



Amélioration d'une méthode d'inondation statique et application au cas de la tempête Xynthia

Jean-François BREILH¹, Eric CHAUMILLON¹, Xavier BERTIN¹

1. UMR 7266 LIENSs, CNRS/Université de La Rochelle,
Institut du Littoral et de l'Environnement,
2 rue Olympe de Gouges, 17000 La Rochelle, France.
jbreil01@univ-lr.fr

Résumé :

Les immenses surfaces inondées lors de la tempête Xynthia et le drame humain associé ont rappelé l'extrême sensibilité des marais et plaines côtières de Charente-Maritime et Vendée à la submersion marine. Des mesures acquises pendant et après cette tempête permettent de réaliser des simulations qui visent à mieux comprendre et mieux prédire les phénomènes de submersion marine. Une modélisation océanographique complète de la surcote et des inondations à terre nécessite des calculateurs très puissants et de longues heures de calcul. Nous avons testé une méthode alternative qui consiste à utiliser un levé topographique à haute résolution (laser aéroporté, Litto3D IGN) couplé à un modèle océanographique de surcote, dont l'espace de calcul est limité au domaine océanique, afin de réaliser des submersions statiques et des calculs de surverse. Les résultats obtenus sont réalistes sur des marais de petites dimensions. En revanche, cette méthode, ne donne pas des résultats satisfaisants sur des marais de grande taille, en particulier si ceux-ci ne sont pas drainés par un estuaire ou un chenal de marée en connexion avec l'espace marin. En effet le paramètre clé est la distance entre le trait de côte et l'inondation maximale. Dans le cas où cette distance est grande, la dynamique de propagation de l'onde d'inondation devient prédominante et une modélisation de l'écoulement est incontournable pour des simulations réalistes.

Mots-clés :

Submersions marines – LiDAR – Surcote – Xynthia

1. Introduction

Les plus grandes pertes humaines et matérielles associées aux tempêtes sont provoquées par les surcotes et les submersions marines. En France, la tempête Xynthia (28/02/2010) a entraîné une inondation majeure des plaines côtières de Charente-Maritime et Vendée, causant plus de 40 morts et des dégâts matériels colossaux. Dans le contexte du changement climatique en cours et de la prédiction d'une augmentation des instabilités climatiques, la prévision de l'extension des zones inondables, par rapport à un aléa climatique donné est un enjeu scientifique à fortes retombées sociétales. Les plaines côtières et marais s'étendant de la Gironde à la Vendée représentent, en termes de

superficielles inondables, un des domaines côtiers les plus vulnérables de France. En effet ces vastes territoires sont situés sous le niveau de la mer en conditions de marée haute de vives-eaux. Si les digues ou les dunes qui protègent ces territoires sont submergés lorsqu'une surcote coïncide avec une marée haute de vives-eaux, l'inondation marine peut envahir des surfaces considérables.

L'objectif principal de cette étude est de modéliser les submersions de façon statique et par surverse, à partir d'un levé topographique à haute résolution couplé à un modèle océanographique de surcote, afin d'évaluer la pertinence et les limitations d'une telle méthode. Cette méthode pourrait être une alternative aux méthodes de modélisation océanographique complètes de la surcote et des inondations à terre, plus longues et nécessitant des calculateurs très puissants ainsi que de longues heures de calcul, puisque devant inclure un très grand nombre de nœuds de calculs pour représenter assez finement la topographie des barrières et défenses de côte.

2. Zone d'étude

Sur les 450 kilomètres de côte de littoral du département de la Charente-Maritime (figure 1A), environ 225 kilomètres sont protégés par des digues et autres ouvrages de protection côtière. Ce sont principalement les zones de marais qui sont protégées. Ces zones côtières sont en grande partie localisées sous le niveau des plus hautes mers, et correspondent à un comblement récent (fin de l'holocène) et en conséquence, vulnérables à la submersion. Ces marais peuvent être arbitrairement séparés en deux grandes catégories :

- Les petits marais, qui s'étendent dans les terres sur moins de 3 kilomètres par rapport au trait de côte, (exemple du marais de Coup de vague, figure 1A).
- Les grands marais, qui s'étendent dans les terres sur plus de 3 kilomètres par rapport au trait de côte. (Exemple du marais de Brouage, figure 1A)

3. Données et méthodes

3.1 Les données en mer

Les niveaux d'eau enregistrés par le marégraphe de la Pallice à La Rochelle pendant la tempête Xynthia ont été collectés grâce au Système d'Observation du Niveau des Eaux Littoral (www.sonel.org).

Les niveaux d'eau pendant la tempête et en tout point du littoral des Pertuis Charentais sont issus d'un système de modélisation développé et calibré dans les Pertuis Charentais par BERTIN *et al.* (2012). Ce système de modélisation résulte du couplage entre le modèle de circulation hydrodynamique SELFE (ZHANG & BAPTISTA, 2008) et le modèle spectral de vague WW3 (TOLMAN, 2009). Les hauteurs d'eau maximales modélisées présentent une forte variabilité spatiale à l'échelle de la zone d'étude (figure 1B), de moins de 4m à près de 5 m.

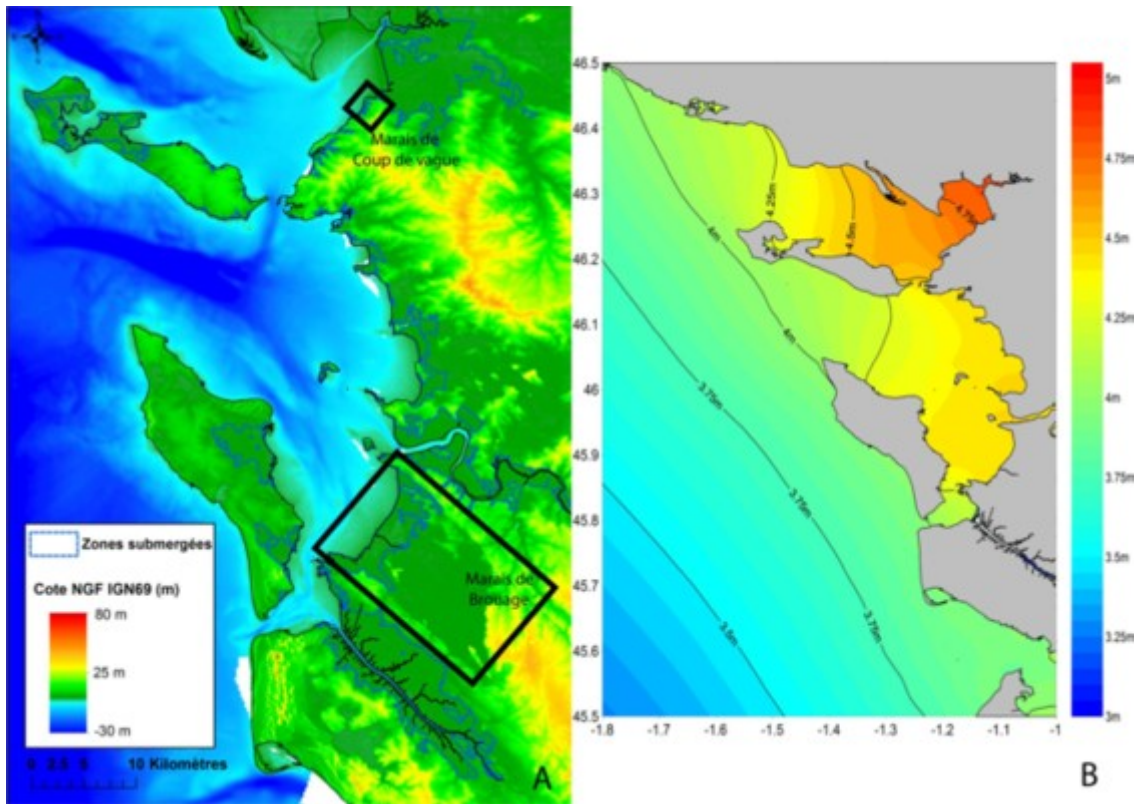


Figure 1. Modèle Numérique de Terrain terre-mer des Pertuis Charentais et représentation des zones submergées par la tempête Xynthia (A) et hauteurs d'eau maximales (cote NGF) pendant la tempête Xynthia (BERTIN et al., 2012) (B)

3.2 Les données à terre

Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) haute résolution, créé à partir de levés LiDAR réalisés dans le cadre de la campagne Litto3D (IGN), permet de représenter la topographie sur l'ensemble du littoral des Pertuis Charentais, avec une résolution horizontale de 1 mètre et une précision verticale de l'ordre de 15 cm. C'est la topographie représentée dans ce MNT qui sera analysée lors des simulations d'inondation statique.

Pour une meilleure précision de la topographie des digues et ouvrages empêchant l'entrée de l'eau dans les terres en condition normales, des levés topographiques au GPS différentiel (précision verticale centimétrique) y ont été réalisés par la communauté d'agglomération et par l'université de La Rochelle.

Enfin, des polygones représentant l'étendue des zones submergées lors de la tempête, fournis par la DDTM 17, mais réalisés par la SOGREAH, sont considérés comme les limites d'inondation réelles et donc utilisés pour comparer les résultats des simulations à la réalité.

3.3 Les méthodes

Les méthodes sont présentées selon 3 niveaux de complexité croissante : (1) une modélisation statique qui prend en compte le niveau d'eau maximum observé au marégraphe de la Pallice à La Rochelle ; (2) une modélisation statique qui utilise les niveaux d'eau extraits du système de modélisation de BERTIN *et al.* (2012) ; (3) un calcul des volumes d'eau passant par surverse et prenant en compte la dimension temporelle de l'inondation.

3.3.1 La submersion statique

Les simulations de submersion statiques sont réalisées à partir d'une analyse de la topographie du MNT. Un niveau d'eau, mesuré ou extrait du modèle, est comparé à cette topographie. Les zones déterminées comme inondées correspondent aux zones sous ce niveau d'eau et connectées à l'espace océanique. La modélisation statique la plus simple consiste à utiliser la hauteur du plan d'eau fixée avec la hauteur d'eau maximale enregistrée par le marégraphe de la Pallice, seul instrument ayant mesuré la hauteur d'eau dans les Pertuis Charentais durant la tempête Xynthia. Le niveau d'eau maximal enregistré est de 4.5 m NGF. L'ensemble du domaine côtier du MNT est comparé à ce niveau d'eau et toutes les zones sous ce niveau et connectées à l'océan sont déterminées comme inondées. Un polygone de l'extension de l'inondation est alors créé dans chacune des zones déterminées comme inondées et comparé aux mesures post tempête. La modélisation statique améliorée consiste à utiliser les hauteurs maximales d'eau atteintes à la côte et calculées par le système de modélisation océanographique pour tenir compte de leur variabilité spatiale (figure 1B). Ces hauteurs d'eau maximales modélisées sont interpolées sur le trait de côte, afin d'obtenir les niveaux d'eau maximum en tous points du trait de côte.

3.3.2 Calcul des volumes de surverse par dessus les digues

Le calcul des débits de surverse est basé sur une approche validée par le CETMEF (CETMEF, 2010), utilisant une formule de seuil rectangulaire classique en régime dénoyé (KINDSVATER & CARTER, 1957), à savoir :

$$Q = \mu L (2g)^{1/2} h^{3/2} \quad (1)$$

où:

Q = débit déversé en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

μ = coefficient de débit (de l'ordre de 0.4)

L = largeur de la zone de surverse en m

g = accélération de la pesanteur m s^{-2}

h = hauteur d'eau en amont du seuil en m

Les hauteurs d'eau " h ", en amont du seuil sont déterminées par soustraction de la topographie de la crête de digue, aux hauteurs d'eau issues de la modélisation au point du trait de côte le plus proche. Les débits sont calculés pour chaque pas de temps de 10

minutes, afin de tenir compte des variations temporelles de hauteur d'eau au dessus de la digue. Le volume total de surverse est ensuite comparé au volume d'eau réel, calculé à partir des polygones d'inondation observés et de la topographie du MNT LiDAR.

4. Résultats

Les résultats présentés dans cette note sont limités à deux marais choisis comme représentatifs de la diversité des résultats obtenus : le marais de Coup de vague (figure 2) illustre le cas des petits marais et le marais de Brouage illustre le cas des grands marais (figure 3).

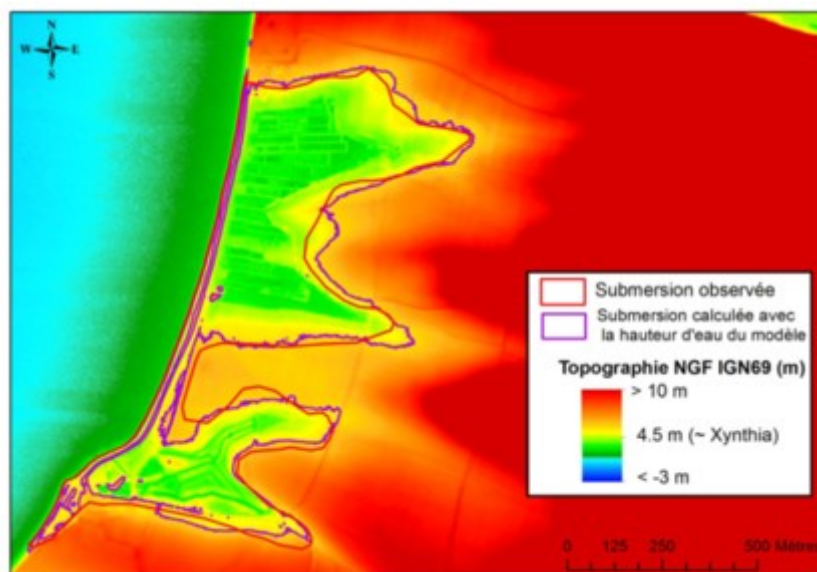


Figure 2. MNT du marais de Coup de vague. Le trait rouge représente la limite de la zone inondée observée. Le trait violet représente la limite de la zone inondée calculée avec les hauteurs d'eau à la côte extraites du modèle de BERTIN *et al.* (2012)

4.1 Le petit marais de Coup de vague : simulations de submersion statique

Les résultats des simulations de submersion statique sur le petit marais de Coup de vague sont comparés à la zone d'inondation mesurée (figure 2). Le polygone de submersion statique déterminé à partir de la hauteur d'eau du marégraphe de la Pallice, soit 4.5 m n'est pas représenté sur la figure 2 puisque, en prenant cette hauteur d'eau, la digue de protection côtière n'est pas submergée et l'eau ne rentre pas dans le marais. La limite d'inondation calculée par submersion statique, utilisant la hauteur d'eau de 4.67 m donnée pour cette zone par le modèle de BERTIN *et al.* (2012), est proche de la limite d'inondation observée. Par contre, le volume de surverse (figure 4) calculé à partir de la formule 1 (95000 m^3), est largement sous estimé par rapport aux volumes calculés à partir des polygones d'inondation réel et de submersion statique utilisant la hauteur d'eau maximale du modèle, qui sont respectivement de 490000 et 580000 m^3 .

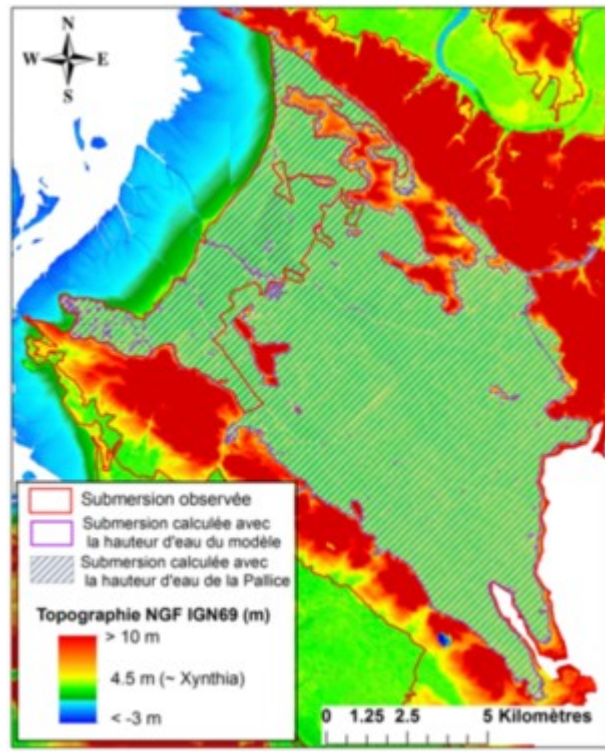


Figure 3. MNT du marais de Brouage. Le trait rouge représente la limite de la zone inondée observée. Le trait violet représente la limite de la zone inondée par submersion statique en utilisant les hauteurs d'eau à la côte extraites du modèle de BERTIN *et al.* (2012) et la zone hachurée représente la zone inondée par submersion statique en utilisant la hauteur d'eau maximale enregistrée au marégraphe de la Pallice.

4.2 Le grand marais de Brouage

Les résultats des simulations de submersion statique sur le grand marais de Brouage sont comparés à la zone d'inondation réelle et sont présentés en figure 3. Une bonne similitude peut être observée entre la limite d'inondation calculée par submersion statique utilisant la hauteur d'eau du marégraphe de la Pallice, soit 4.5 m et la limite d'inondation calculée par submersion statique utilisant la hauteur d'eau de 4.43 m donnée pour cette zone par le modèle de BERTIN *et al.* (2012). Par contre, ces deux approches surestiment fortement l'extension de la zone inondée par rapport aux observations. En terme de volume d'eau (figure 4), le volume de surverse calculé à partir de la formule 1, de $46 \times 10^6 \text{ m}^3$, est du même ordre de grandeur que le volume déterminé à partir du polygone d'inondation réel qui est de $32 \times 10^6 \text{ m}^3$. Les volumes calculés à partir des polygones de submersion statique utilisant la hauteur d'eau maximale du modèle et la hauteur d'eau au marégraphe de la Pallice, sont respectivement de 219×10^6 et $228 \times 10^6 \text{ m}^3$. La forte différence entre l'étendue de la zone d'inondation réelle et les zones d'inondation statiques est donc confirmée par le calcul des volumes de surverse.

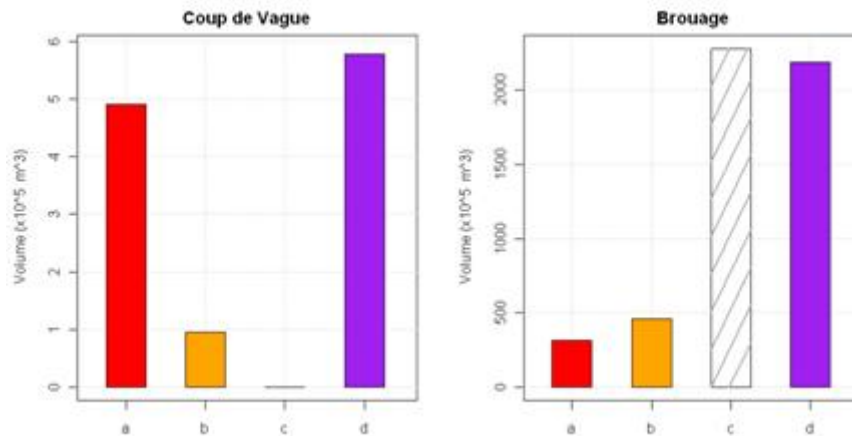


Figure 4. Histogrammes pour le marais de Coup de vague (gauche), et pour le marais de Brouage (droite), représentant les volumes d'eau de la submersion : a- réelle ; b- calculés avec la formule de surverse ; c- statique avec la hauteur d'eau mesurée par le marégraphe de la Pallice ; d- statique avec la hauteur d'eau donnée par le modèle de BERTIN *et al.* (2012).

5. Discussion et conclusions

Les résultats obtenus dans le marais de Brouage (exemple type de grand marais) et dans le marais de Coup de vague (exemple type de petit marais), montrent de grandes différences.

En effet, dans le petit marais, la submersion statique représente bien les zones inondées observées à conditions de prendre la hauteur maximale issue du système de modélisation. Ceci démontre que les mesures des marégraphe sont insuffisantes même dans une démarche simple de modélisation statique. Les résultats d'un modèle océanographique sont incontournables dans les environnements estuariens caractérisés par une forte variabilité spatiale de l'amplitude de la marée. En effet, à l'échelle des Pertuis Charentais, le niveau d'eau maximum atteint pendant Xynthia peut varier de plusieurs dizaines de centimètres en quelques kilomètres (figure 1B). Dans le cas du marais de Coup de vague, les 17 cm séparant la hauteur d'eau issue du modèle de la hauteur d'eau mesurée par le marégraphe, suffisent à submerger la protection côtière et à inonder le marais.

Le volume de surverse bien inférieur au volume observé, s'explique par une sous-estimation des hauteurs d'eau données par le modèle de BERTIN *et al.* (2012) en raison d'une trop faible résolution spatiale à la côte et d'une non prise en compte de l'élévation du plan d'eau liée aux gradients de tensions de radiations dans la zone de déferlement.

Dans le marais de Brouage, les simulations de submersion statiques, qu'elles soient basées sur des hauteurs d'eau mesurées ou modélisées, surestiment très fortement l'inondation par rapport aux observations. Ceci s'explique par la non prise en compte de la dimension cinétique de l'inondation qui devient un phénomène dominant dans le cas

d'un grand marais où les distances à franchir sont pluri kilométriques. En effet, l'inondation statique consiste à remplir tout l'espace d'un marais sous le niveau d'eau maximum atteint pendant la tempête de façon instantanée. Cette approximation qui était acceptable dans le cas des petits marais est rédhitoire dans le cas des grands marais, ou le temps de propagation de la masse d'eau devient grand par rapport au temps de franchissement de la défense de côte. En revanche, le volume d'eau calculé par surverse est proche du volume d'eau réellement passé lors de la tempête ce qui montre la nécessité de prendre en compte le temps de franchissement de la défense côtière.

En conclusion la submersion statique est une méthode simple et efficace dans des petits marais ou le temps de propagation de l'inondation est réduit par rapport au temps de surverse et ce à condition de disposer d'un modèle océanographique représentant bien les variabilités spatiale de la surcote. En revanche, dans les grands marais, la méthode de submersion statique n'est pas applicable, puisque la dimension temporelle et la dynamique de l'écoulement doivent y être pris en compte. Pour de bonnes prévisions de submersion dans de tels environnements, la modélisation hydrodynamique est donc indispensable.

6. Références bibliographiques

- BERTIN X., BRUNEAU N., BREILH J.F., FORTUNATO A.B., KARPYTCHEV M., (2012). *Importance of wave age and resonance in storm surges: the case Xynthia, Bay of Biscay*. Ocean Modelling, Vol. 42 (4), pp 16-30. doi:10.1016/j.ocemod.2011.11.001
- CETMEF (2010). *Analyse de l'évènement Xynthia. Evaluation des volumes entrants par modélisation*. Département Environnement Littoral et Cours d'Eau. Juillet 2010.
- KINDSVATER C.E., CARTER R.W. (1957). *Discharge characteristics of rectangular thin-plate weirs*, Proc. A.S.C.E., 83, (HY6), Paper 1453, December.
- TOLMAN H.L. (2009). *User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14*. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 276, 194 p.
- ZHANG Y.L., BAPTISTA A.M. (2008). *SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation*. Ocean Modelling, Vol. 21(3-4), pp 71-96. doi:10.1016/j.ocemod.2007.11.005