



Xavier BERTIN

Université de la Rochelle,
UMR CNRS 7266 LIENSs

2.9 | Vers de meilleures stratégies pour atténuer les inondations provoquées par les tempêtes

Pour commencer, merci aux organisateurs de m'avoir invité à présenter mes travaux dans le cadre de ce colloque. En effet, je vais vous parler de méthodes un peu nouvelles pour limiter l'impact des submersions marines lors des tempêtes. Je vais commencer par une introduction assez générale.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Nous allons vers une augmentation des risques de submersion marine, comme cela avait été dit par mes collègues précédemment. On a constaté une élévation du niveau de la mer au cours des dernières décennies. Celle-ci va se poursuivre, quel que soit le scénario considéré, en général on s'arrête à 2100, mais on a vu que ça allait se poursuivre au-delà.

Je suis très prudent là-dessus : dans certaines régions du globe, on peut s'attendre à une modification des régimes de tempêtes dans la bande tropicale et peut-être une augmentation des cyclones extrêmes. Et puis dans le même temps, on a dans certaines régions du monde une explosion de la démographie dans les zones littorales, comme à Manille en Asie du Sud-est ou en Afrique de l'Ouest, où les littoraux sont entièrement urbanisés.

Il y a une étude assez récente par Neumann et collaborateurs, qui suggère que d'ici 2060, le nombre d'humains qui habitent dans une zone littorale va doubler.

Alors, pour faire face à ces risques de submersion marine, quelle stratégie de défense de côtes ? Je vais juste montrer deux exemples assez extrêmes, diamétralement opposés.

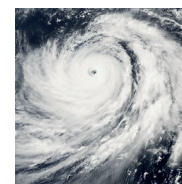
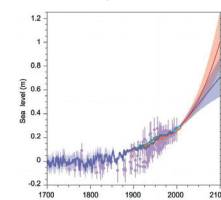
Il y a la défense de côtes en dur. Ceux qui connaissent la région auront reconnu la digue du Boutillon (photo 1). Puis, à l'inverse, complètement à l'opposé (photo 2), dans certains pays d'Europe du Nord, les gens réfléchissent et expérimentent des méthodes dites douces où on recrée des zones humides pour essayer d'atténuer un petit peu l'étendue des submersions marines. C'est un peu de ça dont je vais vous parler aussi.

Quelques événements majeurs récents - 1. Katrina

Alors, quoi qu'il en soit, les submersions marines correspondent aux catastrophes naturelles les plus impactantes, celles qui occasionnent les plus lourds dégâts. Je vais juste passer en revue quelques événements récents, des événements vraiment majeurs.

Tout le monde a entendu parler de Katrina en 2005, un ouragan de catégorie 5 qui a atteint les côtes de Louisiane et du Mississippi, avec une surcote estimée localement

➤ Vers une augmentation des risques de submersion marine



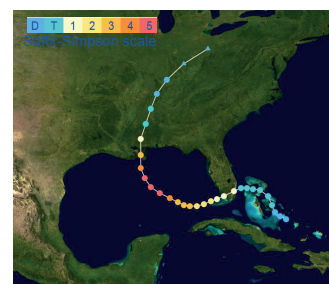
➤ Quelles stratégies de défense de côte ?



Diapo 03 > Introduction générale

➤ Katrina (2005/08):

- Ouragan de catégorie 5 aux abords de la Louisiane (pression 902 mbar, rafales 280 km/h)
- Surcote estimée localement à plus de 9.0 m (Blake, 2007)
- 1836 morts, 106 milliards de dollars de dégâts.



La Nouvelle-Orléans inondée. Credit Jeremy L. Grisham

Diapo 04 > Quelques éléments majeurs récents : Katrina

à plus de neuf mètres : c'est vraiment colossal.

La surcote, c'est les variations de hauteurs d'eau liées à la tempête qui se superposent à la marée.

Quasiment 2000 morts, plus de 100 milliards de dollars de dégâts assurés, c'est vraiment colossal. En grande partie, les dégâts ont été occasionnés au niveau de la ville de La Nouvelle-Orléans qui était bien inondée.

2. Nargis

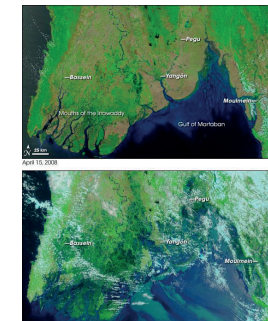
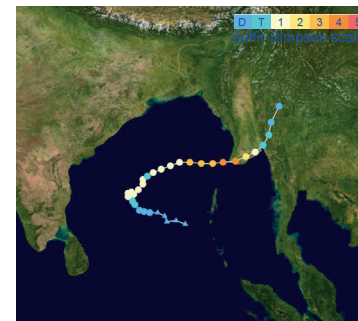
Beaucoup moins médiatisé, l'ouragan Nargis en 2008 qui a submergé une partie importante du delta de l'Irrawaddy, un delta très densément peuplé. Cela a été évoqué rapidement par Mélanie tout à l'heure. Plus de 140 000 morts. Cela montre bien le déséquilibre qu'il peut y avoir dans le traitement de l'information. Probablement, que certains d'entre vous n'avaient jamais entendu parler de cette catastrophe.

3. Haiyan

Plus récemment, l'ouragan Haiyan aux Philippines. C'était un ouragan de catégorie cinq, un peu l'ouragan de tous les records, d'une pression atmosphérique de 850 millibars, avec des rafales à plus de 300 kilomètres/heure et une surcote estimée à un peu plus de cinq mètres à Tacloban. S'en suivirent des scènes de désolation.

➤ Nargis (2008/05):

- Ouragan de catégorie 3 aux abords du Myanmar (pression 962 mbar, rafales à 240 km/h)
- Surcote estimée localement à plus de 4.0 m (Fritz et al., 2010)
- >140000 morts, 4 milliards de dollars de dégâts.

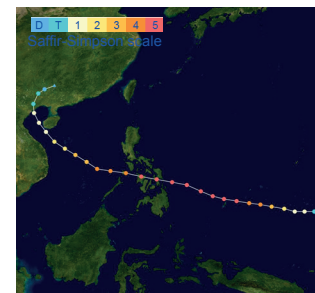


Submersion du delta de l'Irrawaddy pendant Nargis

Diapo 05 > Quelques éléments majeurs récents : Nargis

➤ Haiyan (2013/11):

- Ouragan de catégorie 5 aux abords des Philippines (pression min. 858 mbar, rafales à 315 km/h)
- Surcote >5 m à Tacloban (Deltares, 2013)
- >10000 morts, >4 milliards de dollars de dégâts.



Tacloban après la submersion associée à Haiyan (2013/11)

Diapo 06 > Quelques éléments majeurs récents : Haiyan

Conditions propices aux submersions marines

Si on cherche à hiérarchiser un petit peu tout ça, essayer de mieux comprendre pourquoi certaines régions du globe sont beaucoup plus touchées par ces phénomènes, sur cette figure, on peut voir la compilation de toutes les trajectoires de ces tempêtes tropicales entre 1985 et 2005. La couleur correspond à leur intensité.

La région dans laquelle il y a le plus de cyclones intenses, c'est l'Asie du Sud-est, et ce n'est pas forcément là où on a les catastrophes les plus importantes. Je vous ai dit, dans l'histoire récente, c'est essentiellement dans le golfe du Bengale, puis, dans le golfe du Mexique.

En fait, il y a un deuxième phénomène, un deuxième paramètre à prendre en compte qui est très important, c'est la bathymétrie et la morphologie de ces zones littorales.

Les deux régions dont je viens de parler ont à la fois des zones littorales qui sont basses et qui peuvent donc être submergées, puis des plateaux continentaux qui sont très larges qui font entre 200 à 500 km de large à l'ouest de la Floride.

Et c'est très important, parce que lors des tempêtes, l'eau qui est transportée par le vent va s'empiler, va s'accumuler dans ces zones très peu profondes et c'est la seule condition sous laquelle on peut avoir des surcotes de l'ordre de neuf mètres. On n'aura jamais une surcote de neuf mètres, par exemple, au niveau des îles volcaniques du Japon où il n'y a quasiment pas de plateau continental.

Qu'en est-il pour l'Europe de l'Ouest ?

On a des plateaux continentaux qui sont très larges, notamment en Europe du Nord, en Mer du Nord. Cela fait plus de 500 kilomètres de large. Ici, à La Rochelle, c'est quasiment 200 kilomètres de large au niveau du plateau continental.

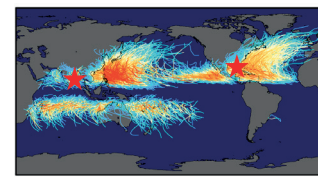
On est sur la trajectoire des dépressions de latitudes intermédiaires. Heureusement, elles sont beaucoup moins fortes que les cyclones tropicaux, même si on peut avoir de fortes tempêtes en hiver.

Puis, on a la présence de zones de côtes basses aux Pays-Bas, tout est dans le nom, mais en France aussi, dans la partie centrale du Golfe de Gascogne, en Camargue, en Normandie et en Allemagne également.

Dans l'histoire récente, la plus grosse catastrophe, c'est la tempête de 1953 aux Pays-Bas, qui a occasionné une surcote de plus de trois mètres pendant des grandes marées. Il y aurait eu plus de 2000 morts entre les Pays-Bas, l'Allemagne, un peu la Belgique et le sud-est de l'Angleterre également.

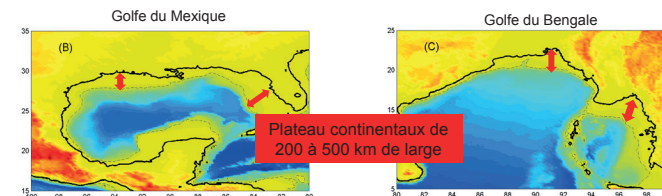
Plus récemment, dans la partie centrale du Golfe de Gascogne, c'est la tempête Xynthia dont je vais reparler un peu tout à l'heure, qui a occasionné 47 morts directement des suites de la submersion et plus de deux milliards d'euros de dégâts assurés.

(A) Trajectoire des principales tempêtes tropicales



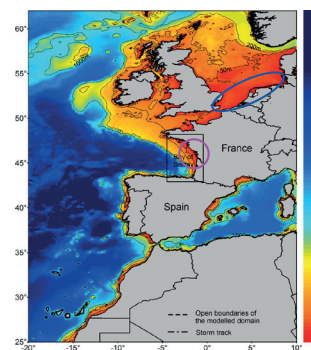
Trajectoire et intensité des tempêtes tropicales entre 1985 et 2005 (NOAA)

(B) Zones côtières peu profondes, bordées de plateaux continentaux larges



Diapo 07 > Conditions propices aux submersions marines

- Plateau continental très large (100-500 km)
- Sur la trajectoire des dépressions de latitude intermédiaire.
- Présence de côtes basses (Pays-Bas, France, Allemagne,...)



→ La plus grosse catastrophe dans l'histoire moderne est la tempête de 1953 (surcote > 3 m; > 2000 morts)

→ Plus récemment, la tempête Xynthia dans le Golfe de Gascogne (Février 2010, 47 morts, > 2.0 milliards d'euros de dommages assurés)

Diapo 08 > Qu'en est-il de l'Europe de l'Ouest ?

I. AMÉLIORATION DE LA PRÉDICTION DES SURCOTES EN ZONE LITTORALE

Introduction

Dans cette première partie, je vais vous parler de l'amélioration de la prédiction des surcotes dans les zones littorales au cours des 15 dernières années.

Il y a eu un certain nombre de progrès, et notamment un des progrès importants, c'est la prise en compte et la représentation de l'effet des vagues.

Lors des tempêtes, les vagues peuvent contribuer de façon importante aux surcotes, jusqu'à un mètre ou plus. Le problème, c'est que ça se passe essentiellement au niveau des zones de déferlement des vagues - là où les vagues déferlent. Et ces zones de déferlement, même pendant les tempêtes, ne sont pas énormes. Elles sont de l'ordre de quelques centaines de mètres.

Donc pour bien représenter tout ce qui s'y passe, cela implique d'avoir une résolution dans les modèles, un maillage très fin, des mailles de l'ordre de la dizaine de mètres, ou quelques dizaines de mètres. Et cela pose un défi majeur en termes de temps de calcul, parce que la taille du maillage - le nombre de points dans le maillage - va être multiplié par 100 ou par 1000 et il y a une vingtaine d'années on ne savait pas faire.

Le progrès très important qui a permis de relever ce défi, c'est la démocratisation du calcul parallèle. Cela veut dire qu'on a des gros calculateurs, pas des simples PC, on a un très grand nombre de processeurs, des centaines ou des milliers. Puis, on découpe notre domaine de calcul en petits morceaux et on répartit le calcul sur plusieurs processeurs. C'est quelque chose de vraiment standard. La plupart des bureaux d'études ont des calculateurs plus ou moins importants. C'est quelque chose qui s'est complètement démocratisé.

La contribution des vagues dans la surcote associée à Klaus

Je vais vous montrer un exemple sur lequel on a travaillé il y a quelques années et sur lequel nous continuons de travailler. C'est la contribution des vagues dans la surcote associée à Klaus. Klaus, c'est une tempête extrêmement violente qui a frappé le sud du golfe de Gascogne en 2009, avec des vents mesurés au Cap Ferret à plus de 30 à 35 mètres par seconde (en rouge). C'est le vent moyen. Le vent en rafales est presque le double du vent moyen. On a atteint quasiment 200 km/heure en rafales.

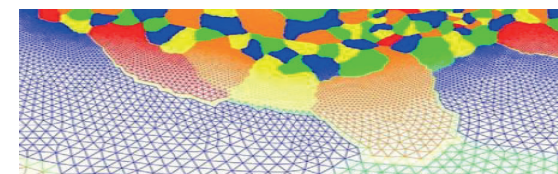
Ce qui nous intéresse particulièrement, c'est que c'est la tempête qui a généré les plus grosses vagues jamais mesurées dans cette partie du golfe de Gascogne. L'holographe permanent est installé depuis 1997. Sur un peu plus de 20 ans, ce sont les plus grosses vagues qui ont été mesurées.



✓ Lors des tempêtes, les vagues peuvent contribuer de façon significative aux surcotes (e.g. Kennedy, 2012).

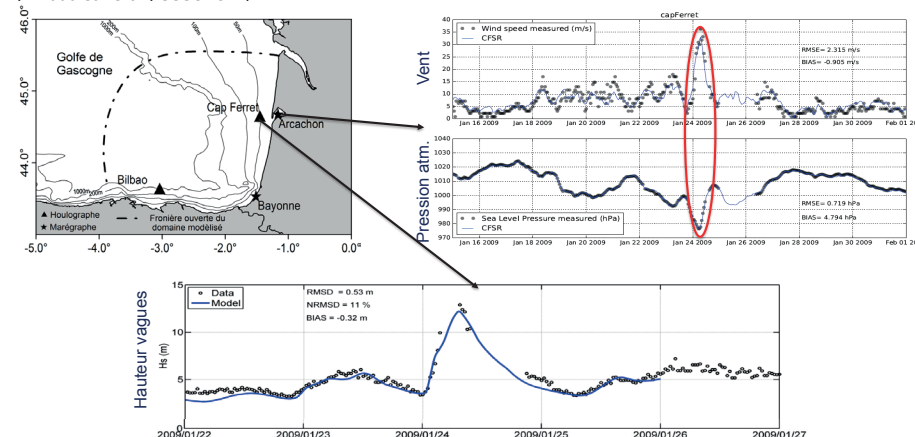
✓ La représentation des processus liés aux vagues implique une résolution spatiale très fine dans les modèles (i.e. $O(10\text{ m})$), ce qui pose un défi majeur en termes de temps de calcul.

✓ La démocratisation du calcul parallèle au cours de la dernière décennie a permis de répondre à ce défi.



Diapo 10 > Introduction

(Arnaud et Bertin, GCGC 2014)



Diapo 11 > La contribution des vagues dans la surcote associée à Klaus (1)

Au pic de la tempête, (graphe 03 / diapo 11) on peut voir la hauteur significative : c'est une grandeur statistique qui atteint 12-13 mètres assez près du bord. Cela veut dire qu'individuellement, les plus fortes vagues approchaient probablement les 20 mètres. On s'est donc dit que c'était la bonne tempête pour étudier la contribution des vagues dans les surcotes.

Pour répondre à cette question, on a mis en place un modèle numérique (fig 02 / diapo 12) qu'on co-développe au laboratoire LIENSs. Voilà le fameux maillage de calcul : on découpe l'espace en petits éléments triangulaires. Puis la couleur correspond à la résolution de ce maillage et on voit qu'on a raffiné la résolution au niveau de l'entrée du bassin d'Arcachon. On a des mailles de l'ordre de 40 à 50 mètres. Puis, au niveau de l'Adour - c'est un des points de mesure - on a des mailles de l'ordre de 25 mètres.

Comment est-ce que ça fonctionne ? On a deux boîtes principalement : un modèle de circulation hydrodynamique qui représente les courants et les variations de hauteurs d'eau, puis, un modèle de vagues qui représente la génération et la propagation des vagues. Ces deux modèles sont entièrement couplés parce que les hauteurs d'eau et les courants vont impacter les vagues. Et inversement, les vagues peuvent générer des courants.

Voici le résultat assez important qu'on a obtenu (diapo 13).

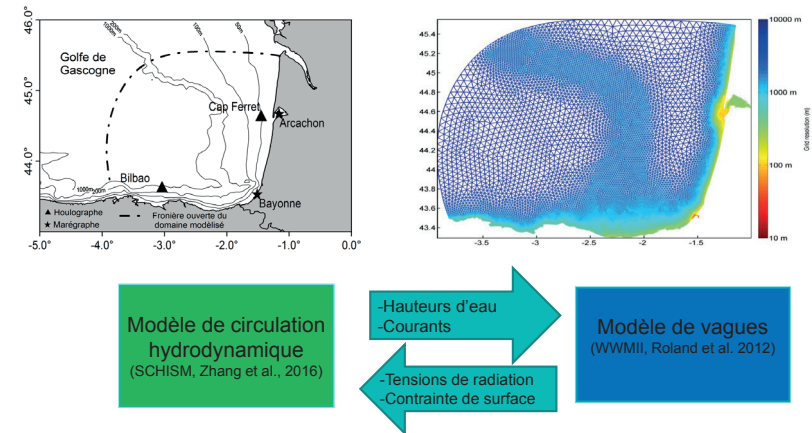
En noir, c'est l'observation de la surcote déduite des observations. On ne peut pas mesurer directement une surcote. À Arcachon, elle atteint quasiment 1,70 mètre. À Bayonne, c'est un peu plus modeste : c'est un mètre.

En bleu, c'est notre modèle : la surcote modélisée, en prenant en compte l'effet du déferlement des vagues. En rouge, c'est quand on nommait tous les effets des vagues. Et on voit qu'on rabote complètement le pic.

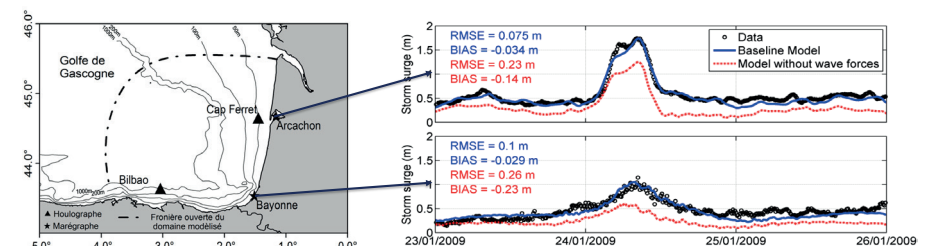
Dans les deux cas, il manque à peu près un demi-mètre. Il y a un demi-mètre de surcote qui provient du déferlement des vagues.

Ce qui est également important c'est que ces marées graves ne sont pas situées dans les zones de déferlement. Elles sont situées dans des ports qui sont abrités de l'agitation. Ce qui se passe, c'est que le déferlement de ces vagues de tempête à l'entrée de l'embouchure va induire une surélévation qui se propage à l'échelle de tout le bassin d'Arcachon et à l'échelle de tout l'estuaire de l'Adour.

Puis, on a travaillé sur la Gironde. C'est la même chose : le déferlement des vagues de tempête à l'entrée de la Gironde induit une surélévation à l'échelle de toute la Gironde. Même si on a réussi à le faire - parce que c'est un domaine qui n'est pas si grand que ça, c'est le quart sud-est du golfe de Gascogne - la représentation de ce phénomène à l'échelle de toute la France métropolitaine serait vraiment un défi en termes de calcul. On sait le faire techniquement, mais, le faire de façon opérationnelle, on n'y est pas encore. Ce sera pour la décennie à venir probablement.



Diapo 12 > La contribution des vagues dans la surcote associée à Klaus (2)



- ✓ Le déferlement des vagues de tempête associées à Klaus contribue à la surcote à hauteur de ~0.5 m jusque dans les zones abritées du déferlement.
- ✓ La représentation de ce phénomène implique une grille de calcul dont la résolution est de l'ordre de la dizaine de mètres.

Diapo 13 > La contribution des vagues dans la surcote associée à Klaus (3)

II. RECONFIGURER LES DÉFENSES DE CÔTE POUR LIMITER L'IMPACT DES SUBMERSIONS MARINES

Introduction

À partir du moment où on a fait des progrès et où on est arrivé à bien reproduire les hauteurs d'eau à la côte, on a pu étudier la submersion marine et en particulier l'impact de la configuration des défenses de côtes sur l'étendue des submersions marines. On peut distinguer principalement trois types de submersion marine.

La surverse (1), c'est quand le niveau moyen est plus haut que les ouvrages qui protègent habituellement des submersions. Il y a une submersion qui est continue.

Le franchissement par paquet de mer (2) c'est un peu l'inverse. Le niveau marin est plus bas en moyenne que la crête des ouvrages du front de mer par exemple. Mais de façon intermittente, les vagues en déferlant sur l'ouvrage, vont projeter des paquets de mer, et vague après vague on peut aussi aboutir à une submersion importante.

Le dernier mécanisme, c'est la rupture de barrière (3). Ci-contre la Dolphin Island dans le golfe du Mexique pendant l'ouragan Ivan : ce qu'on peut voir, c'est que le passage du cyclone a complètement transpercé de toute part le cordon dunaire. Et évidemment, la submersion va se propager de façon plus efficace.

Bien sûr, on peut avoir une combinaison de plusieurs mécanismes.

La submersion marine associée à Xynthia

Je vais vous parler essentiellement de la surverse qui a été le mécanisme dominant pendant Xynthia, même si bien sûr, il y a eu des ruptures d'ouvrages localement.

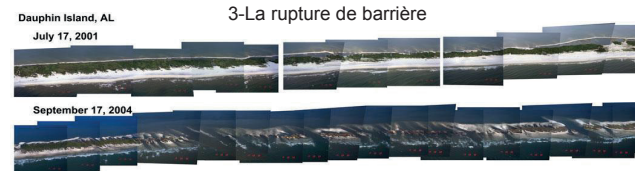
Quelques rappels sur Xynthia : voici sur le graphe, l'enregistrement de hauteurs d'eau au niveau du port de commerce de La Pallice en bleu. On atteint 8 mètres par rapport au zéro hydrographique. Et en rouge, c'est la marée astronomique. C'est-à-dire que c'est la hauteur d'eau qu'on enregistre, s'il n'y avait eu aucune tempête. Et la différence entre les deux, c'est ce qu'on appelle la surcote qu'on voit ici en vert. La surcote était de l'ordre de 1,60 mètre. Elle était exactement en phase avec une marée haute de vives-eaux. Ce n'était vraiment pas de chance.

Ce qu'on voit fig.01, c'est la topographie au nord de La Rochelle en utilisant la même échelle verticale que pour les hauteurs d'eau. Cela signifie que tout ce qui est en vert était situé nettement en-dessous du niveau de la mer pendant Xynthia. Et en conséquence, une large partie de ce territoire a été submergée, avec les conséquences que vous connaissez : le village de La Faute-sur-Mer a été particulièrement impacté avec 27 morts, et La Rochelle a subi des dégâts matériels considérables. C'est anecdotique, mais on a retrouvé des bateaux sur la route parce que les pontons étaient sortis de leurs pylônes.

➤ On peut distinguer 3 types de submersion marine:

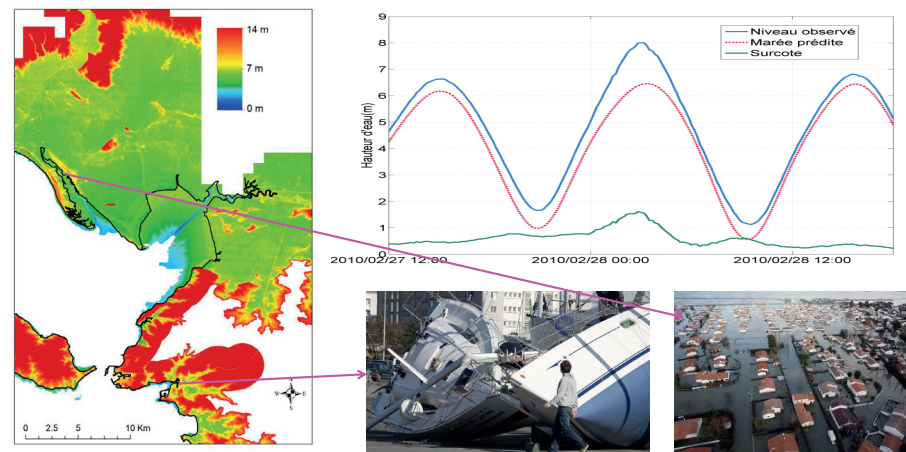


2-Le franchissement par paquet de mer



➤ Bien sûr, une combinaison des trois mécanismes est possible

Diapo 15 > Introduction



Diapo 16 > La submersion marine associée à Xynthia

Modélisation de la submersion marine associée à Xynthia

Voici la grille de calcul qu'on a développée pour cette étude. On a fait le choix d'avoir une grille unique qui couvre tout l'Atlantique Nord-est, avec une résolution qui varie fortement en l'espace de quelques dizaines de kilomètres aux larges à localement trois mètres au niveau de la crête des ouvrages.

Sur la droite, c'est l'animation de la submersion modélisée. Les couleurs correspondent à la hauteur d'eau dans le modèle.

On voit qu'à l'ouest du Marais poitevin, on a localement des hauteurs d'eau supérieures à deux mètres. C'est vraiment impressionnant. Puis, en rouge, c'est l'extension de l'inondation telle qu'elle a été déduite des observations au lendemain de Xynthia, et on voit globalement qu'il y a quand même un bon agrément entre les deux. Bien sûr, localement, si on regarde dans le détail le long du front de mer, on sous-estime assez fortement la submersion.

À l'inverse, localement, dans le Marais de Brouage, c'est l'inverse. La submersion va un peu trop loin parce qu'on n'a pas réussi à représenter une route qui a arrêté l'inondation. Mais, globalement, on est quand même assez satisfait de ces résultats.

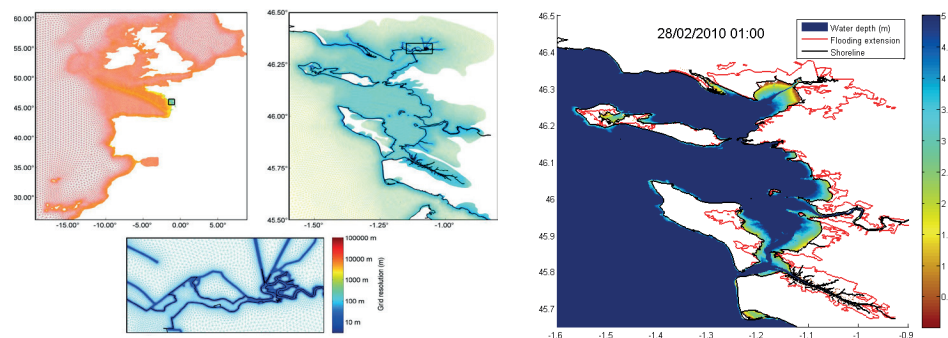
On s'est posé à l'époque une question un peu farfelue qui était : est-ce que ce volume d'eau qui est passé par-dessus les digues, qui est colossal - on parle d'à peu près 300 millions de mètres cubes - n'aurait pas pu avoir un impact sur le niveau des eaux en mer ou en d'autres termes, vider un petit peu l'océan ?

Limitation des hauteurs d'eau lors des débordements massifs

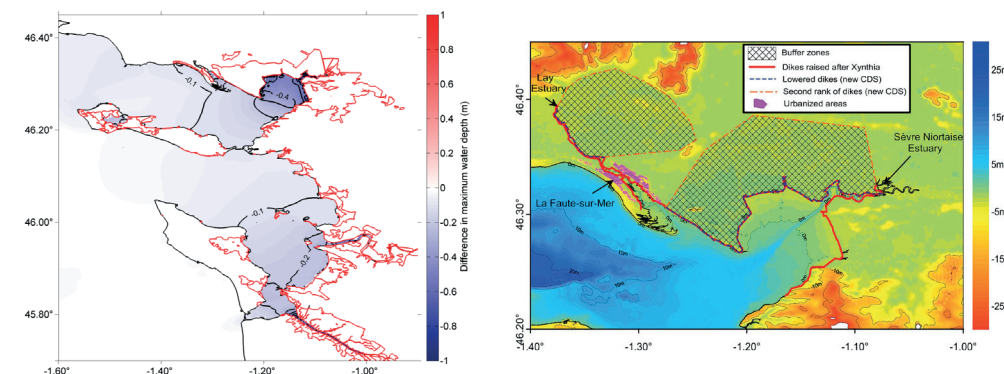
C'est ce qu'on voit sur cette diapo : cette carte correspond à la différence entre la simulation de référence que je vous ai montrée et une simulation où on a empêché l'inondation, en mettant des digues très hautes. On a mis des digues de 10 mètres de haut pour être sûr qu'il n'y ait aucun franchissement. Et on était très surpris. Bien sûr, on a vérifié une dizaine de fois tellement on était surpris.

En fait, ce qu'on peut voir, c'est que la différence n'est pas du tout négligeable. Elle est de l'ordre de 10 centimètres à l'entrée des pertuis charentais. Puis, quand on s'enfonce dans les estuaires, par exemple dans la Sèvre niortaise, on arrive à plus d'un mètre de différence. Et dans la Charente, c'est pareil, on arrive à peu près à un mètre de différence. Donc quand l'eau déborde massivement, elle monte jusqu'à un mètre moins haut que dans le cas où on empêchait ce débordement en faisant des digues très hautes.

À partir de ce mécanisme, on a trouvé vraiment intéressant, avec un ingénieur qui, à l'époque travaillait en CDD dans le cadre d'un projet européen, Jean-Rémy Huguet, de réfléchir à des solutions d'ingénierie inspirées de ce phénomène, pour en tirer parti et essayer d'atténuer l'effet des tempêtes sur les submersions.



Diapo 17 > Modélisation de la submersion marine associée à Xynthia



Diapo 18 > Limitation des hauteurs d'eau lors des débordements massifs

Alors, avant de vous exposer ces résultats j'ai une petite précision.

C'est complètement fictif. Cela ne correspond pas du tout à une étude d'ingénierie réaliste. On a vraiment fait de la science-fiction dans le Marais poitevin, où on a délimité des zones, les «buffer zones» qu'on a appelé des zones-tampons, le long desquelles on a complètement abaissé la hauteur des digues de l'ordre d'un mètre. Donc, ici, et puis en aval de la Fautre-sur-Mer par rapport à la submersion, pour générer une submersion massive, mais de façon contrôlée. On a aussi rajouté une deuxième rangée de digues en aval qui protège les enjeux de la submersion, c'est-à-dire les zones habitées, les routes, etc... On a essayé de regarder l'impact qu'avaient de telles stratégies.

Limitation des hauteurs d'eau lors des débordements massifs

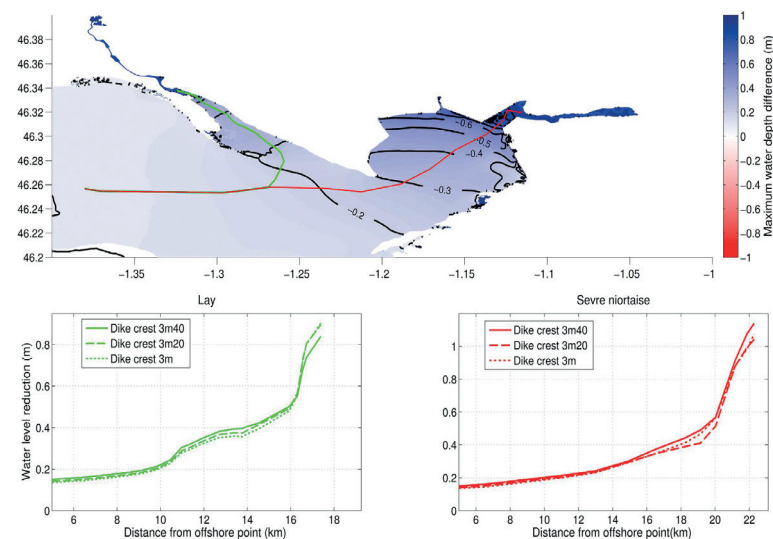
On retrouve un peu la même figure que tout à l'heure, sauf que cette fois-ci, c'est contrôlé, au moins dans notre modèle. Ce que l'on peut voir en vert, c'est une coupe qui suit l'estuaire du Lay et en rouge la Sèvre niortaise.

Dans les deux cas, dans l'estuaire du Lay on arrive à un abaissement du plan d'eau d'un peu plus de 80 centimètres, et dans la Sèvre niortaise, on est au-dessus d'un mètre.

Cette solution est encore une fois complètement fictive et son effet est tout de même robuste. C'est vraiment notre modèle dans lequel on peut avoir confiance, parce qu'il a réussi à bien reproduire ce qui s'était passé pendant Xynthia.

La mise en place de ce type de solution, si elle était réaliste - je n'en sais rien, mon expertise s'arrête là - permettrait d'abaisser la hauteur d'eau maximum pour un événement de type Xynthia jusqu'à quasiment un mètre. Cela pourrait compenser l'élévation du niveau de la mer pour la fin du siècle.

Ce qu'on dit simplement en conclusion, c'est que ça vaudrait le coup de considérer ce genre d'approche lorsqu'il s'agira de réviser les stratégies de défense des côtes dans les décennies à venir.



Diapo 19 > Limitation des hauteurs d'eau lors de débordements massifs

III. LE POTENTIEL DE LA VÉGÉTATION POUR LIMITER LES SUBMERSIONS MARINES

La campagne de mesure de mars 2016

Le dernier volet dont je vais vous parler c'est la végétation comme solution pour limiter l'impact des submersions marines. C'est une question qui est vraiment à la mode dans le milieu scientifique. Il y a des dizaines d'articles tous les ans qui traitent de ce sujet.

Nous avons succombé à cette mode. Plus sérieusement, on s'est rendu compte que dans les pertuis charentais, il y avait un certain nombre de sites qui étaient particulièrement adaptés et en particulier, un très bel herbier dans la réserve de Moëze-Oléron qui s'appelle la Pointe aux herbes, où on a un certain nombre d'étages de végétation, des spartines, et un petit peu plus haut, c'est plus original, un bel étage d'obiones *Halimione portulacoides*. C'est une espèce de pourpier sauvage qui est extrêmement dense.

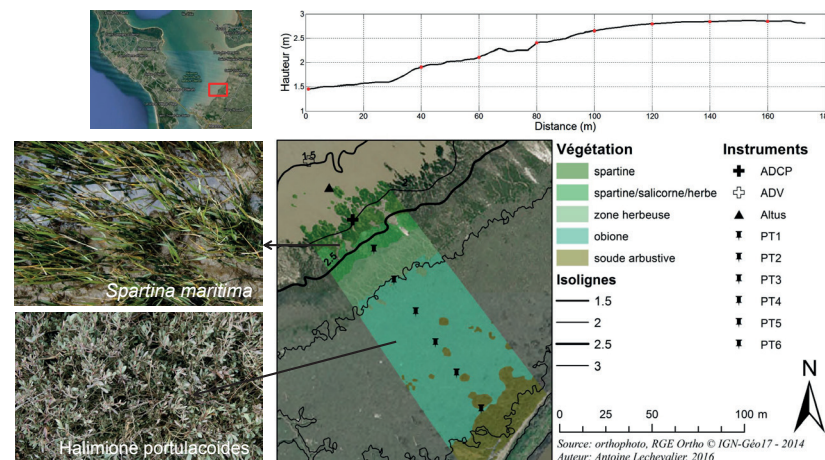
Puis, dans le cadre du stage de Master d'Antoine Le Chevalier, on a réalisé une campagne de mesures, dans le cadre de laquelle on a déployé neuf capteurs perpendiculairement au rivage, pour bien voir l'évolution des vagues et des hauteurs d'eau pendant un coup de vent. Ce n'était pas une tempête.

Dissipation des vagues par la végétation

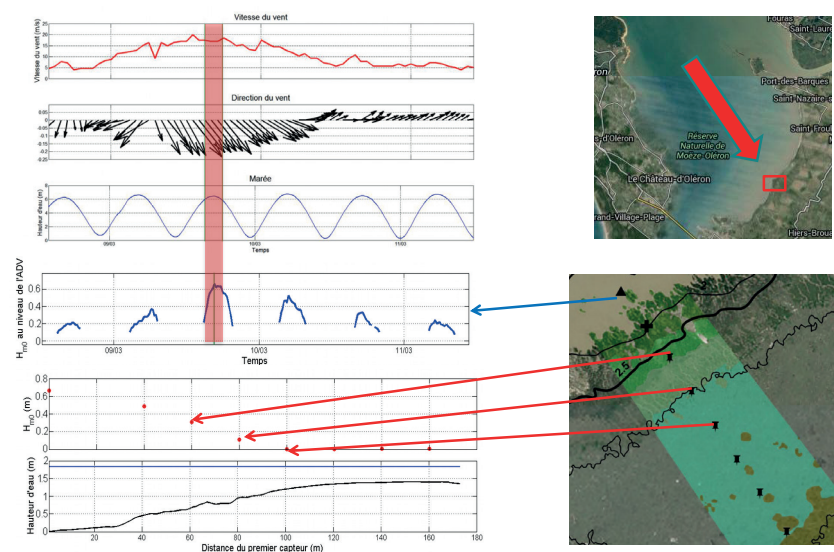
Les herbiers par définition se développent plutôt à l'abri de l'agitation. Donc il a fallu attendre un coup de vent de Nord-Ouest, pour avoir des vagues suffisantes pour avoir quelque chose d'intéressant à mesurer. Ce n'est pas une tempête, on a du vent de 15 à 20 mètres par seconde, c'est un bon coup de vent on va dire.

Et puis ce coup de vent au niveau du début de l'herbier a généré des vagues de l'ordre de 60 centimètres. Ce ne sont pas du tout des vagues de tempête, mais c'est déjà ça. Et ce que l'on peut voir, c'est qu'au fur et à mesure qu'on s'enfonce dans l'herbier, la hauteur des vagues diminue rapidement. Et quand on arrive dans l'obione, la hauteur des vagues disparaît, les vagues disparaissent complètement, et on a des vagues de l'ordre du centimètre. C'est dans notre marge d'erreur, on arrive à peine à mesurer ça.

Et ce n'est pas du tout parce qu'il n'y a plus d'eau, parce qu'à cet endroit-là il y a encore un mètre d'eau. Donc il pourrait y avoir des vagues de 60 centimètres, ce n'est pas le cas, les vagues ont complètement disparu.



Diapo 21 > La campagne de mesure de mars 2016 (stage de A. Lechevalier)



Diapo 22 > Dissipation des vagues par la végétation

Une dissipation exceptionnelle des vagues par les obiones

Afin d'expliquer ce phénomène, on a développé un petit modèle simplifié. Je ne vais pas rentrer dans les détails techniques, mais en résumé ce qui se passe, c'est que le flux d'énergie des vagues, c'est-à-dire l'énergie des vagues multipliée par la vitesse à laquelle ça se propage, est une quantité qui est conservée, sauf s'il y a de la dissipation, de la perte d'énergie.

Dans notre modèle, il y a deux pertes d'énergie. Il y a le déferlement et puis la végétation. Ce qu'on voit en noir, c'est la hauteur des vagues observées, en bleu le modèle sans végétation et en rouge le modèle avec végétation. Le modèle avec végétation permet de bien reproduire cette diminution brutale de la hauteur des vagues, en particulier au niveau des obiones où on a des taux de dissipation.

En général, on chiffre cette dissipation en pourcentage par mètre, quasiment 5 % par mètre. C'est colossal. En fait, pour retrouver des valeurs similaires, il faut trouver des études sur la mangrove. Cette obione est tellement dense, en termes de ramification, etc., que vraiment elle empêche toute propagation des vagues.

Le gros problème c'est qu'à l'endroit-clé, on n'a vraiment pas eu de chance, on a un capteur dont la pile a fondu et donc nous n'avons pas de mesure de l'endroit où tout se passe. C'est pour ça que nous allons répéter cette expérience.

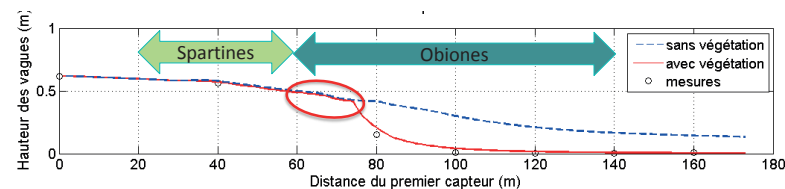
Cette dissipation brutale produit un léger abaissement du plan d'eau

Ce n'est pas complètement fini, il y a un deuxième effet qui est très intéressant. C'est qu'en théorie cette dissipation brutale des vagues devrait produire un abaissement du plan d'eau. Je vais essayer d'expliquer très rapidement pourquoi.

Lorsque les vagues se propagent, il y a un mouvement orbital avec une vitesse qui est dirigée vers la côte sous la crête de la vague, et puis vers le large sous le creux de la vague. Et en eaux peu profondes, cette vitesse est asymétrique. Elle est quasiment deux fois plus forte sous la crête, donc on s'est dirigé vers la côte et pas sous le creux. La contrainte au fond est beaucoup plus forte sous la crête de la vague que sous le creux, mais elle l'est dans l'autre sens, donc dirigée vers le large.

Si on fait la moyenne sur une perte de vague, c'est différent de zéro, donc on a une contrainte qu'on peut qualifier de résiduelle, dirigée vers le large, et qui va tendre à abaisser le plan d'eau. Ça avait été montré uniquement en laboratoire jusque là.

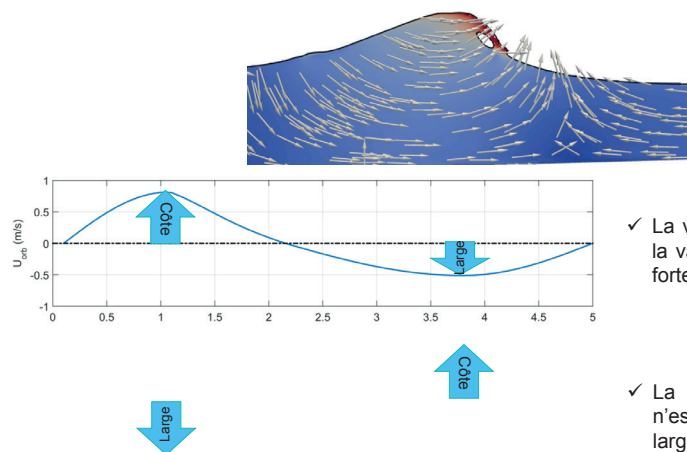
$$\frac{\partial(C_g E)}{\partial x} = -D_{déferl.} - D_{veget.}$$



Dissipation spartine: 1.9 %/m

Dissipation obiones: 4.6 %/m

Diapo 23 > Une dissipation exceptionnelle des vagues par les obiones



✓ La vitesse orbitale sous la crête de la vague est environ deux fois plus forte que dans le creux.

✓ La contrainte résiduelle au fond n'est pas nulle et dirigée vers le large.

Diapo 24 > Cette dissipation brutale produit un léger abaissement du plan d'eau

Là encore on a développé un petit modèle simplifié, qui prend en compte ces différents phénomènes.

En noir, c'est le niveau observé où on arrive à mesurer un léger abaissement du plan d'eau. Et ça réaugmente, on n'a pas d'explication pour le moment. En rouge, c'est le modèle où il n'y a pas de végétation, et ce qui est assez classique, c'est que la surcote ne fait qu'augmenter en s'approchant des petits fonds. Et puis avec la végétation on arrive à reproduire un abaissement du plan d'eau qui est, on va dire, dans le bon ordre de grandeur.

Malheureusement, c'est très ténu, on est proche de notre marge d'erreur et donc on aimerait répéter cette expérience pendant des conditions de tempête où on aura un effet d'abaissement qui pourra atteindre 30 ou 40 centimètres. Et dans ce cas là, on ne serait pas du tout dans la marge d'erreur, on aurait quelque chose de significatif.

Les herbiers ont un fort potentiel pour limiter les submersions marines

Ces herbiers entraînent une forte dissipation des vagues, en particulier dans le cas des obions, où c'est vraiment exceptionnel. Cette forte dissipation entraîne en théorie un léger abaissement du plan d'eau, qu'on a réussi à mesurer partiellement. C'est un petit peu dans notre marge d'erreur, donc on attend des conditions, bien sûr une tempête pas trop extrême pour qu'il n'y ait pas trop de dégâts, mais avec des vents assez forts pour générer des vagues un peu plus fortes que précédemment. De l'ordre d'un mètre, on aimerait bien.

On a une thèse de doctorat qui va s'attaquer à ces questions ; Laura Lavaud est ici.

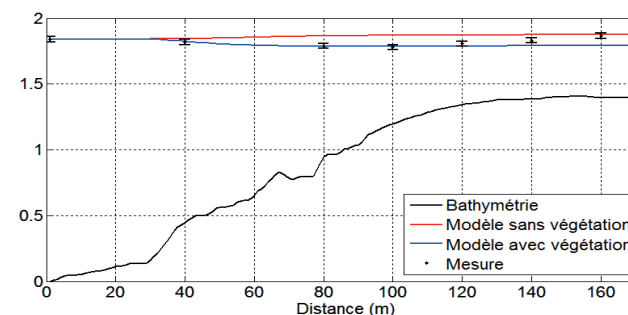
CONCLUSION

L'augmentation récente de la puissance de calcul permet de mieux représenter les surcotes en zone littorale, principalement parce qu'on arrive à mieux représenter les différents effets des vagues.

La création de zones tampon, où la submersion est contrôlée lors des tempêtes, permet d'abaisser la hauteur d'eau côté mer de façon très significative. On a eu jusqu'à plus d'un mètre dans un petit estuaire. Et cela permet d'atténuer les conséquences d'une tempête majeure là où les enjeux sont forts.

Et puis finalement, la présence de végétation entraîne une forte dissipation des vagues et un léger abaissement du plan d'eau. On a tout à gagner à préserver ces herbiers, qui sont en régression dans certains secteurs comme dans le bassin d'Arcachon. Cela me paraît prioritaire de les préserver et de les développer ailleurs. Merci pour votre attention.

$$g \frac{\partial \zeta}{\partial x} = - \frac{1}{\rho H} \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\tau_s}{\rho H} - \frac{\tau_{veget}}{\rho H}$$



Diapo 25 > Dissipation des vagues par la végétation



- ✓ Les herbiers entraînent une dissipation brutale des vagues, l'effet des obions est exceptionnellement élevé.
- ✓ Cette forte dissipation entraîne en théorie un léger abaissement du plan d'eau (Van Rooijen et al., 2016), que nous avons partiellement réussi à mesurer.
- ✓ Nous attendons des conditions de tempête pour répéter ces mesures (thèse L. Lavaud).

Diapo 26 > Les herbiers ont un fort potentiel pour limiter les submersions marines