

Aide à la surveillance des digues maritimes : les systèmes de vigilance submersion

Relations to help coastal dyke resistance forecast

Antoinette TARDIEU¹, Olivier BARBET¹, Julien BERTHELOT¹, Benjamin SEUROT¹,

¹ ISL, tardieu@isl.fr, barbet@isl.fr, berthelot@isl.fr, seurot@isl.fr,

Résumé

La réglementation sur les digues demande aux gestionnaires de disposer de consignes d'exploitation intégrant des seuils d'alerte. La déclaration en système d'endiguement nécessite également de définir un niveau de protection pouvant être mesuré en un point précis avec un degré de précision associé, afin d'être en mesure de déclencher une alerte à la population. Cette réglementation s'applique pour toutes les digues et notamment celles en contexte maritime.

Dans les faits, les gestionnaires de digues maritimes disposent des alertes Météo-France (vigilance submersion jaune, orange ou rouge) pour organiser la surveillance des ouvrages.

Le niveau de protection est quant à lui généralement fixé par rapport à un évènement réel ou une cote de crête.

L'article présente plusieurs recherches menées pour affiner les niveaux de vigilance sur des sites spécifiques.

Pour les digues soumises au simple effet du niveau d'eau et à l'aléa surverse, la surcote attendue peut être déduite de relations des paramètres principaux : coefficient de marée / vent (direction et intensité) / houle au large.

Pour les digues impactées par les aléas de franchissement par la houle, les données disponibles peuvent également permettre de prédire la houle en pied d'ouvrage et d'estimer le débit franchissant.

Les données de prévision des sites <http://marée.info> et <http://data.shom> peuvent également fournir des prévisions.

La précision de ces estimations peut être notablement améliorée par la consignation sur le terrain de certaines informations et observations pendant les événements.

Ces systèmes de vigilance pourraient utilement fournir aux gestionnaires des outils simples et fonctionnels de prévision, permettant d'anticiper les situations à risque.

Mots Clés

Digues maritimes, franchissement, surverse, surcote, prévision

Abstract

French regulation requires to define operating instructions to assess risk management for dykes.

In the managing of seadykes, managers use Météo-France alerts (yellow, orange or red submersion vigilance) to organize the planning emergency. But these forecast are not completely adapted to this function.

The aim of the article is to give some over suggestion to assess risk management for sea dykes using simplified relations between settings (wind, sea level, wind set up, wave set up). A good understanding of each of this settings and how they interfere in a specific location is necessary.

National forecast from <http://marée.info> or <http://data.shom> can also be used.

These methods have to be extended and tested with real events to help the assessment of emergency risk in sea flooding.

Key Words

Sea dykes, overtopping, overflowing, set up, forecast

Introduction

La réglementation sur les digues demande aux gestionnaires de disposer de consignes d'exploitation intégrant des seuils d'alerte. La déclaration en système d'endiguement nécessite également de définir un niveau de protection pouvant être mesuré en un point précis avec un degré de précision associé, afin d'être en mesure de déclencher une alerte à la population. Les gestionnaires de digues fluviales disposent du réseau Vigicrue qui permet, avec son maillage, de disposer d'une bonne connaissance et appréciation du risque.

Les gestionnaires de digues maritimes s'en remettent aux prévisions Météofrance (vigilance vague submersion) qui sont des données à une échelle départementale basée sur une appréciation du service pour un message à vocation d'alerte

du grand public. Ces vigilances ne prennent pas en compte les spécificités du site.

D'autre part, face à la complexité des phénomènes conduisant à des inondations d'origine maritime, le gestionnaire peut rencontrer des difficultés pour définir un niveau de sécurité.

L'article présente des méthodes qui ont pour objectif d'appliquer à des sites spécifiques des méthodes de simplification permettant au gestionnaire d'apprécier la gravité d'un événement et, de fait, d'approcher les notions de niveau de vigilance et de niveau de protection.

Méthodologie générale

La figure 1 présente le logigramme général conduisant à apprécier les modes d'inondation relatifs aux ouvrages en conditions maritimes.

Les modes d'inondation sont le résultat final que le système de vigilance cherche à caractériser. Les deux modes d'inondations directs : par surverse et par franchissement, sont étudiés. Le mode d'inondation par rupture, plus complexe, fait intervenir la notion de résistance de l'ouvrage aux aléas et n'est donc pas intégré.

La caractérisation des deux modes de défaillance (surverse et franchissement) relève de conditions de mer qu'il est nécessaire de connaître au pied de l'ouvrage. Elles sont :

- Surverse : le niveau statique de la mer (N_s en mètre NGF) est directement comparé à l'altimétrie de la crête de digue. Ce mode s'applique à des secteurs abrités où la hauteur des vagues est considérée négligeable.
- Franchissement : Le niveau statique de mer est inférieur à l'altimétrie de la crête de digue. C'est l'impact de la houle sur l'ouvrage qui conduit à une inondation par franchissement. Les paramètres de houle sont la hauteur caractéristique (H_s en m) et la période (T en secondes).

La géométrie de l'estran, de l'ouvrage de protection et de la zone protégée influent ces modes de franchissement.

Les conditions de mer définies en pied d'ouvrage sont rarement mesurables et prévues. Elles sont fonction de plusieurs paramètres d'entrée, mesurés et prévus à l'échelle régionale, mais qui subissent plusieurs interactions dans la zone intermédiaire qualifiée de locale.

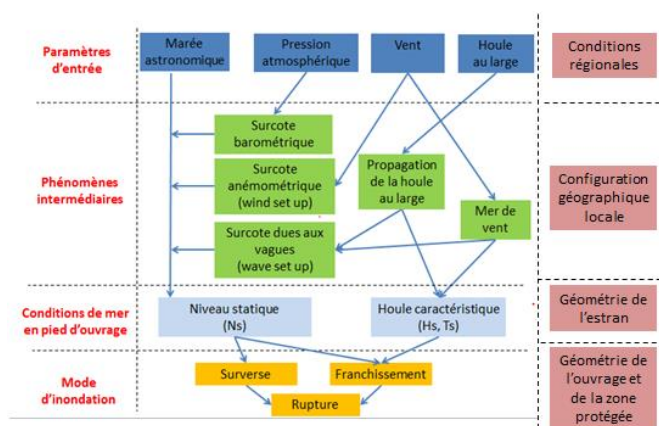


FIGURE 1: LOGIGRAMME GENERAL

L'établissement des systèmes passe par une phase de modélisation où de très nombreuses combinaisons des paramètres d'entrée sont testées.

L'analyse des résultats ainsi obtenus a pour but de construire des abaques simplifiées ne faisant intervenir que 2 à 3 paramètres.

Etude de cas 1 : système de vigilance sur les côtes bas-normandes

Objectif et localisation

L'objectif de cette étude est de construire des systèmes de vigilance sur 5 sites de la côte bas-normande puis de les généraliser à l'ensemble du littoral régional.

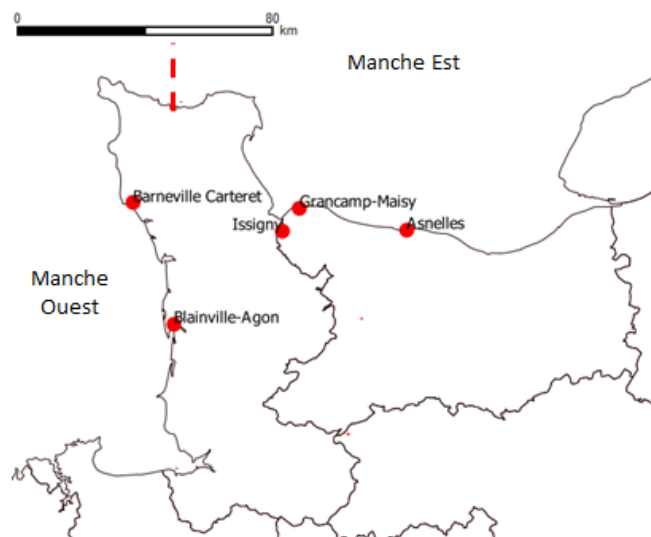


FIGURE 2: SECTEUR REGIONAL D'ETUDE

Les 5 sites qui ont été retenus sont localisés sur la figure 2. Deux sites, Barneville-Carteret et Blainville-Agon, sont situés sur la côte Ouest du Cotentin et sont soumis aux grandes houles d'Ouest de l'Atlantique (plus ou moins amorties). Deux autres sites, Grandcamp-Maisy et Asnelles, sont situés

en baie de Seine et sont plutôt soumis aux houles de Nord-Est levées par les vents locaux. Le cinquième site, Isigny-sur-Mer, est représentatif de la zone abritée de la baie des Veys.

Méthodologie spécifique

La chaîne de calcul comporte deux échelles de modélisation : une échelle régionale avec deux modèles construits, le premier pour la Manche Ouest et le second pour la Manche Est, ainsi qu'une échelle locale avec cinq modèles construits pour les cinq sites pilotes.

A l'échelle régionale, la modélisation hydrodynamique est menée sur TELEMAC-2D avec en entrée le niveau statique général et le vent pour différentes directions et intensités. L'action du vent est appliquée sur 3 heures. Le coefficient de friction due au vent est modulé en fonction de la vitesse du vent. Pour chaque cas étudié, cette modélisation fournit la surcote due au vent (wind set-up) le long du littoral considéré. En parallèle, les modèles de propagation de houle (TOMAWAC ou SWAN) sont utilisés successivement aux échelles régionales puis locales, les modèles régionaux fournissant les spectres aux limites des modèles locaux. Ces derniers fournissent l'estimation de la surcote locale due aux vagues (wave set-up) et les caractéristiques des houles en pied d'ouvrage (H_s , T , dir).

Au final, les différentes surcotes permettent d'estimer le niveau marin en pied d'ouvrage. Dans les zones protégées, ce niveau marin est confronté aux crêtes des digues pour déterminer s'il y a submersion. En front de mer, ce niveau marin est combiné aux caractéristiques de la houle et à la géométrie des protections pour estimer les débits de franchissement (SWASH et formules du TAW).

Résultats

La figure 3 présente une synthèse des paramètres déterminants par ordre d'importance et par secteurs.

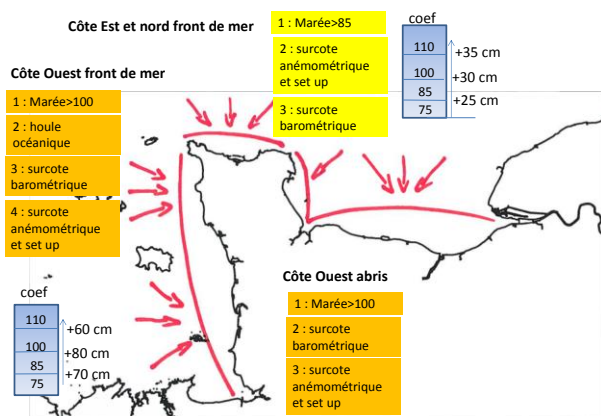


FIGURE 3: PARAMETRES DETERMINANTS PAR ORDRE D'IMPORTANCE

Sur la côte Ouest l'amplitude des marées est deux fois plus importante qu'à l'Est. Aussi l'influence relative des autres paramètres est réduite.

Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité a porté sur le niveau de sable en pied d'ouvrage, la pente du talus et la précision topographique. Le niveau de sable est le paramètre le plus sensible. L'hypothèse de niveau bas de sable qui a été retenue dans l'estimation du risque peut augmenter par 2 les débits de franchissement. D'autres facteurs d'incertitude existent et, parmi eux, l'état de la mer avec l'effet des vagues (BREILH, 2014) ou encore des mers croisées sur la surcote anémométrique (COSTA, 1997 ; CASPAR *et al.*, 2007 ; LETORTU *et al.*, 2012), ou bien l'influence de l'onde de marée en particulier en Manche Est.

Formulations simplifiées

Le niveau statique général est facile à estimer et les informations à disposition le permettent (marée et pression fournis sur le site marée.info). Les modèles régionaux fournissent les données d'entrée des modèles locaux et permettent d'accéder à la surcote totale. On constate cependant que la surcote totale peut évoluer sensiblement entre les différents secteurs et pour les différentes directions de vent.

Sur la côte Est, l'état de mer dépend quasi exclusivement des conditions de vent. Il est alors possible d'estimer les surcotes anémométriques à partir de la direction et de l'intensité du vent. En ce qui concerne l'appréciation de la surcote anémométrique, la démarche est la suivante :

- Appréciation du gradient de surcote totale en fonction de la direction du vent et de sa force,
- Relation entre la surcote totale, la direction et la force du vent et la position du secteur à enjeux sur la côte.

Pour ce faire, nous partons des cartes de surcote anémométrique et des relations en fonction du vent obtenues dans les secteurs tests. Pour des vitesses de vent allant de 25 à 60 nœuds (forces 5 à 11 beaufort) et pour les différentes directions de vent, les cartes de surcote anémométrique sont dressées (cf. Figure 4).

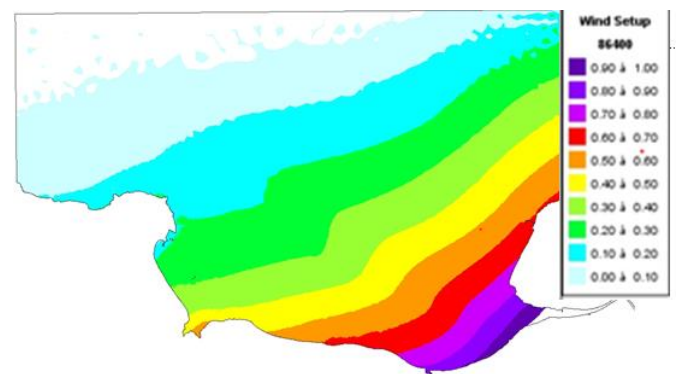


FIGURE 4: EXEMPLE DE CARTE DE LA SURCOTE ANEMOMETRIQUE – MANCHE EST, VENT DE NORD-OUEST

On peut distinguer 3 zones du point de vue du gradient de surcote liée au vent : de Cherbourg à Sainte-Marie-du-Mont (mémorial), de Grandcamp-Maisy à Honfleur et la baie des Veys. Pour chacune de ces zones, est déterminée une relation reliant la surcote totale avec l’intensité du vent et la position sur la côte.

Les relations générales sont issues des abaques établis au droit des secteurs tests et de l’évolution de la surcote sur les 3 zones identifiées. Pour le tronçon compris entre Cherbourg et Sainte-Marie-du-Mont, par exemple, l’abaque en figure 5 établi à Saint-Marcouf (hameau des Gougins) est utilisé.

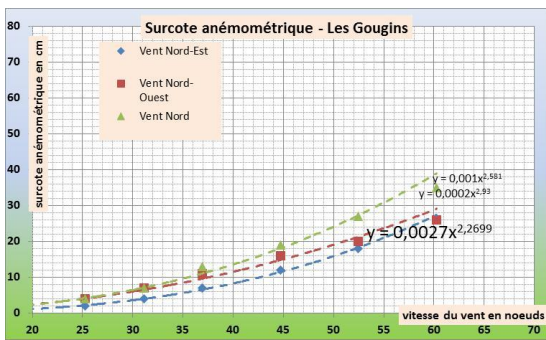


FIGURE 5: ABAQUE RELIANT LA SURCOTE ANEMOMETRIQUE A LA FORCE ET LA DIRECTION DU VENT – SECTEUR DES GOUGINS

La relation est alors la suivante :

Surcote liée au vent au pk X (X en km compté à partir de Cherbourg et en longeant la côte) : $(0,00135 + X \text{ (en km)} * 6,23077 * 10^{-5}) * \text{vitesse en nœud}^{2,2699}$.

En ce qui concerne la surcote due à la houle (wave set-up), les valeurs estimées au droit des secteurs tests sont appliquées à l’ensemble de la zone jugée homogène du point de vue de ce processus. Les abaques établis sur les secteurs tests permettent de proposer des relations liant le wave set-up à la force et à la direction du vent. Pour la zone comprise entre Saint-Vaast-la-Hougue et Sainte-Marie-du-Mont, par exemple, la relation est la suivante :

- Vent de Nord-Ouest : set-up (m) = 0,0017 * vent (nds) - 0,0506
- Vent de Nord : set-up (m) = 0,0027 * vent (nds) - 0,0522
- Vent de Nord-Est : set-up (m) = 0,0068 * vent (nds) - 0,0894.

Le niveau en pied d’ouvrage se déduit de ces estimations. Le débit de franchissement est alors estimé à partir des formulations proposées par le TAW.

Sur la côte Ouest, il est également possible d’estimer la surcote totale et donc le niveau en pied d’ouvrage. Les conditions de franchissement sont par contre beaucoup plus complexes à estimer car la houle dépend du vent, des houles océaniques et des effets de site. Seuls des modèles locaux

peuvent produire des estimations suffisamment fiables pour être utilisables.

Validation de la méthode

La méthode est validée par comparaison à des événements réels. Les résultats sur Granville (Manche Ouest) sont fournis au Tableau 1.

évènement	Pression (hPa)	Houle au large (m)	Direction vent	Vent (nœuds)	Surcote baro (m)	Surcote set-up vague (m)	Surcote totale condition NO (m)	Surcote totale condition O (m)	Surcote totale condition SO (m)	Surcote observée
06-févr-74	981	6	O/NO	40	0,32	0,13	0,64	0,76	0,66	0,60
09-févr-74	1003	6	O	35	0,10	0,13	0,36	0,46	0,49	0,45
12-janv-78	990	6	NO	30	0,23	0,13	0,45	0,52	0,48	0,40
28-févr-90	1002	8	O	55	0,11	0,21	0,80	0,97	0,66	1,05
24-déc-99	1005	5	SO	35	0,08	0,10	0,24	0,39	0,34	0,55
10-mars-08	979	8	SO	45	0,34	0,21	0,82	0,95	0,80	0,60
28-févr-10	972	4	O	35	0,41	0,06	0,66	0,78	0,47	0,80
31-mars-10	997	6	O	35	0,16	0,13	0,42	0,52	0,45	0,35

TABEAU 1: VALIDATION DE LA METHODE A GRANVILLE

L’approximation est correcte et peut être jugée en adéquation avec les précisions attendues pour un système de vigilance. Il est néanmoins nécessaire de procéder à une expérimentation du système sur une ou deux années afin de préciser les performances du système en comptabilisant notamment les fausses alertes qui pourraient être déclenchées ou, a contrario, les alertes qui n’auraient pas été identifiées.

Etude de cas 2 : système de vigilance marée-vent Les Moutiers-en-Retz

Objectif et localisation

L’objectif de cette approche est de préciser le niveau de protection d’ouvrages dans le cadre de la réalisation de travaux dans l’objectif du classement en système d’endiguement.

Les ouvrages se situent sur le littoral des Moutiers-en-Retz en Loire Atlantique. La configuration locale des ouvrages distingue deux modes d’inondation :

- Le franchissement sur les ouvrages du littoral,
- La surverse dans l’étier du port du Collet.

Construction de l’abaque de vigilance

Dans un premier temps, un abaque pour un site particulier où le franchissement était prépondérant a été construit (secteur du boulevard de l’Océan prévu d’être renforcé par un mur chasse-mer).

Les paramètres d’entrée de l’abaque sont réduits aux deux

suivants :

- le niveau théorique de la marée,
- la vitesse du vent moyen (en km/h).

Le paramètre de vigilance de l’abaque est fixé à un débit de franchissement de 5 l/s/ml correspondant à un niveau jugé acceptable pour la zone protégée en arrière. Des événements réels sont positionnés sur l’abaque.

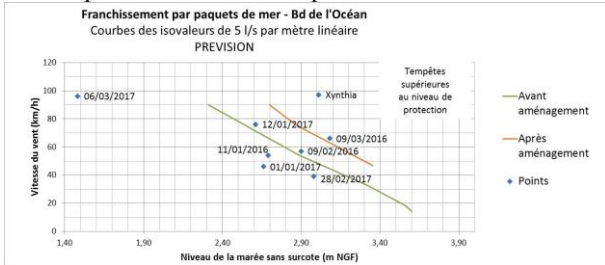


FIGURE 6: ABAQUE RELIANT LE DEBIT DE FRANCHISSEMENT AUX PARAMETRES DE VENT ET MAREE ASTRONOMIQUE

Le logigramme précédent est donc simplifié selon la figure 7.

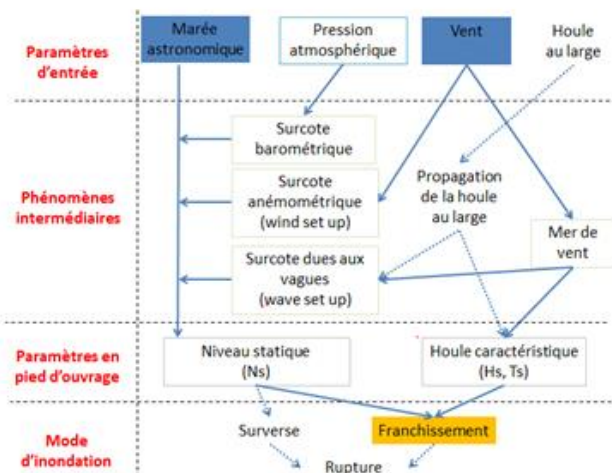


FIGURE 7: SIMPLIFICATION DU LOGIGRAMME – CAS 3 - ABAQUE MAREE-VENT

Le niveau marin est connu par la somme de la marée astronomique et des trois surcotes suivantes.

La surcote barométrique est fixée à 40 cm équivalent à une pression barométrique de 973 hPa. L’analyse de 21 tempêtes montre que le centre des dépressions voit des pressions minimales au passage de la France pouvant aller jusqu’à 945 hPa (Dirk en déc. 2013). Sur les 21 événements, 8 ont des pressions minimales inférieures à 975 hPa et les pressions enregistrées vers la zone d’étude restent supérieures à 970 hPa.

Les différentes simulations réalisées selon des conditions variables de niveau marin montrent que la houle au large n’a quasiment pas d’influence au site d’étude. C’est la mer de vent, levée par le vent qui engendre une houle amenant une surcote et les franchissements.

L’abaque est donc simplifié en n’intégrant pas la houle venant du large.

Le vent est intégré dans le calcul de franchissement par la surcote qu’il amène et la houle qu’il génère.

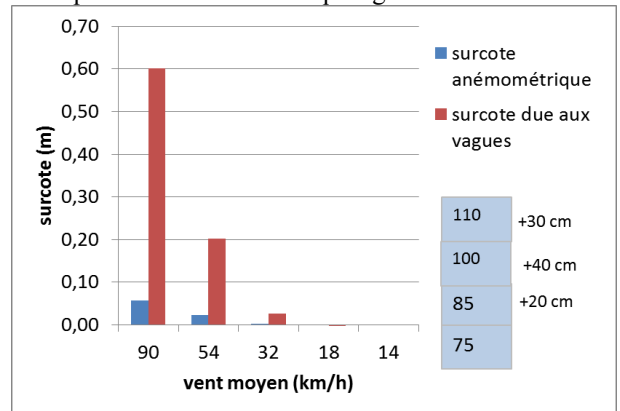


FIGURE 8: PREPONDERANCE DES PARAMETRES SUR LE NIVEAU MARIN

L’influence de la direction du vent (Ouest et Sud-Ouest) est testée mais ne conduit pas à des écarts importants et les courbes correspondantes ne sont donc pas fournies.

Résultats

Pornic Agglo Pays de Retz a effectué un suivi des tempêtes 2016, 2017 et renseigné l’abaque. La figure 9 présente l’abaque (identique à la figure 6) avec comme différence le niveau marin réel mesuré (à l’échelle du Port du Collet).

Les enseignements montrent :

- La tempête Zeus du 6 mars 2017, était largement en-dessous du niveau de vigilance, que ce soit en terme de prévision ou de niveau atteint malgré une forte surcote relevée (1,30 m) et des vents très violents.
- La tempête du 9 mars 2016, dépassait en prévision le niveau de vigilance de l’état aménagé. En réalité, l’évènement a été de moindre intensité. Cela s’explique par le fait que la pression barométrique s’est établie à 1000 hPa (soit une surcote de 13 cm, contre 40 cm dans l’abaque de prévision) et un vent d’intensité moindre que ce qui était prévu.

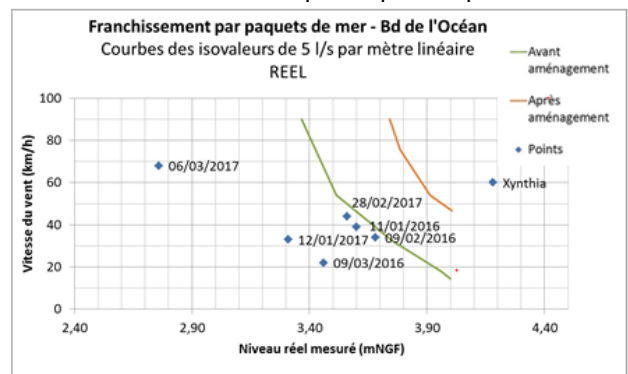


FIGURE 9: ABAQUE RELIANT LE DEBIT DE FRANCHISSEMENT AUX PARAMETRES DE VENT ET NIVEAU MARIN REEL

Etude de cas 3 : système de vigilance basé sur les données de prévision du SHOM - Les Moutiers-en-Retz

Objectif et localisation

Sur le même site d'étude (littoral des Moutiers-en-Retz), dans un second temps, la question s'est posée de remplacer les abaques précédentes par les données de prévision éditées par le SHOM.

Ces données sont maintenant disponibles via le site data.shom pour une prévision à 4 jours sur des points fictifs.

Dans le cas présent, le point fictif de Pornic, légèrement au large et les éléments de prévision à ce point constituent la donnée source.

Méthodologie

Un modèle hydrodynamique local est créé pour reproduire l'évolution des paramètres entre le point de prévision existant (point fictif) et les points de résultats recherchés sur la côte.

Deux logiciels sont utilisés en raison de leur meilleure adéquation à la prise en compte des phénomènes intermédiaires pour le mode d'inondation retenu (SWAN pour le franchissement, TELEMAC 2D pour la surverse).

	Niveau d'eau	Houle	Lieu et aléa
SWAN	wave set-up	Modélisation de la houle	Bourg des Moutiers - franchissement
TELEMAC	wind set-up + effet de site	Pas de modélisation de houle	Port du Collet - surverse

TABLEAU 2: PARAMETRES MODELISES EN FONCTION DU LOGICIEL

Plusieurs modélisations sont menées en faisant varier les conditions d'entrée au point de prévision et en les répercutant sur la côte. Celles-ci sont :

- Le niveau marin statique incluant déjà la surcote météorologique (barométrique + anémométrique).
- Le vent pour modéliser les phénomènes intermédiaires se produisant dans la zone locale,
- La houle pour tenir compte de l'état de mer existant au point de prévision.

Ces modélisations sont menées pour approcher les deux modes d'inondation : le franchissement sur 3 points de calculs et la surverse sur 1 point de calcul.

Résultats

La difficulté rencontrée est que les données sources intégrées (vent et houle) se sont déjà combinées au point de prévision et ne sont donc plus indépendantes. Cette méthode ne permet donc pas de retrouver des courbes conformes à l'étude de cas 2.

Pour le cas de surverse, l'analyse met en évidence que le seuil de surverse (4,20 mNGF) est atteint pour une hauteur d'eau de 4 m au point de prévision et une vitesse de vent de 40 nœuds (70 km/h).

Secteur vanne de Millac	Vitesse du vent (nœuds)						
	2	10	20	30	40	50	
Niveau marin (m NGF)	3,25	3,41	3,41	3,46	3,54	3,63	3,74
	3,5	3,81	3,82	3,84	3,88	3,93	4,01
	3,75	4,08	4,09	4,09	4,10	4,12	4,14
	4	4,17	4,18	4,18	4,18	4,20	4,23
	4,25	4,25	4,26	4,28	4,32	4,36	4,40
	4,5	4,41	4,42	4,42	4,44	4,57	4,69

TABLEAU 3: ABAQUE – SURVERSE : NIVEAU ATTEINT (MNGF) Ce tableau met également en évidence que l'écart de cote entre le point de prévision et le secteur d'étude est très variable (voire tend à diminuer). Cela s'explique par la forte

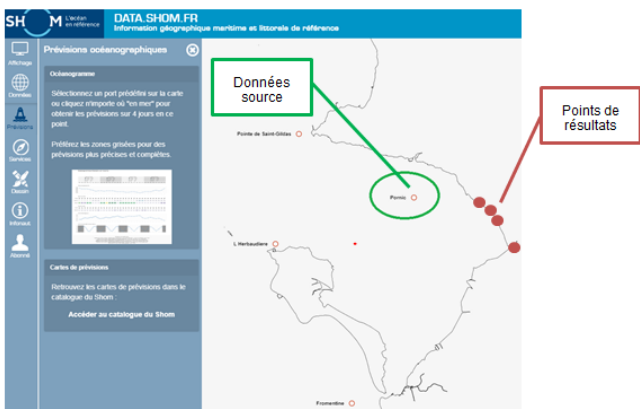


FIGURE 10: UTILISATION DES DONNEES DE PREVISION DU SHOM (SOURCE : DATA.SHOM)

Les données sont fournies à pas de temps horaire et comprennent : la pression atmosphérique moyenne, le vent (intensité en nœud et direction), les vagues (mer totale et mer du vent), surcote atmosphérique (barométrique + anémométrique) et niveau d'eau par rapport au niveau moyen.

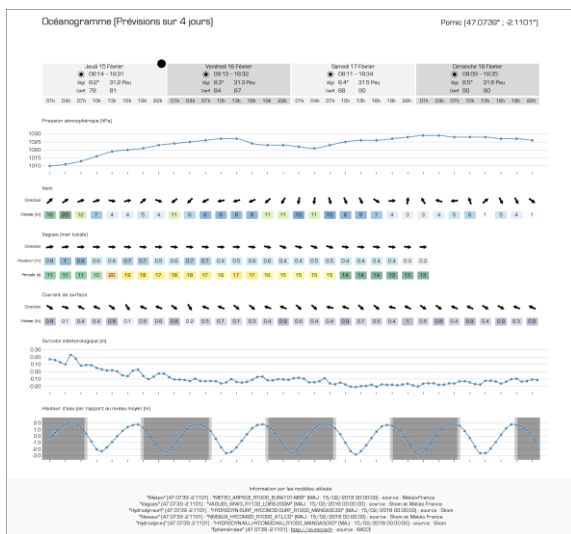


FIGURE 11: FEUILLE DE DONNEES DE PREVISION (SOURCE : DATA.SHOM)

influence des surverses se produisant sur d'autres ouvrages situés le long de l'étier.

Il est proposé de retenir un niveau de protection de 4,10 mNGF en tenant compte d'une imprécision de 10 cm en se basant sur la donnée enregistrée à l'écluse du port du Collet.

Le niveau de vigilance au point de prévision pourrait être considéré à 3,75 mNGF, ou 3,5 mNGF et un vent de 50 nœuds, en considérant une marge de 25 cm.

Conclusion

Les analyses sur les sites présentés mettent en évidence qu'il est possible de mettre en place des corrélations entre les données de prévision disponibles et les atteintes possibles aux ouvrages. L'objectif est de proposer aux gestionnaires de digue des méthodes plus précises que les vigilances météo submersion marine.

Sur la côte Est du Cotentin, il est proposé une estimation de la surcote en fonction de la direction et de l'intensité du vent et de la position du secteur sur la côte. Sur cette même côte, il est également proposé une estimation des houles significatives en pied d'ouvrage à partir de la connaissance des houles au droit des secteurs tests des Gougins, de Grandcamp-Maisy et d'Asnelles et de l'évolution générale des houles significatives le long de la côte. Cette connaissance permet de déduire les débits de franchissement en appliquant la relation proposée par le TAW, dès lors que la cote de crête et la nature des matériaux constituant l'ouvrage sont connues.

Sur la côte Ouest du Cotentin, il est également possible d'estimer la surcote totale et donc le niveau en pied d'ouvrage. Les conditions de franchissement sont par contre beaucoup plus complexes à estimer car la houle dépend du vent, des houles océaniques et des effets de site. Une multiplication des sites tests pour validation de la méthode est également nécessaire.

Sur le secteur des Moutiers-en-Retz dans la baie de Bourgneuf, un abaque simplifié de dépassement d'un seuil de franchissement peut être établi entre les paramètres simples que sont niveau marin théorique et vent (vent moyen).

L'étude complémentaire menée sur ce site à partir des données de prévision du site data.shom montre que les relations obtenues sont plus simples mais imprécises du fait de la dépendance qui existe à ce point entre la houle et le vent. Cette simplification peut toutefois permettre au gestionnaire de mieux appréhender le niveau d'aléa attendu par rapport à une vigilance simplement météorologique.

Ces outils nécessiteront utilement des phases de calage sur des événements réels afin d'être précisés et affinés. Nous soulignerons également la faible densité des réseaux de mesure existants (marégraphe, houlographe) permettant de faciliter ces calages.

Remerciements

Nous remercions la DREAL Normandie et Pornic Agglo Pays de Retz qui se sont intéressés à ces mises en pratique sur leurs côtes.

Références

- [1] De Bonviller, Peeters, Barbet. (2016). *Système de vigilance submersion – côtes bas-normandes*, Journées Nationales Génie Côtier Génie Civil n°14, pp. 641-650.