niveau marin de façon plus intégrées (simulations véritablement couplés échangeant leurs variables au cours de l'intégration) seraient une solution plus appropriée. Mais cela demande plus de temps et de R&D car les solutions techniques et scientifiques ne sont pas encore évidentes. Le projet Homonim, financé par la DGPR, aborde le problème (démonstrateur pour les pertuis charentais sur la tempête Xynthia) dans sa phase 1 qui se termine en 2015. Il faudrait renforcer cet axe de R&D dans la phase 2 pour avancer sur une solution redéployable sur d'autres sites mais le budget ne le permet pas actuellement.

Enfin, l'instrumentation du site de la baie du Mont St Michel, est indispensable pour calibrer les modèles de niveau marin et d'état de mer, quelle que soit la solution de modélisation retenue. Sans épisode documenté et significatif, à proximité des sites à surveiller, l'exercice de modélisation est délicat et la confiance accordée aux résultats amoindrie.

Référence

- Ardhuin F. et al. Semi-empirical dissipation source functions for ocean waves : Part 1, definition, calibration and validation. *J. Phys. Oceanogr.*, 40, 1917-1941, 2010.
- Ardhuin F. et Roland A. Coastal wave reflection, directional spread, and seismoacoustic noise sources. *J. Geophys. Res.*, 117, C00J20, 2012
- Ardhuin F. et al. Numerical wave modeling in conditions with strong currents : dissipation, refraction and relative wind. *J. Phys. Oceanogr.*, 42, 2101-2120, 2012
- Baraille R., Filatoff N. *Modèle shallow-water multicouches isopycnal de Miami*. Rapport Technique 003/95, SHOM/CMO. 1995
- Biscara L. et al. *Modèles numériques de bathymétrie pour la prévision hydrodynamique du dispositif vigilance vagues-submersions*. JNGCGC 2014, Dunkerque, France. 2014
- Bleck R. *An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates*. Ocean Modelling, Vol. 4(1), pp 55–88. 2002
- Charnock H. *Wind Stress on a Water Surface*. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., Vol. 81, pp 639–640. 1955
- Filipot J.-F. et F. Ardhuin. A unified spectral parametrization for wave breaking : from the deep ocean to the surf zone. *J. Geophys. Res.*, 117, C00J08, 2012
- Komen et al, eds. *Dynamics and modelling of ocean waves*. Cambridge université press, 1994.
- Météo-France/Direction Interrégionale Ouest/Etudes et Climatologie. *Fiche Vimers, tempête du 13 janvier 2005*. 2014
- Météo-France/Direction Interrégionale Ouest/Etudes et Climatologie. *Rapport technique II : validation météorologique des « rejeux » des 25 situations de référence*. 2014.
- Paradis D. et al. *Inter-comparaison de 3 modèles de surcotes dans le cadre du projet Homonim*. Rapport Technique Météo-France/Dprévi. 2013
- Tolman, H., User manual and system documentation of wavewatch III version 2.22, Tech. Rep., NOAA/NWS/NCEP/MMAB, 2002

Glossaire

- CEP : Centre Européen pour les Prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF en anglais).
- Era-Interim : Réanalyse du modèle atmosphérique et océanique du CEP remontant jusqu'à 1979. Les réanalyses sont effectuées en temps différé. Elles consistent à prendre en compte une seule version de modèle sur une longue période et davantage d'observations pour caler le modèle que les contraintes de l'opérationnel ne le permettent en temps réel.
- Hauteur significative ou H1/3 : Hauteur moyenne du tiers des vagues les plus élevées. Correspond à l'ordre de grandeur que se fait un observateur de la hauteur des vagues.
- MFWAM : Modèle de vague global (0.5°) et régional (0.1°) de Météo-France, utilisé en

opérationnel.

Surcote : Différence entre la hauteur du niveau marin observée et la hauteur due à la seule marée. Elle est notamment engendrée par le passage d'une dépression et l'afflux d'eau dû au vent.