



HAL
open science

Modélisation des surcotes marines cycloniques dans le golfe du Bengale

Laurent Testut, Jamal Uddin Khan, Fabien Durand, Yann Krien

► **To cite this version:**

Laurent Testut, Jamal Uddin Khan, Fabien Durand, Yann Krien. Modélisation des surcotes marines cycloniques dans le golfe du Bengale. *La météorologie*, 122, pp.031, 2023, 10.37053/lameteorologie-2023-0070 . hal-04916965

HAL Id: hal-04916965

<https://ut3-toulouseinp.hal.science/hal-04916965v1>

Submitted on 29 Jan 2025

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Modélisation des surcotes marines cycloniques dans le golfe du Bengale

Laurent Testut^{1*}, Jamal Uddin Khan^{1,2}, Fabien Durand², Yann Krien²

1. Littoral, Environnement et Sociétés, CNRS / La Rochelle Université, La Rochelle

2. Laboratoire d'étude en géophysique et océanographie spatiales, Université de Toulouse / Cnes / CNRS / IRD, Toulouse

Résumé

Le golfe du Bengale, au nord-est de l'océan Indien, est le siège tristement célèbre des cyclones tropicaux parmi les plus meurtriers de l'Histoire. Dans sa partie nord baigne le delta du Bengale, plus vaste région deltaïque de la planète. Malgré des avancées récentes, la morphologie et l'hydrodynamique complexes de ce grand delta, combinées au coût numérique de la modélisation hydrodynamique, ont empêché la prévision des surcotes marines sur cette région très vulnérable. Nous présentons ici un système de prévision des surcotes cycloniques fondé sur la plateforme de modélisation Schism-WWM, qui est à la fois efficace numériquement, cohérente physiquement et utilisable en temps réel avec des ressources informatiques limitées. Ce système de modélisation a permis de simuler en temps quasi réel le cyclone *Amphan* en mai 2020.

Abstract – Chasing the super cyclone *Amphan*: a brief history of surge modeling in the Bay of Bengal

The Bay of Bengal is a well-known birth region to some of the deadliest cyclones in history. In its northern part lies the largest deltaic region, the Bengal delta. Despite recent advancements, the complex morphology and hydrodynamics of this large delta and the associated modeling computational costs impede the storm surge forecasting in this highly vulnerable region. Here we present a proof of concept of a physically consistent and computationally efficient storm surge forecasting system tractable in real-time with limited resources. With a state-of-the-art wave-coupled hydrodynamic numerical modeling system, we forecast the 2020 super-cyclone *Amphan* in real-time.



Digue emportée par le cyclone.

Les inondations côtières engendrées par les surcotes marines¹ lors du passage d'une tempête ou d'un cyclone sont un des risques côtiers naturels les plus dangereux. Elles tuent chaque année plus de 8 000 personnes (en moyenne sur le siècle dernier) et en impactent directement 1,5 million (Bouwer et Jonkman, 2018). Parmi les bassins océaniques exposés aux cyclones tropicaux, le golfe du Bengale, dans le nord de l'océan Indien, est l'un des plus meurtriers. L'activité cyclonique dans ce golfe y est très différente de celle des autres bassins, car elle présente une répartition annuelle bimodale de la fréquence des cyclones, avec un pic avant la mousson indienne (avril-mai) et un autre en octobre-novembre à la fin de la mousson. Le nord de l'océan Indien, qui ne représente en nombre que 6 % des cyclones mondiaux, recense à lui seul entre 50 et 70 % des victimes liées aux cyclones tropicaux (Alam et Dominey-Howes, 2015). Pour ce bassin océanique semi-fermé au nord, les victimes se concentrent dans le delta du Bengale que se partagent l'Inde et le Bangladesh, où plus de 150 millions de personnes vivent à seulement quelques mètres au-dessus du niveau moyen de

la mer. Pour avoir une idée de l'ampleur des dégâts matériels et des pertes humaines que peuvent générer de tels événements, on ne citera que deux exemples. Le premier, emblématique à plusieurs titres, puisqu'il occupe la place de cyclone le plus meurtrier de l'histoire et qu'il est à l'origine du déclenchement d'une guerre civile, est le cyclone tropical *Bhola*, qui a frappé les 12 et 13 novembre 1970 la région du Bengale occidental, dans le nord-est de l'Inde, et le Pakistan occidental, devenu peu de temps après l'État indépendant du Bangladesh. La guerre d'indépendance qui se déclenche peu de temps après le passage de ce cyclone est une conséquence directe de la lenteur de la réaction du gouvernement pakistanais de l'époque. Le bilan humain de cette catastrophe est l'un des plus lourds qui soit lié à une catastrophe naturelle, puisque l'estimation officielle tourne autour de 300 000 morts

1. On peut aussi trouver dans la littérature française les termes d'onde de tempête et de marée de tempête pour désigner le phénomène de soulèvement de la surface de la mer qui est dû à l'effet d'une perturbation météorologique, celle-ci venant élever le niveau de la mer par rapport au niveau que prévoyait le calcul de la seule marée astronomique.

* laurent.testut@univ-lr.fr

et que certaines estimations font état d'un demi-million de victimes. Le deuxième exemple, beaucoup plus récent, est le cyclone *Nargis*, qui a frappé la Birmanie le 2 mai 2008, faisant officiellement 138 000 morts. Ces deux cyclones n'avaient rien d'exceptionnel en termes d'intensité, puisque *Bhola* a été classé au plus fort de son intensité en catégorie 3 et *Nargis* en catégorie 4, sur une échelle de 1 à 5. Au cours des dernières décennies, le nombre de victimes a diminué de plusieurs ordres de grandeur. Dans le même temps, le coût des dommages matériels a considérablement augmenté (Alam et Dominey-Howes, 2015). La raison de la baisse sensible de la mortalité est liée à une meilleure coordination entre les pays, à l'amélioration des systèmes de communication, à l'augmentation du nombre des infrastructures d'hébergement (abris anticycloniques) et surtout à l'amélioration de la prévision numérique des cyclones tropicaux et des surcotes qu'ils engendrent. C'est ce dernier point que nous allons détailler dans cet article.

Les deux composantes d'un bon système de prévision opérationnel

Au cours des dernières décennies, les systèmes météorologiques mondiaux de prévision des cyclones (notamment les champs de pression, intensité et direction du vent) ont considérablement progressé. Différents modèles globaux produisent désormais des prévisions en routine plusieurs fois par jour avec une résolution spatiale de l'ordre de la dizaine de kilomètres. Ils sont capables de fournir des prévisions de la trajectoire et de l'intensité des cyclones sur des échéances allant de quelques heures à une semaine. Des systèmes opérationnels de prévision des ouragans (l'équivalent des cyclones pour l'Atlantique et une partie du Pacifique) comme l'Hurricane Weather Research and Forecasting (HWRF) ont émergé et atteint un niveau de maturité permettant de fournir des prévisions relativement fiables des cyclones plusieurs jours à l'avance dans l'ensemble des tropiques. Cependant, la prévision précise de la trajectoire et de l'intensité d'un cyclone, même si elle est fondamentale, renseigne peu sur les conséquences en termes d'inondations liées aux surcotes lorsqu'il arrive à la côte. Pour cela, il



Figure 1. Image du satellite Sentinel de la partie est de la région des Sundarbans, au Bangladesh. © ESA.

faut disposer de modèles numériques hydrodynamiques de l'océan capables de calculer la surcote marine que va engendrer le cyclone. De nombreuses études qui ont débuté dans les années 1970 ont permis d'identifier les ingrédients indispensables à une modélisation précise des surcotes marines et des inondations qu'elles entraînent.

Les processus physiques à l'origine des surcotes marines dans la baie du Bengale

Le plus grand delta du monde, constitué des fleuves Gange, Brahmapoutre et Meghna, charrie ses eaux dans le golfe du Bengale qui bat au rythme des marées, dont le régime est macrotidal² avec un marnage pouvant atteindre 5 mètres au nord-est du bassin, dans l'est du delta. La grande étendue géographique de ce delta et la complexité du réseau fluvial rend extrêmement complexe la modélisation fine des niveaux d'eau (figure 1).

Au cours d'un cyclone, la chute de pression atmosphérique peut dépasser 50 hPa (équivalent à 50 cm de dénivellation de la surface de l'eau) au cœur du cyclone et les vents peuvent dépasser

250 km/h. C'est cette chute de la pression atmosphérique et la contrainte exercée par les vents sur la surface de l'océan qui sont généralement les causes principales de la surcote marine. On sait aussi que cette surcote d'origine météorologique peut interagir de manière non linéaire avec l'onde de marée astronomique. C'est pourquoi en général, pour une condition météorologique donnée, la surcote générée, en particulier dans la zone littorale peu profonde, va dépendre des différents stades de la marée. Cet écart par rapport à une addition entre la hauteur d'eau liée à la surcote marine et la hauteur de marée est connu sous le nom d'interaction marée-surcote. Dans une région macrotidale comme le golfe du Bengale, l'interaction marée-surcote s'élève généralement à plusieurs dizaines de centimètres (Antony et Unnikrishnan, 2013). En raison de cette interaction, la surcote maximale le long du littoral du delta du Bengale est obtenue pour un cyclone qui touche terre environ 2 à 4 heures avant la marée haute (Krien *et al.*, 2017). Il existe un autre phénomène à prendre en compte pour une simulation réaliste de la surcote, c'est le *wave set-up* que l'on peut définir comme la composante de la surcote liée aux vagues. Cette composante tire son origine physique du déferlement des vagues

2. On appelle macrotidal un régime de marée pour lequel les marnages sont importants, en général supérieur à 4 mètres en période de vive-eau.

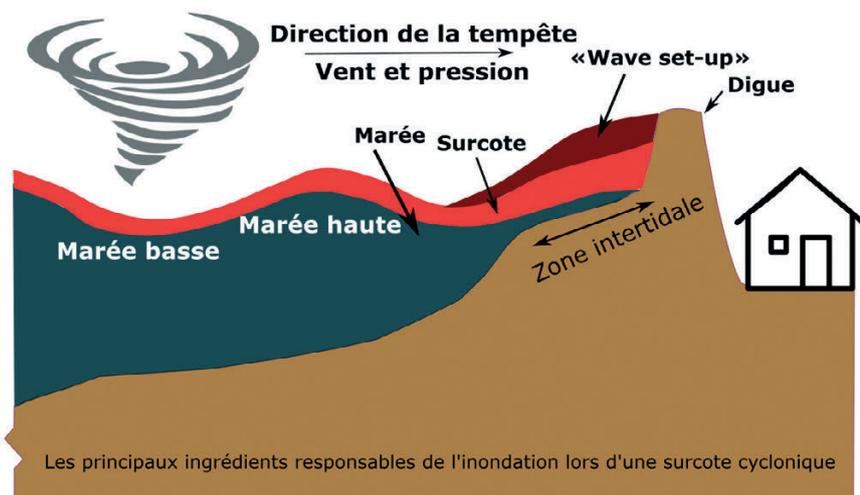


Figure 2. Schéma des principaux éléments et processus physiques entrant en compte dans la modélisation des surcotes marines.

qui induit une pente du plan d'eau à l'approche de la côte et entraîne une surélévation du niveau marin sur les rives (figure 2). Dans la région du golfe du Bengale, elle peut expliquer jusqu'à 10 % de la surcote totale. Par exemple, pendant le cyclone *Sidr* en novembre 2007, la hauteur modélisée du *wave set-up* dépasse les 50 cm à certains endroits sur la côte (Krien *et al.*, 2017).

Enfin, les variations du niveau moyen de la mer dans le golfe du Bengale à l'échelle saisonnière sont aussi conséquentes et peuvent atteindre jusqu'à 40 cm entre la mousson d'hiver et la mousson d'été, en raison des afflux d'eau douce pendant la mousson en provenance du système fluvial deltaïque et de la variabilité du contenu de chaleur de l'océan au large (Durand *et al.*, 2019). Pendant la saison hivernale sujette aux cyclones, cette variabilité peut induire une surélévation de 10-15 cm du

niveau moyen du golfe, qu'il faut bien sûr prendre en compte dans la modélisation. On voit donc que les processus à prendre en compte pour une représentation réaliste de la surcote marine sont nombreux : effets météorologiques de la pression et du vent, interaction surcote-marée, *wave set-up*, cycle saisonnier du niveau moyen, débit des fleuves.

Pour mener à bien une modélisation numérique réaliste, il est important de définir une empreinte spatiale du domaine de modélisation suffisamment grande et qui permette de couvrir l'ensemble de la trajectoire du cyclone et l'ensemble du réseau hydraulique estuarien du système Gange-Brahmapoutre-Meghna (GBM), avec une résolution spatiale suffisamment élevée pour capturer le caractère très ramifié de ce delta (figure 1). Il est aussi primordial que la topographie prenne en compte les digues. En effet, la côte du Bangladesh est

endiguée par un réseau dense de 139 vastes polders qui peuvent être inondés lors d'un cyclone de trois façons : par débordement, par rupture des digues et par remplissage en raison des fortes pluies associées au cyclone. La prise en compte dans le modèle des digues et de leur hauteur joue un rôle prépondérant dans le déclenchement de l'inondation par une surcote marine. Ces contraintes fortes sur les conditions aux limites bathymétrique et topographique expliquent en partie pourquoi les premières modélisations régionales des surcotes, suffisamment précises pour envisager une utilisation opérationnelle réaliste, sont très récentes (Krien *et al.*, 2016 ; Khan, 2021).

Tous ces éléments peuvent désormais être pris en compte dans la modélisation des surcotes dans le golfe du Bengale et nous allons voir comment cela a pu être mis en œuvre pour suivre en temps réel le cyclone *Amphan* et estimer les caractéristiques principales de la surcote marine qui a frappé le littoral du Bengale en mai 2020.

Le cyclone Amphan

L'histoire d'*Amphan* commence le 13 mai 2020, lorsqu'une zone de basse pression persiste dans l'océan Indien à environ 300 km à l'est du Sri Lanka. Deux jours plus tard, le Joint Typhoon Warning Centre (JTWC) classe ce système dépressionnaire en dépression tropicale et l'Indian Meteorological Department (IMD) en fait de même le jour suivant (voir tableau 1). La dépression tropicale continue à se déplacer vers le nord en gagnant en intensité et elle est nommée *Amphan* le 16 mai à 18 h³ lors de son classement en tempête cyclonique. Au cours des 12 heures suivantes, l'intensification du système est limitée, mais à partir de 12 h le 17 mai, *Amphan* subit une intensification très rapide. En quelques heures, la vitesse maximale du vent passe de 140 à 215 km/h, la classant en tempête cyclonique extrêmement sévère, équivalente à la catégorie 4 sur l'échelle de Saffir-Simpson. Au cours des 12 heures suivantes, *Amphan* continue de s'intensifier et les vents atteignent 260 km/h et une pression centrale de 907 hPa, ce qui en fait l'événement le plus intense jamais enregistré dans le golfe du Bengale. Le 18 mai, l'Inde et le Bangladesh se préparent à l'arrivée du cyclone et mettent en œuvre leur plan d'évacuation précoce. Des centaines

Tableau 1. Classement des cyclones selon l'échelle de Saffir-Simpson.

Classification de Saffir-Simpson	Classification	Vent (km/h) de l'IMD	Date pour Amphan
Dépression tropicale	Depression (D) 31 < IMD < 50	0 < SS < 62	15 mai 2020
Tempête tropicale	Deep Depression 51 < IMD < 62	63 < SS < 118	16 mai 2020 devient Amphan
Catégorie 1	Cyclonic Storm	119 < SS < 153 63 < IMD < 88	
Catégorie 2	Severe Cyclone Storm (SCS)	154 < SS < 177 89 < IMD < 117	17 mai 2020 Vent à 140 km/h
Catégorie 3	Very Severe Cyclonic Storm	178 < SS < 208 118 < IMD < 165	
Catégorie 4	Extremely Severe Cyclonic Storm	209 < SS < 251 166 < IMD < 220	17 mai 2020 Vent à 240 km/h
Catégorie 5	Super Cyclonic Storm	SS > 251 IMD > 221	

3. Toutes les heures sont données en UTC.

de milliers de personnes sont évacuées et se réfugient dans les abris anticycloniques, soulevant la question de la distanciation sociale en pleine épidémie de Covid. Heureusement, au cours des

24 heures suivantes, *Amphan* perd de sa force et le système continue de se combler en raison d'un cisaillement de vent d'est et d'un air sec. Le cœur du cyclone touche terre le 20 mai entre 8 et 10 h

en Inde, à l'est de la rivière Hooghly, à l'heure approximative de la mi-marée. À la côte, la pression dans l'œil du cyclone est alors de 965 hPa et la vitesse maximale du vent de 150-160 km/h. Au cours de son voyage vers l'intérieur des terres, le système continue de perdre de l'énergie et disparaît le 21 mai (figure 3).

Les modèles météorologiques globaux et régionaux ont commencé à prévoir une tempête importante dans le golfe du Bengale dès le 12 mai, soit 8 jours avant que le cyclone ne touche terre et 4 jours avant la formation effective de la dépression tropicale. La formation du système de basse pression a déclenché le système opérationnel HWRF le 14 mai et celui de l'IMD le 15 mai (figure 3).

Les prévisions montrées dans la figure 4 illustrent la convergence de la localisation où le cyclone a touché terre. Dès le 17 mai, soit trois jours avant l'« atterrissage », les trajectoires prévues ont convergé vers la trajectoire observée. Un jour plus tard, le 18 mai, l'erreur de prévision sur la trajectoire du cyclone était réduite à environ 50 km, alors que les paramètres de vitesse du vent et de pression centrale montrent encore beaucoup d'incertitudes. Les prévisions initiales ont rendu compte de l'ampleur de l'intensification. Cependant, elles n'ont pas réussi à prévoir l'intensification rapide qui s'est produite les 17 et 18 mai. Par ailleurs, les prévisions ultérieures initiées au cours des 17 et 18 mai

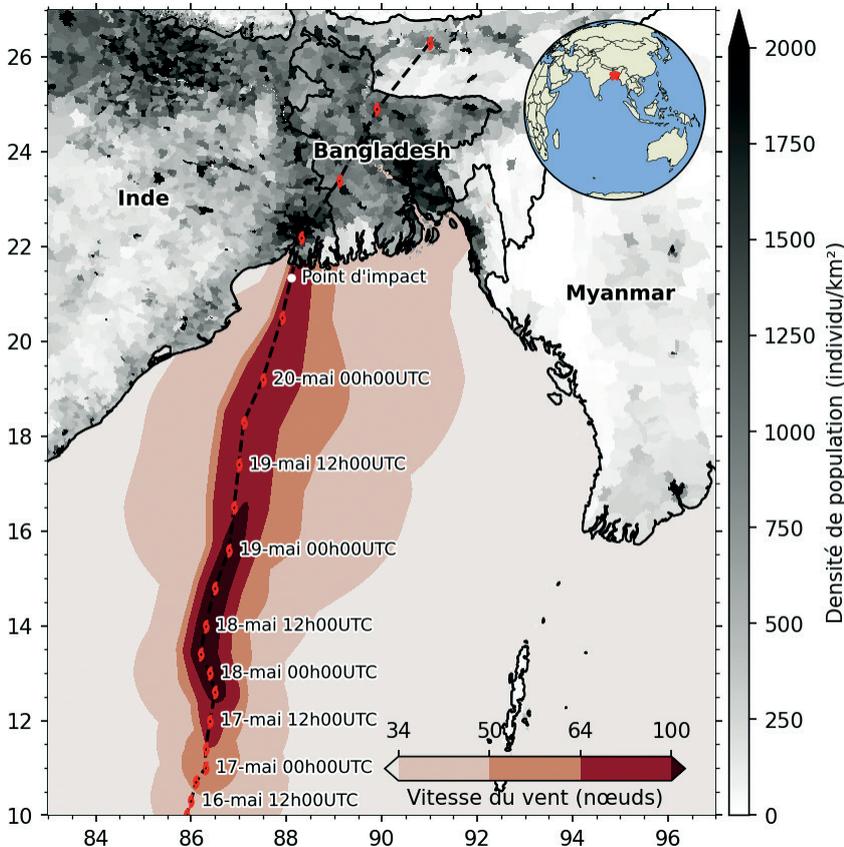


Figure 3. Évolution du cyclone *Amphan* à partir de la meilleure trajectoire du JTWC. Les nuances de gris indiquent la densité de population. L'empreinte des vents supérieurs à 34 nœuds (tempête tropicale), 64 nœuds (catégorie 1), 100 nœuds (catégorie 3) est indiquée en tons de rouge.

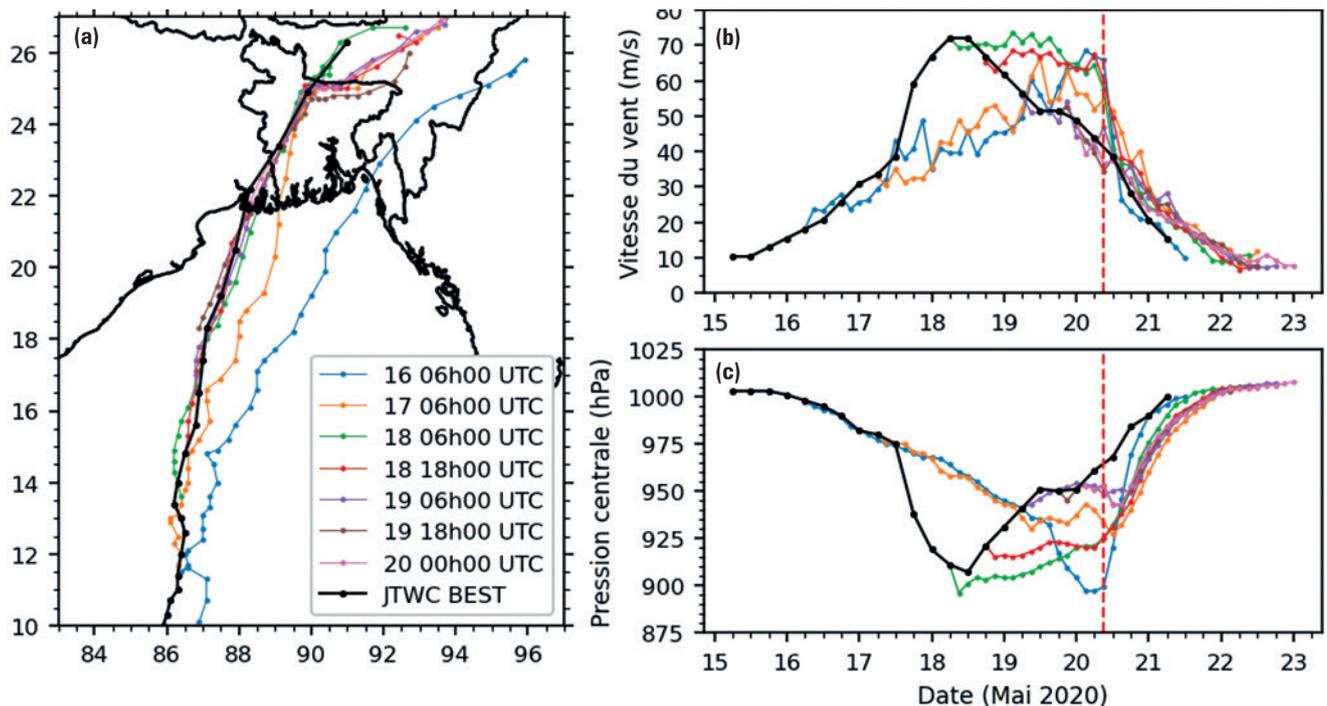


Figure 4. (a) Évolution des différentes trajectoires du cyclone *Amphan* par les systèmes de prévisions HWRF émises aux dates mentionnées en couleur. Les deux courbes de droites correspondent à l'évolution quotidienne (b) de la vitesse des vents (en m/s) et (c) de la pression (en hPa) au cœur du cyclone pour les différentes prévisions. Les courbes en noir correspondent aux évolutions observées.

n'ont pas réussi à saisir l'affaiblissement rapide du système qui s'est produit du 19 au 20 mai, avant l'atterrissage. Dans l'ensemble, en termes de vitesse du vent, l'évolution des prévisions n'a été précise (à 1 m/s près) qu'à 24 heures d'échéance. Cependant, les trajectoires convergent en général entre 2 et 3 jours avant l'arrivée du cyclone, ce qui permet de définir assez tôt la région qui sera concernée par la submersion. Ceci implique que les modèles de prévision des surcotes marines peuvent fournir des prévisions suffisamment rapidement pour que les résultats soient disséminés aux autorités dans un temps raisonnable, *a minima* entre 12 et 36 heures avant que le cyclone ne touche terre.

Mise en place du système de prévision temps réel

Nous décrivons dans ce qui suit la mise en place d'un système de prévision temps réel du cyclone *Amphan* pour produire des cartes d'inondation qui ont pu être transmises aux autorités avant l'arrivée du cyclone à terre. La première étape consiste à disposer d'un modèle numérique d'océan performant et réaliste. Depuis plusieurs années déjà, dans le cadre du projet Band-AID⁴, un travail de modélisation avait été initié pour comprendre l'hydrodynamique de la zone côtière du golfe du Bengale (Krien *et al.*, 2016). Préalablement, un énorme travail d'amélioration de la bathymétrie avait été fait. En effet, plusieurs dizaines de milliers de points de sonde (estimation de la profondeur moyenne de la colonne d'eau) issus de cartes marines de la zone côtière ainsi que la production d'une nouvelle bathymétrie intertidale obtenue par imagerie spatiale et couvrant plus de 1 000 km² (Khan *et al.*, 2019) ont permis d'améliorer sensiblement la capacité du modèle à reproduire de façon réaliste la propagation de la marée océanique. Un effort particulier a été porté dans l'amélioration de la bathymétrie des fleuves, rivières et chenaux en incluant des profils de sections transversales obtenus auprès du Bangladesh Water Development Board (BWDB) pour le Bangladesh et de son équivalent côté indien, le National Hydrographic Office. Comme expliqué plus haut, la bathymétrie est un des premiers facteurs de contrôle de la propagation des ondes océaniques, donc sans bathymétrie précise, pas de modèle numérique réaliste possible. Ce travail d'amélioration de la bathymétrie, qui s'est déroulé sur

plusieurs années, est un des principaux facteurs explicatifs du réalisme de nos simulations par rapport aux précédentes études dans cette région. Une grande partie de ce travail de consolidation de la bathymétrie a été rendue possible grâce au projet international Band-AID lancé en 2012 dans le cadre d'un appel du Belmont Forum. Une autre des particularités du modèle mis en œuvre est l'utilisation de la méthode des éléments finis, qui permet une discrétisation spatiale du domaine en un nombre conséquent de triangles élémentaires jointifs. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet d'avoir une résolution spatiale variable sur le domaine. Dans ce type de modèle, on cherche à avoir le maximum de résolution à la côte, où les enjeux sont les plus importants d'une part, mais aussi parce que la dynamique océanique, et notamment celle de la marée, possède des échelles de variations plus courtes qu'en plein océan. La résolution de 250 m sur la bande côtière permet en outre de représenter les zones poldérisées de façon assez réaliste et en prenant en compte la hauteur des digues. Une fois la bathymétrie affinée et le domaine discrétisé, il reste à « brancher » le modèle aux différentes conditions aux frontières. À sa frontière sud, le modèle est forcé avec les amplitudes et phases des principales ondes de marée (une vingtaine) issues d'un atlas de marée global, ce qui permet de propager la marée océanique à l'intérieur du domaine. Le potentiel astronomique de marée qui exerce une force sur l'ensemble des masses d'eau du domaine est aussi pris en compte dans la modélisation. Un autre apport de ce modèle est la possibilité de simuler l'effet des vagues sur la dynamique océanique et notamment pendant les épisodes cycloniques. La plateforme de modélisation choisie Schism⁵ permet un couplage avec un modèle spectral de vagues. Ce couplage permet de prendre en compte le rôle de l'état de la mer sur les transferts d'énergie entre le vent et la surface de l'océan, les interactions non linéaires entre vagues et circulation océanique, le transfert d'énergie associé au déferlement des vagues ou encore de mieux estimer la friction sur le fond. Nous avons donc une représentation du *wave set-up* dans ce modèle. Un élément clé pour la modélisation d'un cyclone est bien sûr la prise en compte du forçage atmosphérique (de manière conventionnelle : vent à 10 m et pression atmosphérique au niveau de la mer). Dans le cas d'un modèle opérationnel, la stratégie adoptée pour le forçage est aussi importante. Elle consiste à définir combien de fois par jour on lance une nouvelle simulation et comment on prend en compte

au mieux la géométrie du cyclone qui n'est pas représentée finement dans les champs météorologiques prévisionnels fournis toutes les 6 heures par le modèle global GFS⁶ de la NOAA⁷ distribué au mieux avec une résolution horizontale de 25 km. Cette résolution n'est pas suffisante pour résoudre correctement la structure d'un cyclone, c'est pourquoi à la formation d'un nouveau système dépressionnaire un modèle régional HWRf à plus haute résolution est lancé par la NOAA. Ce modèle opérationnel HWRf a été configuré avec une capacité de triple imbrication qui comprend une grille interne de résolution horizontale maximum de 3 km et il est distribué sous la forme d'une trajectoire prévue qui comprend des informations sur la pression atmosphérique au centre de la dépression et sur la structure radiale du champ de vent. C'est cette dernière information qui est utilisée pour reconstruire les champs de pression et de vent du cyclone en se basant sur un ou plusieurs modèles analytiques (Krien *et al.*, 2018). Un cyclone analytique est un modèle mathématique pour lequel on calcule un profil de vent et de pression à l'aide d'une équation qui tient compte de l'asymétrie de la structure du cyclone et le long de la trajectoire. Ce cyclone analytique est mis à jour toutes les 6 heures dès qu'une nouvelle trajectoire est produite. Ainsi, en forçant le modèle à partir des données de prévision des centres opérationnels (figure 4), une première prévision a pu être effectuée le 16 mai à 6 h. À chaque mise à jour des prévisions météorologiques et de la trajectoire du cyclone, une nouvelle simulation a été lancée pour produire une mise à jour en temps quasi réel de la carte d'inondation. Pour être efficace, le modèle de surcote doit pouvoir tourner en moins de 6 heures avant la nouvelle mise à jour des champs météorologiques. Ces cartes d'inondation ont pu être transmises aux autorités gouvernementales. Les maximums de niveau d'eau observés le long de la côte lors du passage du cyclone ont varié entre 2 et 5 mètres, ce qui est considérable et fait écho aux importants dégâts constatés après le passage du cyclone dans les zones frappées par la submersion. Les simulations produites ont permis *a posteriori* d'étudier les mécanismes de l'inondation et de démontrer le rôle important du couplage marée-surcote-vagues pour le réalisme de l'inondation.

4. <https://belmont-bandaid.org/>

5. <http://ccrm.vims.edu/schismweb/>

6. Global Forecasting System : <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast>

7. National Oceanic and Atmospheric Administration : <https://www.noaa.gov/>

Conclusion

Suite au travail réalisé dans le cadre d'une thèse de doctorat (Khan *et al.*, 2020 ; Khan, 2021), un projet pilote est en cours d'implémentation sur le delta du Bengale. Ce projet a été soumis auprès du Space Climate Observatory⁸ dont le rôle est de rassembler la communauté scientifique, les pouvoirs publics et le monde économique autour de solutions d'atténuation et d'adaptation aux impacts du changement climatique. Le projet Band-SOS (Bangladesh Delta Flooding: An Integrated

Framework for Social Adaptation to Cyclone Surges) vise à établir un service pré-opérationnel de prévision des inondations cycloniques et du risque sociétal associé. Ce service aura deux composantes : une prévision du risque d'inondation en temps réel lorsqu'un cyclone tropical touche la côte et un couplage de cette prévision avec une cartographie de la vulnérabilité des populations exposées. En novembre 2022, la première composante du système, qui consiste en une plateforme de modélisation pré-opérationnelle développée, a pu être installée dans la capitale

du Bangladesh au Flood Forecasting and Warning Centre. Cette première version permet la visualisation des cartes de hauteurs d'eau modélisées sur l'ensemble du golfe du Bengale et des séries temporelles en certains sites stratégiques⁹. Le système est lancé 4 fois par jour à chaque nouvelle mise à jour des systèmes de prévisions météorologiques.

8. <https://www.spaceclimateobservatory.org/bandsos-launches-prototype-its-coastal-flood-prediction-platform>

9. <https://bandsos.github.io/>

Bibliographie

- Alam E., Dominey-Howes D., 2015. A new catalogue of tropical cyclones of the Northern Bay of Bengal and the distribution and effects of selected landfalling events in Bangladesh. *Int. J. Climatol.*, 35, 801-835. <https://doi.org/10.1002/joc.4035>
- Antony C., Unnikrishnan A.S., 2013. Observed characteristics of tide-surge interaction along the east coast of India and the head of Bay of Bengal. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 131, 6-11. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.08.004>
- Bouwer L.M., Jonkman S.N., 2018. Global mortality from storm surges is decreasing. *Environ. Res. Lett.*, 13, 014008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa98a3>
- Durand F., Piecuch C.G., Becker M., Papa F., Raju S.V., Khan J.U., Ponte R.M., 2019. Impact of continental freshwater runoff on coastal sea level. *Surveys in Geophysics*, 40, 1437-1466. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09536-w>
- Khan Md J.U., 2021. Dynamics of inundation events in the rivers-estuaries-ocean continuum in Bengal Delta : Synergy between hydrodynamic modelling and spaceborne remote sensing. Thèse de doctorat, Université Paul-Sabatier, Toulouse III. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03514722>
- Khan Md J.U., Ansary MD N., Durand F., Testut L., Ishaque M., Calmant S., Krien Y., Islam A.K.M.S., Papa F., 2019. High-resolution intertidal topography from Sentinel-2 multi-spectral imagery: synergy between remote sensing and numerical modeling. *Remote Sensing*, 11 (24), 2888. <https://doi.org/10.3390/rs11242888>
- Khan Md J.U., Durand F., Bertin X., Testut L., Krien Y., Islam A.K.M.S., Pezerat M., Hossain S., 2020. Towards an efficient storm surge and inundation forecasting system over the Bengal delta: Chasing the super-cyclone Amphan. <https://doi.org/10.5194/nhess-2020-340>
- Krien Y., Mayet C., Testut L., Durand F., Tazkia A.R., Islam A.K.M.S., Gopalakrishna V.V. *et al.*, 2016. Improved bathymetric dataset and tidal model for the Northern Bay of Bengal. *Marine Geodesy*, 39, 422-438.
- Krien Y., Testut L., Islam A.K.M.S., Bertin X., Durand F., Mayet C., Tazkia A.R. *et al.*, 2017. Towards improved storm surge models in the Northern Bay of Bengal. *Continental Shelf Research*, 135, 58-73.
- Krien Y., Arnaud G., Cécé R., Ruf C., Belmadani A., Khan J., Bernard D. *et al.*, 2018. Can we improve parametric cyclonic wind fields using recent satellite remote sensing data? *Remote Sensing*, 10. <https://doi.org/10.3390/rs10121963>