



Système de vigilance submersion des côtes bas-normandes

Arnaud DE BONVILLER¹, Pierre PEETERS²,
Olivier BARBET¹, Benjamin SEUROT¹

1. ISL Ingénierie, 49 100 Angers, France.

debonviller@isl.fr

2. HYDRATEC, 49 100 Angers, France.

pierre.peeters@hydra.setec.fr

Résumé :

L'analyse des évènements ayant généré des dommages sur la région bas-normande a montré que les situations à risques combinaient des coefficients de marée de 85 pour la côte Est, de 100 pour la côte Ouest, des vents d'intensité supérieure à 5 beaufort, de direction Nord et Nord-Est pour la côte Est, de directions allant du Nord-Ouest au Sud-Ouest pour la côte Ouest. Le niveau marin peut dépasser de plus de 50 centimètres le niveau de marée prédit.

Les analyses sur les sites tests montrent qu'il est possible d'estimer le risque de dommages à partir des informations prévues disponibles concernant la marée, le vent, la pression et les houles au large. Les sites internet <http://maree.info/> et <http://www.previmer.org/> permettent d'accéder à ces prévisions.

Sur la côte Est, de Saint-Vaast-la-Hougue à Honfleur, 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 de trois secteurs tests 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, 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.

Les systèmes de vigilance pourraient utilement aider les services gestionnaires d'ouvrage dans leur procédure de gestion de crise. Ils constitueront un outil dans le cadre des PCS établis par les gestionnaires d'ouvrage en permettant une plus juste anticipation de la crise et sa gestion dans des conditions prédéfinies.

Mots-clés :

Submersions marines, Manche, Franchissement, Vigilance.

1. Introduction

La région bas-normande présente une façade maritime très importante, s'étendant de la baie du Mont-Saint-Michel à l'estuaire de la Seine. Cette façade maritime combine des secteurs à la topographie basse et la présence d'enjeux matériels et humains forts, ce qui la rend localement très vulnérable aux phénomènes de submersion marine. Les moyens actuels permettent de prévoir l'intensité des événements à l'échelle régionale avec une précision satisfaisante. La difficulté aujourd'hui, et cette difficulté a bien été mise en exergue lors de la tempête Xynthia, est de traduire l'intensité de l'évènement à la côte et de mettre en regard cette intensité prévue (niveau marin et surcote locale, houle à la côte) et les caractéristiques physiques de la protection (niveau de crête des ouvrages, niveau de sûreté,...).

A partir de l'analyse des processus de submersion marine sur 5 sites bas-normands représentatifs des situations rencontrées sur l'ensemble du littoral, une estimation de l'aléa de submersion a été recherchée pour l'ensemble de la façade maritime.

2. Méthodologie

La méthode d'estimation du risque à des fins de mise en vigilance des collectivités comprend 3 étapes :

- Etape 1 – étude hydrodynamique régionale : cette première étape consiste à étudier les conditions hydrodynamiques (houles, niveaux marins, etc...) à l'échelle de chaque secteur, Manche-Ouest et Manche-Est ; 16 événements documentés ont été analysés (CARIOLET, 2011 ; LETORTU, 2013) : trajectoires des dépressions, gradients de pression, intensité et orientation des vents, houles océaniques, enjeux touchés.
- Etape 2 – études hydrodynamiques locales : propagation des houles du large, estimation des paramètres locaux pour différentes conditions météo-marines (surcote locale, set-up, run-up,...) ;
- Etape 3 – généralisation : cette dernière étape consiste à développer une méthode de généralisation sur l'ensemble du littoral à partir de la connaissance précise du risque au droit des secteurs tests.

Les 5 sites qui ont été retenus sont localisés sur la *Figure 1*. Ils ont été choisis dans la mesure où ils sont représentatifs des diverses conditions hydrodynamiques rencontrées sur les côtes (front de mer et havre). De plus, ces sites sont relativement bien « documentés ». 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). Blainville-Agon comprend un havre. Il s'agit d'une zone protégée par une flèche sableuse et correspondant à l'exutoire d'un fleuve côtier (huit havres se succèdent sur la côte Ouest). 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.

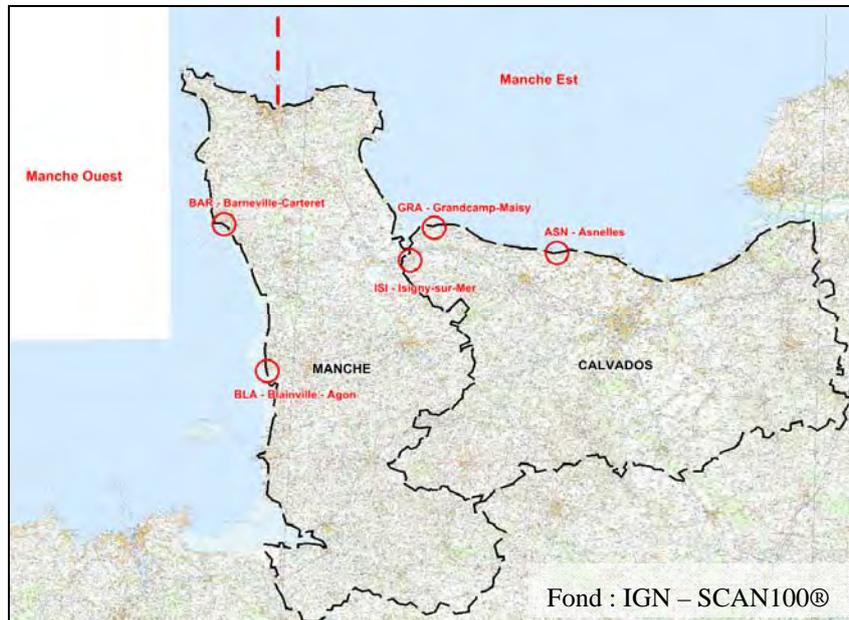


Figure 1. Situation des sites locaux à étudier.

Les étapes de modélisation sont présentées sur la figure 2.

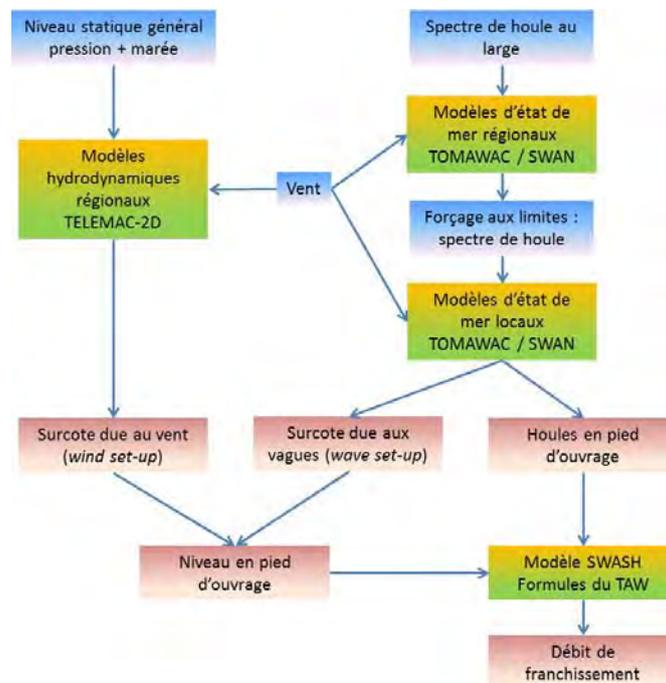


Figure 2. Méthode d'estimation des surcotes et débits de franchissement par modélisation.

Thème 7 – Risques côtiers

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. Les résultats issus de la modélisation sont comparés aux données observées. Le tableau ci-après présente le comparatif entre niveau simulé et niveau observé dans le havre de Barneville-Carteret.

Tableau 1. Calage dans le havre de Barneville-Carteret.

Evènement	Marée (prédiction)	Surcote barométrique	Surcote anémométrique	Wave-setup	Surcote totale	Surcote observée
09 février 1974	112 6,38 mNGF	11 cm	14-21 cm	13 cm	38-45 cm	50 cm
10 mars 2008	106 6,05 mNGF	38 cm	14-21 cm	13 cm	65-72 cm	70 cm
01 février 2014	113 6,37 mNGF	24 cm	13 cm	3 cm	40 cm	50 cm
03 mars 2014	114 6,47 mNGF	29 cm	10 cm	2 cm	41 cm	40 cm

Concernant les débits de franchissement, la validation est beaucoup plus difficile. Les photographies prises lors des tempêtes permettent de se rendre compte de l'ampleur des franchissements mais ne peuvent valider les valeurs de débits. Un site a permis néanmoins de vérifier les ordres de grandeur des débits de franchissement issus de l'emboîtement des modèles. Il s'agit du site des Gougins sur la côte Est lors de l'évènement de Xynthia. Deux informations ont été estimées : le débit maximal lié au franchissement et le volume total qui a franchi la protection. Sur ce site, les eaux rejoignent une rue par laquelle elles inondent le secteur urbanisé. Aucun exutoire ne permet aux eaux de sortir du secteur. Le niveau atteint sur la route et la topographie des lieux ont permis d'estimer le débit maximal et le volume qui a franchi la protection.



Figure 3. Site des Gougins – évènement Xynthia.

3. Résultats

3.1 Facteurs de risque

La *Figure 3* présente une synthèse des paramètres déterminants par ordre d'importance et par secteurs. Ces paramètres résultent d'une double analyse : événements de référence des 30 dernières années sur les côtes Ouest et Est, analyse de sensibilité aux paramètres au droit des 5 sites retenus pour les études locales.

La démarche pour apprécier ces paramètres a été la suivante :

- Simulations de combinaisons niveau de mer, houle, vent (entre 600 et 700 combinaisons par site),
- Estimation des débits de franchissements associés et des niveaux d'eau au droit des secteurs abrités,
- Identification des niveaux de mer à risque et des valeurs seuils pour la marée, la houle océanique et le vent.

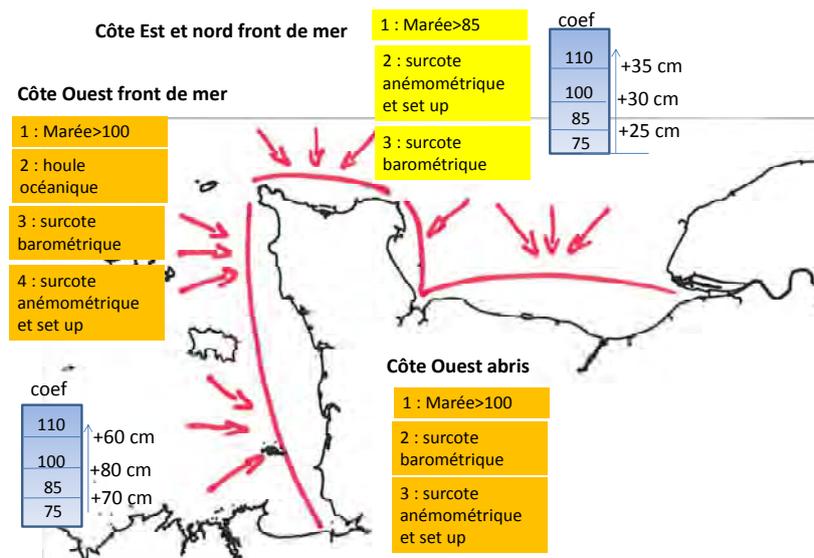


Figure 3. Paramètres déterminants par ordre d'importance.

3.2 Analyses de sensibilité aux hypothèses et incertitudes

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'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. Les calculs

Thème 7 – Risques côtiers

ont montré que la surcote due au vent (anémométrique) est peu dépendante du niveau moyen marin considéré.

3.3 Données d'entrée disponibles pour la mise en vigilance

Les niveaux de marée, la pression, la direction et l'intensité du vent peuvent être obtenus sur des sites comme <http://maree.info/> et <http://www.previmer.org/>. Les informations concernant les protections contre la mer sont partiellement disponibles (exhaustivité entre Saint-Vaast-la-Hougue et Grandcamp-Maisy (ISL, 2012)).

3.4 Construction et utilisation des abaques

Les études de cas ont montré qu'il était possible de dresser des abaques utiles pour l'alerte submersion marine. Le logigramme ci-après présente les étapes qui permettent l'estimation du risque au droit des sites tests.

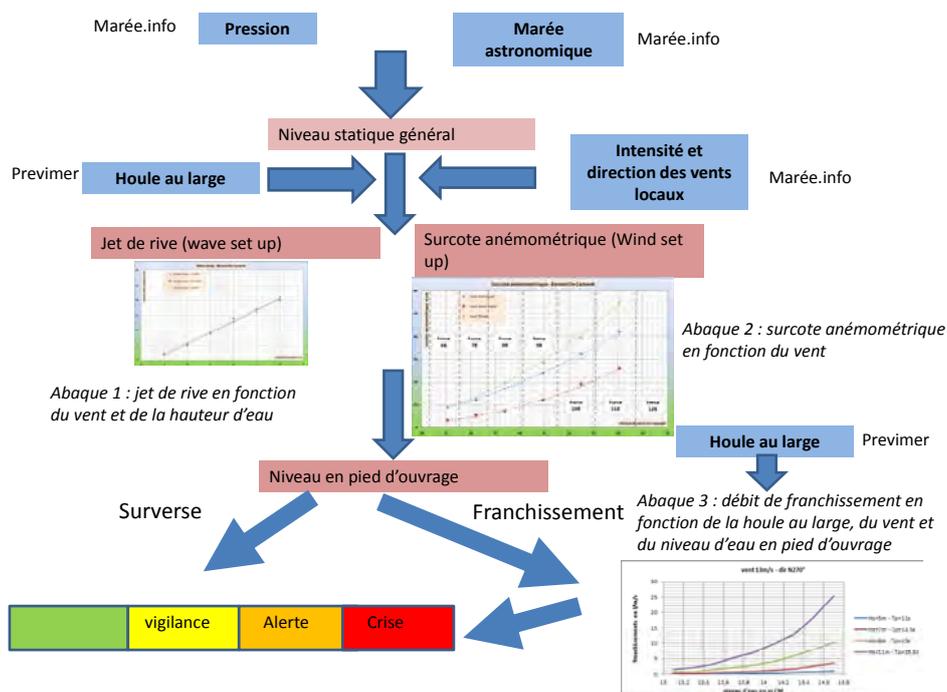


Figure 4. Logigramme décrivant la méthode d'élaboration des abaques.

Les abaques sont établis pour différentes combinaisons de houles au large, de niveau marin moyen et de vent. Par exemple pour le site de Blainville-Agon sur la côte Ouest :

- houles du large – couples H_S-T_P : (5m–11s) ; (7m–13,5s) ; (9m–15s) ; (11m–16,5s) ;
- vents : 13m/s, 16m/s, 19m/s, 23m/s, 27m/s, 31m/s ;
- directions de vents : Sud-Ouest (N225°) ; Ouest (N270°) ; Nord-Ouest (N315°) ;
- niveau d'eau : de 13,10m CM à 14,70m CM.

On aboutit à un total de 648 simulations. Une succession de modèles emboîtés SWAN de résolution 300m, 100m puis 25m ont ensuite permis de propager la houle jusqu'à

Blainville et Agon-Coutainville et d'obtenir les caractéristiques (H_S , T_p , surcote) de la houle à l'approche des différentes digues. Les caractéristiques de la houle sont recueillies tous les 100 mètres le long du linéaire de plage. Les plus défavorables sont ensuite conservées pour chacun des profils de digue afin de calculer les débits de franchissement.

3.5 Formulations simplifiées

Le niveau statique général est facile à estimer et les informations à disposition le permettent (marée et pression). 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. Des abaques locaux au droit de chacun des secteurs à enjeux pourraient être bâtis pour fournir la surcote totale et les débits de franchissement en fonction des caractéristiques géométriques de la protection. Une autre approche consiste à estimer la surcote locale en tous points de la côte à partir de la connaissance des surcotes au droit des secteurs tests. Cette dernière approche a été tentée.

Sur la côte Est, il est possible d'estimer les surcotes anémométriques à partir de la direction et de l'intensité du vent. En effet, la houle dépend quasi exclusivement des conditions de 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 5*).

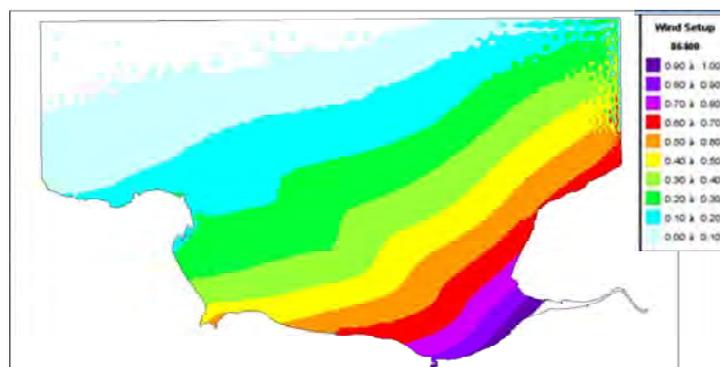


Figure 5. Exemple de carte de la surcote anémométrique, vent de Nord-Ouest.

Thème 7 – Risques côtiers

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 (*Figure 6*) établi à Saint-Marcouf (hameau des Gougins) est utilisé.

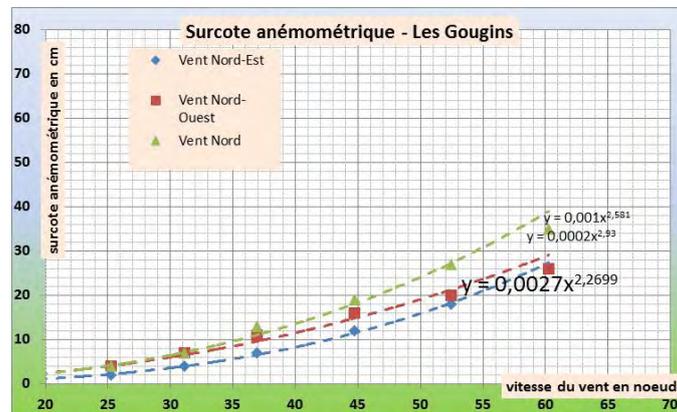


Figure 6. Abaque reliant la surcote anémométrique à la force et à la direction du vent – secteur des Gougins.

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 le 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 limites des zones homogènes sont issues des modèles généraux de simulation du wave set up. 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.

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.

3.6 Validation de la méthode

La méthode a été validée sur le site de Dives (Manche Est) et celui de Granville (Manche Ouest). Les résultats sur Granville sont fournis au *Tableau 2*.

Tableau 2. Validation de la méthode à Granville.

évènement	Pression (hPa)	Houle		Vent (nœuds)	Surcote baro (m)	Surcote set-up vagues (m)	Surcote	Surcote	Surcote	Surcote observée
		au large (m)	Direction vent				totale conditions Nord- Ouest (m)	totale conditions Ouest (m)	totale conditions Sud-Ouest (m)	
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

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.

5. Conclusions

L'analyse des évènements ayant généré des dommages sur la région bas-normande a montré que les situations à risques combinaient des coefficients de marée de 85 pour la côte Est, de 100 pour la côte Ouest, des vents d'intensité supérieure à 5 beaufort, de directions Nord-Ouest à Nord-Est pour la côte Est, de directions allant du Nord-Ouest au Sud-Ouest pour la côte Ouest. Le niveau marin peut dépasser de plus de 50 centimètres le niveau de marée prédit. Cette surcote est expliquée par 3 mécanismes : la surcote barométrique dont la valeur maximale est de 40 cm (les pressions sont très rarement inférieures à 970 hPa), la surcote liée au vent qui dépend de la direction et de l'intensité du vent et qui peut dépasser 50 cm lorsque les vents dépassent 45 nœuds, la surcote liée aux vagues dont la valeur maximale est de 30 cm environ.

Les analyses sur les sites tests montrent qu'il est possible d'estimer le risque de dommages à partir des informations prévues disponibles concernant la marée, le vent, la

Thème 7 – Risques côtiers

pression et les houles au large. Les sites internet <http://maree.info/> et <http://www.previmer.org/> permettent d'accéder à ces prévisions.

Sur la côte Est, de Saint-Vaast-la-Hougue à Honfleur, 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, 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. Il n'est donc pas possible de déduire la houle en pied d'ouvrage des houles au large. Une multiplication des sites tests pour validation de la méthode est également nécessaire.

Plus globalement, les systèmes de vigilance pourraient utilement aider les services gestionnaires d'ouvrage dans leur procédure de gestion de crise. Ils constitueront un outil dans le cadre des PCS établis par les gestionnaires d'ouvrage en permettant une plus juste anticipation de la crise et sa gestion dans des conditions prédéfinies.

6. Références bibliographiques

BREILH J.F. (2014). *Les surcotes et les submersions marines dans la partie centrale du Golfe de Gascogne : Les enseignements de la tempête Xynthia*. Thèse, Université de la Rochelle.

CARIOLET J.-M. (2011). *Inondation des côtes basses et risques associés en Bretagne : vers une redéfinition des processus hydrodynamiques liés aux conditions météo-océaniques et des paramètres morpho-sédimentaires*. Thèse, Université de Bretagne Occidentale.

CASPAR R., COSTA S., JACOB E (2007). *Fronts froids et submersions de tempête dans le Nord-Ouest de la France*. Revue La Météorologie n°57, pages 37-47.

COSTA S. (1997). *Dynamique littorale et risque naturel : l'impact des aménagements, des variations du niveau marin et des modifications climatiques entre la baie de Seine et la baie de Somme*. Thèse, Université de Paris I.

ISL-Ingénierie (2012). *Diagnostic des ouvrages de défense contre la mer entre Saint-Vaast-la-Hougue et Grandcamp-Maisy, Parc Naturel Régional des marais du Cotentin et du Bessin*. Rapport d'étude.

LETORTU P. (2013). *Le recul des falaises crayeuses haut-normandes et les inondations par la mer en Manche centrale et orientale : de la quantification de l'aléa à la caractérisation des risques induits*. Thèse, Université de Caen Basse-Normandie.