





Etat des connaissances sur la dynamique et la cinétique de la submersion marine et des méthodologies d'évaluation

Rapport final

BRGM/RP-66197-FR

Novembre 2016

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM AP15LRO026

R. Pedreros, Y. Balouin, F. Paris et S. Lecacheux

Vérificateur :

Nom : S. Le Roy Date : 17/02/2017

Signature:

Approbateur:

Nom: Blum A.

Date: 20/02/2017

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.



Mots-clés : submersion marine, débordement, structures côtières, modélisation numérique.	franchissement,	brèches	dunaire,	défaillance	de
En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon su	ivante :				
Pedreros R. (2016) – Etat des connaissances sur et des méthodologies d'évaluation. Rapport final. Bl	la dynamique et la RGM/RP-66197-F	a cinétique R, 63 p., 3	e de la sub 4 fig., 10 t	omersion mai abl.	rine
© BRGM, 2016, ce document ne peut être reproduit en totalité o	u en partie sans l'autor	risation expre	esse du BRG	M.	

Synthèse

Les espaces littoraux de Méditerranée, et en particulier les « zones basses » du Golfe du Lion, sont caractérisés par une topographie à fleur d'eau, parsemée d'étangs et de lagunes particulièrement vulnérables à l'aléa submersion marine. Dans un contexte de changement global et d'élévation du niveau de la mer, l'évaluation précise de cet aléa est cruciale. C'est pourquoi la DREAL a confié au BRGM dans le cadre d'une Convention Recherche & Développement Partagés une étude relative à la dynamique et à la cinétique de la submersion marine en Languedoc-Roussillon. Ce rapport concerne la première phase de cette étude, à savoir la synthèse de l'état des connaissances sur la dynamique et la cinétique de la submersion marine et des méthodologies d'évaluation.

Il ressort de cette synthèse que :

- la modélisation numérique de la submersion par débordement est mûre avec des applications sur des domaines de quelques km² à plusieurs milliers de km², couvrant une durée de plusieurs jours tout en tenant compte de l'occupation du sol, du comportement des ouvrages hydrauliques et des éventuelles défaillances des structures de défense côtière. De plus, d'autres phénomènes peuvent être intégrés à la modélisation de la submersion comme l'apport en eau douce des fleuves et/ou de la pluie;
- la modélisation détaillée et réaliste de la submersion par franchissements de paquets de mer est possible y compris dans des zones fortement urbanisées. Néanmoins sa mise en œuvre reste délicate (outils numériques toujours en phase recherche) et limitée à des domaines de quelques km²;
- des méthodes mixtes de modélisation de débordement/franchissement peuvent être mises en place sur des domaines étendus fournissant de bons résultats. Le comportement des ouvrages hydrauliques, les éventuelles défaillances des structures de défense côtière et l'apport en eau douce (fluvial et pluie) peuvent également être intégrés. La mise en place de ces méthodes demeure néanmoins complexe;
- L'état de l'art de la modélisation morphodynamique permet de simuler la génération des brèches dunaires. Toutefois la mise en œuvre des modélisations demeure complexe avec des temps de calcul très importants et limitée à des domaines de quelques km².

Sommaire

1. In	ntroduction	9
2. P	rocessus à l'origine de la submersion marine et de l'érosion des dunes	.11
2	2.1. SUBMERSION MARINE	.11
2	2.2. EROSION ET RUPTURE DES CORDONS DUNAIRES	.13
3. D	etermination de la submersion marine	.17
3	3.1.1.Données Topo-Bathymétriques	.19 .24 .29 de .31
	3.1.6.Données en entrée des modèles	
3	3.2.1.Modélisation de la submersion marine par débordement	.32 de mer et
4. D	etermination de la rupture des cordons dunaires	.53
4	1.1. DESCRIPTION DE XBEACH : MODELE MORPHODYNAMIQUE	.53
4	2.2. EXEMPLE D'APPLICATION : BOUCHOLEURS (TEMPETE XYNTHIA)	.54
5. C	conclusions	.59
	te des figures	61
Figu	re 1 : Schéma des différentes contributions au niveau du plan d'eau lors d'une tempête (surcotes) jusqu'au rivage	. 12
Figu	re 2 : Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement paquets de mer / dégradation des ouvrages / débordement, ©BRGM)	

Figure 3 : Echelle des impact de tempête (Storm Impact Scale) en fonction des niveau d'eau et de l morphologie de la côte, Gervais (2012) d'après Sallenger (2000)14
Figure 4 : Méthodes de calculs de la submersion (source BRGM)
Figure 5 : Construction de l'abaque «cote altimétrique / volume » (source BRGM)18
Figure 6 : Exemple de résultat du lissage des données Litto3D sur un transect le long d'une route e Guadeloupe (abscisse, distance en m ; ordonnée altitude en m/IGN88). Source BRGM. Pedreros et al. 201620
Figure 7 : Illustration en coupe de la correction d'un modele numérique de terrain 12 m (ici exemple pour trois rangs de digues), source BRGM21
Figure 8 : Exemple de construction d'un MNT de résolution décamétrique de la Camargue. A : Compilation des données Topo-Bathymétriques ; B : éléments linéaires structurants issus de la BDtopo©IGN ; C : MNT final. Source BRGM, Paris et al. 2015 22
Figure 9 : Schéma de principe du traitement du produit Litto3D pour constituer un MNE permettant des simulations d'inondation (source BRGM Le Roy et al., 2012)24
Figure 10 : Coefficients de Manning (en s.m ^{-1/3}) associés aux types de sol. Source : Bunya et al. (2010)25
Figure 11 : Carte d'occupation du sol sur la plaine du Ceinturon fournie par le Syndicat Mixte du SCoT PM26
Figure 12 : Photographie satellite de la plaine du Ceinturon et carte des coefficients de Manning à une résolution de 5 m (source BRGM, Le Roy et al. 2014)28
Figure 13 : Altitude maximale du plan d'eau (IGN69, m) au cours des simulations sur Gâvres sur MNE « avec bâti explicite » (a), et sur MNT « sans bâti » (Manning urbain). Source BRGM (Le Roy et al. 2015)29
Figure 14 : Difference entre les vitesses des écoulements calculées avec un MNE (bâti explicite) et un MNT (Manning urbain). Source BRGM (Le Roy et al. 2015)29
Figure 15 : Illustration des types d'ouvrages hydrauliques (écluses) pris en compte dans les modèles30
Figure 16 : Exemple de différentes conditions d'écoulement pris en compte dans les modélisations.
Figure 17 : Schématisation de la stratégie de la modélisation de la submersion par débordement.
Figure 18 : Vues instantanées de la simulation de la submersion marine sur le secteur des Boucholeurs lors de la tempête Xynthia. Source Brgm37
Figure 19 : Exemple de validation du modèle de vague WW3. En haut : maillage non structuré utilisé ; au milieu : caractéristiques du champ de vagues (Hauteur et direction) au p de la tempête novembre 2000 ; en bas : comparaison des résultats des simulations et des observations à la bouée Camargue. Source BRGM, Paris et al. 2015 39
Figure 20 : Exemple de validation de la phase de submersion lors de la tempête de novembre 1982 Instantannées de la simulation et extension de la zone inondée modélisée (bleu) et localisation des observations ponctuelles (étoiles rouges) sur le secteur du Grau du Roi et la petite Camargue. Source BRGM, Paris et al. 201540
Figure 21 : Schématisation de la stratégie de la modélisation réaliste de la submersion par paquets de mer41
Figure 22 : Exemple de série temporelle de niveau d'eau utilisée en entrée par les modèles vague- à-vague. Source BRGM, Le Roy et al. 201541
Figure 23 : MNE de 1 m de résolution de Gâvres. Source BRGM, Le Roy et al 201544

rigure 24 . iris	2015
Figure 25 : Ha	uteurs d'eau et courants maximaux obtenus lors de la simulation. Source BRGM, Le Roy et al 201544
Figure 26 : Ins	tantanés d'une simulation menée sur l'Ayguade (scénario trentennal à échéance 2030) avec le modèle vague-à-vague SWASH. Source BRGM, Le Roy et al. 2014.
Figure 27 : Sco	énario trentennal à échéance 2030 (gauche), trentennal à échéance 2100 (milieu) et scénario centennal à échéance 2100 (droite) : Hauteurs d'eau maximales simulées à terre à l'Ayguade (résolution 1 m). Source BRGM, Le Roy et al. 201446
Figure 28 : Scl	hématisation de la stratégie mixte de la modélisation de la submersion marine par débordement et franchissements47
Figure 29 : Co	mparaisons des débits franchissant mesurés en laboratoire à ceux calculés par des formules paramétriques (Eurotop) et modélisés par SWASH. Source Suzuki et al., 201248
Figure 30 : Imp	plantation d'une chaîne de modélisation de la submersion par débordement, franchissement et ruissellement sur la ville de Sainte-Suzanne. Source BRGM, Lecacheux et al. 201650
Figure 31 : Ex	emple de simulation des hauteurs d'eau et des vitesses des courants issues de la modélisation des inondations sur la commune de Sainte Suzanne. Source BRGM, Lecacheux et al. 201651
Figure 32 : Illu	stration du fonctionnement des modèles morphodynamiques. Source BRGM 53
Figure 33 : Loc	calisation des Boucholeurs, trajectoire de la tempête Xynthia et localisation des brèches observées. Source Müller et al. 201654
Figure 34 : Ch	amps des courants (vitesses et directions) simulés avec Xbeach. Les points noirs correspondent aux positions des brèches observées. D'après Müller et al. 2016.56
Liste des t	ableaux
Tableau 1 : Ty	pologie simplifiée de l'occupation du sol et regroupement des caissons de la carte d'occupation du sol du SCoT PM (source BRGM, Le Roy et al. 2014)26
Tableau 2 : Co	pefficients de Manning associés aux rugosités en zones urbaines (d'après Engineers Australia, 2012)27
Tableau 3 : Co	pefficients de Manning attribués en fonction de la typologie simplifiée d'occupation du sol (source BRGM, Le Roy et al. 2014)27
Tableau 4 : Pri	incipales caractéristiques des simulations de la submersion par débordement sur le secteur des Boucholeurs
Tableau 5 : Pri	incipales caractéristiques des simulations de la submersion par débordement en Camargue38
Tableau 6 : Pri	incipales caractéristiques de la simulation de la submersion par franchissements de paquets de mer à Gâvres lors de la tempête Johanna43
Tableau 7 : Pr	incipales caractéristiques de la simulation de la submersion par franchissements de paquets de mer aux Ayguade45
Tableau 8 : Pr	incipales caractéristiques de la simulation de la submersion par franchissements, débordement et ruissellement dans la commune de Sainte-Suzanne49

Tableau 9 : Principales caractéristiques de la simulation de la génération des brèches da	ns le
secteur des Boucholeurs Müller et al. 2016	55
Tableau 10 : Comparaisons des dimensions des brèches observées et simulées avec XI	beach sur
le secteur des Boucholeurs. D'après Müller et al. 2016	57

1. Introduction

Les espaces littoraux de Méditerranée, et en particulier les « zones basses » du Golfe du Lion, sont caractérisés par une topographie à fleur d'eau, parsemée d'étangs et de lagunes particulièrement vulnérables à l'aléa submersion marine. Dans un contexte de changement global et d'élévation du niveau de la mer, l'évaluation précise de cet aléa est cruciale. C'est pourquoi la DREAL a confié au BRGM dans le cadre d'une Convention Recherche & Développement Partagés une étude relative à la dynamique et à la cinétique de la submersion marine en Languedoc-Roussillon. Cette étude se déroule en deux phases principales :

- 1- réaliser l'état des connaissances sur la dynamique et la cinétique de la submersion marine et des méthodologies d'évaluation ;
- 2- appliquer sur un site test des méthodes pertinentes pour évaluer la submersion marine.

Le présent rapport concerne la première étape sur l'état des connaissances. Il s'organise de la manière suivante :

- le chapitre 2 rappelle les processus à l'origine de la submersion marine et de l'érosion des dunes ;
- le chapitre 3 s'intéresse aux différentes méthodes d'évaluation de la submersion marine en détaillant : i) les données utilisées et leur traitement ; ii) les méthodes empiriques et de modélisation numérique adaptées aux différents modes de submersion (débordement, franchissement et rupture de structures de protection) ; iii) des exemples d'application de ces méthodes afin d'illustrer les domaines d'application et limites ;
- le chapitre 4 traite de la modélisation de la rupture de cordon dunaire ;
- le chapitre 5 dresse enfin les principales conclusions de cette étude.

2. Processus à l'origine de la submersion marine et de l'érosion des dunes

2.1. SUBMERSION MARINE

« Les submersions marines sont des inondations temporaires de la zone côtière par la mer lors de conditions météorologiques et océaniques défavorables (basses pressions atmosphériques et fort vent d'afflux agissant, pour les mers à marée, lors d'une pleine mer) ; elles peuvent durer de quelques heures à quelques jours » (Guide méthodologique, MEDDE, mai 2014). Elles sont le plus souvent associées à des surélévations temporaires du niveau de la mer lors de tempêtes ou de cyclones, voire de tsunamis.

En dehors des tsunamis, les surcotes marines sont contrôlées par deux processus principaux Figure 1) :

- **La surcote atmosphérique** : le passage d'un important système dépressionnaire (cyclone, tempête) est caractérisé par des variations du niveau marin selon deux mécanismes :
 - La chute de pression atmosphérique entraîne une surélévation du niveau du plan d'eau. C'est le phénomène de baromètre inverse : une diminution d'1 hPa équivaut à une élévation d'1 cm du plan d'eau (valeur pour une situation théorique d'un plan d'eau infini et d'une pression atmosphérique uniforme).
 - A cela s'ajoute l'effet du vent, qui en fonction de son intensité et de sa direction est susceptible de provoquer des accumulations d'eau sur la bande littorale.

La surélévation du plan d'eau provoquée par la chute de pression et l'action du vent correspond à la surcote atmosphérique (ou météorologique). La combinaison de la marée et de cette surcote atmosphérique génère le niveau de la mer « au repos » (Figure 1).

- La surcote liée aux vagues (wave Setup): à l'approche de la côte, les vagues générées au large déferlent en transférant leur énergie sur la colonne d'eau, dont une partie provoque une surélévation du niveau moyen du plan d'eau (le « wave Setup » ou surcote liée aux vagues) qui peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres. On peut distinguer 2 types de setup: « local » ou « environnant/régional ». Le premier, le plus commun, concerne les secteurs à proximité immédiate des zones de déferlement (plages exposées aux vagues par exemple). Le setup « environnant ou régional » affecte des milieux abrités semi-fermés (ports, bassin d'Arcachon, pertuis Charentais, etc.) où le déferlement se produit à proximité de l'entrée de ces milieux à cause de la présence de haut-fonds (plateaux rocheux, bancs de sable, etc.) générant ainsi un setup qui se propage ensuite à l'intérieur de ces environnements (Garcin et al., 2012; Bertin et al., 2015).

Le **niveau moyen du plan d'eau** (ou niveau statique) lors d'une tempête ou d'un cyclone résulte de la contribution de la surcote atmosphérique, de la surcote des vagues et de la marée (Figure 1). La marée est de type semi-diurne en France métropolitaine (2 cycles de pleine mer et basse mer par jour). La différence de hauteur entre une pleine mer et une basse mer, appelée marnage, peut atteindre plusieurs mètres. On distingue alors les côtes macrotidales (marnage supérieur à 4 m), mésotidales (2 à 4 m de marnage) et microtidales (marnage inférieur à 2 m).

Enfin, le niveau instantané du plan d'eau dépendra du jet-de-rive (swash), c'est-à-dire le flux et le reflux des vagues sur l'estran. On appelle runup la cote maximale atteinte par la mer audessus d'un niveau de référence (ex. le zéro hydrographique ou encore le zéro NGF).

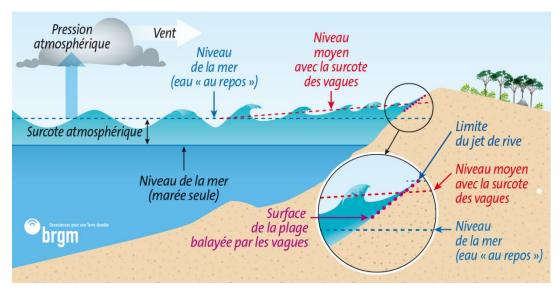


Figure 1 : Schéma des différentes contributions au niveau du plan d'eau lors d'une tempête (surcotes) jusqu'au rivage.

La submersion peut se manifester selon trois processus différents (Figure 2) :

- le **franchissement** par paquets de mer, qui correspond au passage des vagues pardessus les défenses côtières (naturelles ou artificielles), l'accumulation d'eau résultante peut s'avérer importante selon l'ampleur des franchissements, leur durée et le linéaire concerné; le franchissement est conditionné essentiellement par la position du plan d'eau (niveau statique) par rapport à la cote maximale du terrain naturel ou des ouvrages de protection, et par les caractéristiques locales des vagues (hauteurs et périodes);
- le débordement, qui correspond à une élévation du niveau d'eau statique au-dessus de la cote maximale du terrain naturel ou des ouvrages de protection; il entraîne un déversement direct d'importantes quantités d'eau à terre; les volumes d'eau mis en jeu dépendent de l'écart entre le niveau d'eau et celui de la cote maximale du terrain naturel ou des ouvrages de protection, de la durée du débordement et de la vitesse de l'écoulement au-dessus de l'obstacle;
- la rupture de structures de protection est causée par l'action répétée des vagues et/ou la surverse. Les structures de protection peuvent être alors endommagées progressivement ou brutalement, et des brèches ou une défaillance généralisée peuvent se produire, provoquant le passage à un régime de débordement. Le déversement de l'eau en arrière des ouvrages est également de nature à dégrader fortement le rôle de protection de ces derniers.

Un épisode de submersion peut résulter de la succession de ces différents processus, voire de leur occurrence simultanée, en des endroits différents. Lors de tempêtes (Figure 2), on assiste généralement à une montée progressive du niveau moyen (ou statique) et à un renforcement de l'intensité des vagues (temps 1). Au-delà d'une certaine intensité, il peut y avoir franchissements par paquets de mer, la submersion associée restant en général limitée (temps

2). Si le niveau statique continue à s'élever et dépasse la cote maximale des défenses côtières, la submersion passe alors en régime de débordement (temps 3A). Lorsque le niveau statique diminue du fait de la marée et/ou de la baisse de la surcote, on peut observer, suivant la configuration, une « vidange » partielle de l'eau accumulée à terre vers la mer ou de nouveaux franchissements jusqu'à ce que les conditions de mer diminuent (temps 3B). En cas de rupture d'un ouvrage de protection, il peut y avoir submersion par débordement alors que le niveau statique ne dépasse pas la cote maximale de l'ouvrage avant rupture (temps 3C).

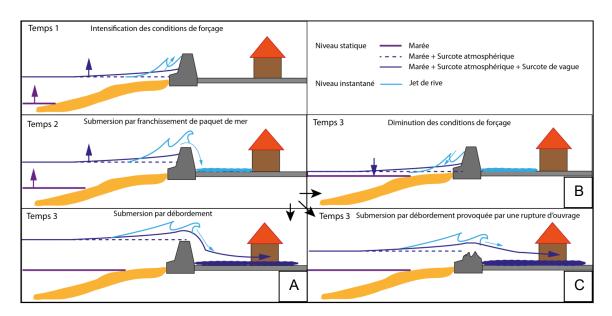


Figure 2 : Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer / dégradation des ouvrages / débordement, ©BRGM).

2.2. EROSION ET RUPTURE DES CORDONS DUNAIRES

En 2000, Sallenger propose une échelle des impacts érosifs des tempêtes (Storm Impact Scale) sur les cordons dunaires littoraux (Figure 3). Cette échelle d'évaluation a l'avantage de prendre en compte à la fois le niveau d'eau et la morphologie des dunes. Elle met en avant le fait qu'une même tempête n'aura pas le même impact érosif selon le type de cordon dunaire préexistant. Deux types d'environnements sont pris en exemple par l'auteur : un secteur de dunes bien établies (Duck, Caroline du Nord), semblables aux dunes de la côte Aquitaine, et une autre zone d'îles sableuses très basses (Iles Dernières, Louisiane), formées de cordons sableux aisément submersibles, plus ou moins comparables à certains secteurs situés en Languedoc Roussillon.

L'érosion des dunes est reliée à plusieurs seuils établis en fonction du niveau d'eau atteint par rapport au pied et au sommet de la dune. La prise en compte du jet de rive est primordiale. Actuellement, parmi les formules empiriques c'est celle de Stockdon et al. (2006) qui est la plus couramment utilisée pour estimer l'altitude atteinte par le jet de rive (runup) sur les côtes sableuses (en absence d'ouvrages de défense).

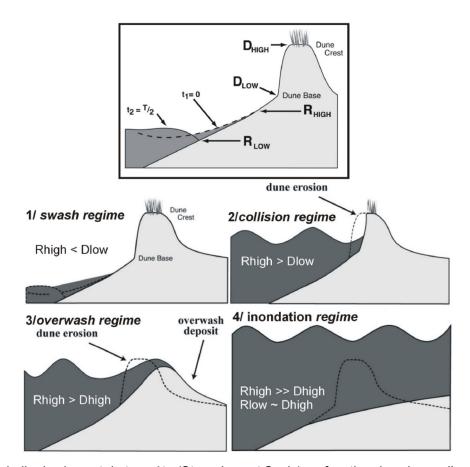


Figure 3 : Echelle des impact de tempête (Storm Impact Scale) en fonction des niveau d'eau et de la morphologie de la côte, Gervais (2012) d'après Sallenger (2000).

Quatre régimes liés au niveau d'eau des vagues de tempête sont définis en fonction des seuils :

• Le régime de jet de rive (swash regime, Figure 3)

Le premier seuil est atteint lorsque le niveau maximal du jet de rive (Rhigh) dépasse le pied de dune (DLow). Sous ce seuil, Sallenger (2000) définit des conditions de tempête en « régime de jet de rive ». L'érosion provoquée sur la plage est typique de tempêtes hivernales classiques. Le système a la capacité de se reconstruire rapidement lors de conditions de vagues faibles. La dune n'est pas attaquée.

• le régime de collision (collision regime, Figure 3)

Lorsque le jet de rive atteint le pied de dune et tant que le niveau maximal du jet de rive ne dépasse pas le sommet de dune, on entre dans le « régime de collision ». A ce stade, la base de la dune est érodée. Le sable peut être transporté hors du système, vers le large ou par la dérive littorale.

le régime de franchissement par paquets de mer (overwash regime, Figure 3)

Lorsque le niveau maximal du jet de rive dépasse le sommet de la dune, il s'agit du régime de franchissement par paquets de mer. Dans ces conditions, des volumes d'eau peuvent se propager à terre à plus de 2m/s avant de ralentir progressivement. Ces phénomènes provoquent une forte érosion de la dune et des dépôts à terre, en plus des processus du régime de collision. Sallenger (2000) fait remarquer que ces évènements sont peu fréquents sur les

dunes hautes et bien formée (Duck, NC) alors qu'ils sont beaucoup plus fréquents sur le cordon peu élevé des lles Barrières en Louisiane.

• Le régime d'inondation (inondation regime, Figure 3)

Le régime d'inondation (ou débordement) apparait lorsque le niveau minimum de la nappe de retrait atteint celui du sommet de la dune. Ce seuil signifie que l'ensemble de la dune est continuellement sous l'eau. Elle est alors soumise au processus du déferlement des vagues, mais les auteurs précisent que les observations de ces évènements sont rares et les conséquences mal comprises. Ils ont toutefois été observés et modélisés au niveau des Boucholeurs (marais d'Yves, au sud de la Rochelle, voir paragraphe 4.2) lors de la tempête Xynthia (Muller et al. 2016).

L'étude de Sallenger (2000) permet d'appréhender simplement le lien fort entre le niveau d'eau sur la plage et la dune, les processus hydrodynamiques et le potentiel érosif d'une tempête.

3. Détermination de la submersion marine

La détermination de la submersion marine dépendra des caractéristiques morphologiques de la bande littorale. Quatre cas peuvent se présenter (Figure 4) :

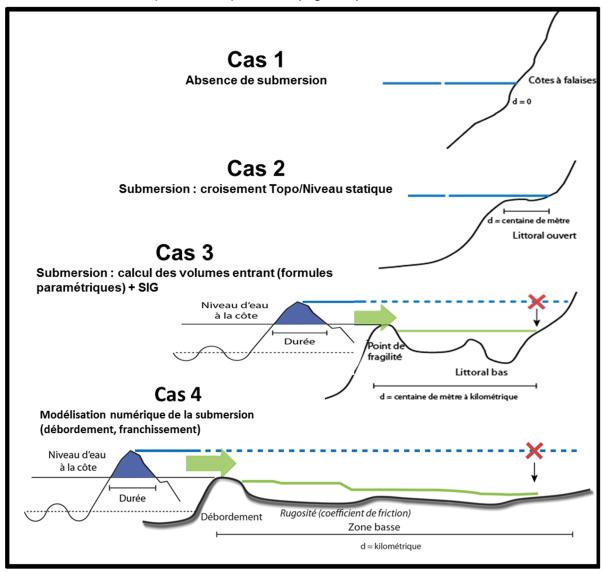


Figure 4: Méthodes de calculs de la submersion (source BRGM).

- Cas 1: pour les côtes à falaise hautes, le calcul de la submersion n'est pas nécessaire.
- Cas 2: sur les littoraux caractérisés par la présence en arrière-plage d'un relief (cordon dunaire par exemple) à proximité (échelle de la centaine de mètres), il est possible de déterminer la submersion marine en croisant le niveau d'eau statique de référence avec la topographie. L'hypothèse est ici faite que le volume d'eau entrant est « infini ». Cette méthode topo/niveau est mise en œuvre systématiquement dans le cadre des PPRL submersion marine. En fonction du site étudié, elle peut s'avérer insuffisante pour la cartographie réaliste de la submersion. Elle constitue alors une

première étape d'analyse de la submersion marine qui doit être complétée par des méthodes plus complexes (voir ci-après).

- Cas 3: la méthode topo/niveau est inadaptée en cas de submersion par franchissement par paquets de mer, par défaillance des structures de protection, ou bien par débordement lorsque le relief est situé à quelques centaines de mètres voire le kilomètre de l'arrière plage. En effet les volumes d'eau entrant sont alors en réalité insuffisants pour remplir la dépression en arrière-plage. Le niveau du plan d'eau à terre est alors inférieur au niveau maximal du plan d'eau à la côte. Dans ce cas de figure, il est possible de calculer les volumes d'eau entrant pendant une durée donnée par débordement ou franchissement grâce à des formules empiriques et de les répartir en arrière-côte grâce à des méthodes SIG pour délimiter les zones submergées. Ciaprès la méthode « volume/SIG » est illustrée en ce qui concerne la submersion par débordement :

Une des relations les plus utilisées pour estimer les volumes d'eau déversés par débordement correspond à la formule de seuil large en régime dénoyé, qui permet d'estimer un débit débordant :

$$Q = \mu C_v L(h_1)^{3/2} \sqrt{2g}$$

h1 : Différence entre le niveau marin et l'altitude du rivage

L : Longueur du tronçon de débordement

μ : coefficient de débit (pris = 0.4)

Cv : Coefficient de vitesse (pris = 1)

La construction d'un abaque « cote altimétrique/volume » spécifique à la zone étudiée permet ensuite d'estimer l'extension de la submersion ainsi que les hauteurs d'eau en fonction du volume d'eau entrant calculé précédement (Figure 5).

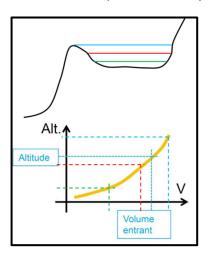


Figure 5 : Construction de l'abaque «cote altimétrique / volume » (source BRGM).

- Cas 4: pour des sites de topographies basses et complexes comme les zones de marais, polders ou certains estuaires, la complexité des processus de submersion par débordement ou par franchissements de paquets de mer (obstacles multiples, frottements différenciés ou encore rencontre de flux marins et continentaux) contraignent à procéder à une modélisation numérique de la submersion. La méthode « volume/SIG » ne peut pas être appliquée de façon réaliste.

Ci-après nous détaillons et illustrons les différentes approches de la modélisation de la submersion marine en commençant par une description des données utilisées.

3.1. DONNEES NECESSAIRES A LA MODELISATION DE LA SUBMERSION

Ce paragraphe présente les différentes données nécessaires à la modélisation de la submersion marine concernant la topo-bathymétrie, l'occupation des sols, les connexions hydrauliques, la prise en compte des défaillances de structures de protection et enfin les forçages à utiliser.

3.1.1. Données Topo-Bathymétriques

La simulation de la submersion marine nécessite de données topo-bathymétriques d'une bonne précision verticale (erreur altimétrique décimétrique) et d'une haute résolution spatiale (métrique à décamétrique) afin de bien représenter la géométrie des obstacles (ouvrages de défense côtiers, murets, etc.) et des vecteurs (canaux, voies d'eau, etc.) aux écoulements. C'est le cas des données issues des levés LIDAR (Light Detection And Ranging) et notamment des produits Litto3D© de l'IGN-SHOM pour les côtes françaises (ou RGE-Alti de l'IGN, qui ne comporte que la partie topographique).

Il est important de souligner qu'il est inapproprié de réaliser des modélisations numériques de la submersion en se basant sur des données de faible résolution spatiale et/ou précision verticale (erreur métrique par exemple) incapables de reproduire les obstacles et vecteurs aux écoulements. Les résultats obtenus seraient alors complétement erronés.

MNT : Modèle Numérique de Terrain

Un des produits Litto3D© utilisé en modélisation concerne les MNT (Modèles Numériques de Terrain) correspondant à la topo-bathymétrie de la frange littorale décrite suivant grille régulière de points (mailles carrées de 1 m de côté) dont l'altitude est connue avec une précision meilleure que 0,20 m. En France métropolitaine, les coordonnées de ces MNT sont exprimées suivant le système de projection planimétrique Lambert 93 et la référence altimétrique IGN 1969. Ces données ne couvrent pas, à l'heure actuelle, l'ensemble des côtes françaises (voir les emprises disponibles sur le site http://data.shom.fr/donnees/catalogue). Elles sont bien présentes en Languedoc-Roussillon.

Ces MNT Litto3D© nécessitent des traitements spécifiques avant d'être utilisés dans la modélisation de la submersion. Ces traitements concernent :

Filtrage du « bruit » de la donnée : lorsque des transects du MNT sont réalisés sur secteurs plats comme des routes par exemple (voir Figure 6), on constate des variations de l'altitude 0,1 m à 0,2 m sur de courtes distances (inférieures à 5 m). Cet effet « nid de poule » est artificiel. Une des méthodes qui peut être utilisée pour corriger cet artefact concerne l'application d'un lissage de la donnée suivant une moyenne glissante sur 3 à 5 mailles.

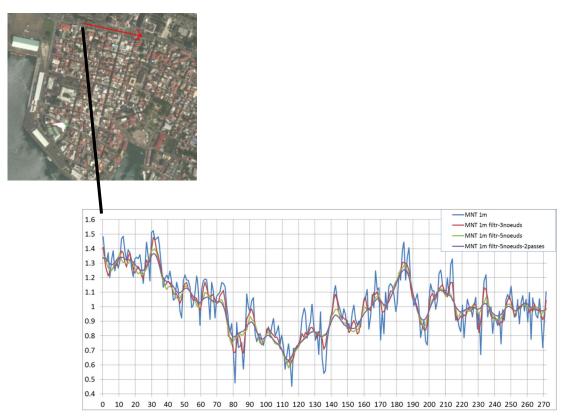


Figure 6 : Exemple de résultat du lissage des données Litto3D sur un transect le long d'une route en Guadeloupe (abscisse, distance en m ; ordonnée altitude en m/IGN88). Source BRGM. Pedreros et al. 2016

- Incorporation de données D-GPS de précision : le bord de mer est souvent parcouru d'ouvrages de défense ou promenades couronnés de murets de faible épaisseur (inférieure à 1 m) dont le rôle peut-être crucial dans le contrôle des débordements et/ou franchissements d'eau. Le MNT Litto3D, du fait de sa de résolution spatiale de 1 m, ne permet pas de reproduire correctement ce type d'ouvrage et notamment l'altitude de la crête. En fonction de la précision recherchée dans la modélisation de la submersion et de la finalité, il pourra donc être nécessaire de faire appel à des levés D-GPS de haute précision de ces ouvrages et les intégrer au MNT.
- Intégration d'autres sources de données topo-bathymétriques: le MNT Litto3D présente des lacunes en ce qui concerne les surfaces en eau intérieures (rivières et étangs par exemple), des milieux très turbides ou des zones de déferlement des vagues peu profonds (récifs par exemple). De plus, les données Litto3D ne concernent pas, en général, les profondeurs supérieures à 10 m. Il est donc nécessaire de compléter le MNT Litto3D avec d'autres sources de données ce qui nécessite du temps pour leur collecte, leur calage (notamment la référence altimétrique) et leur fusion avec le MNT qui servira à la modélisation de la submersion.
- Le ré-échantillonnage du MNT haute résolution : il est parfois nécessaire de simuler la submersion marine sur de grands domaines spatiaux (plusieurs milliers de km²). Dans ce cas, il n'est pas possible de réaliser des simulations numériques à la résolution initiale du MNT à 1 m du fait du temps de calcul prohibitif. Il est donc nécessaire de simplifier la topo-bathymétrie avec un ré-échantillonnage du MNT à des mailles

décamétriques tout en conservant les éléments structurants (digues, routes, quais, remblais routiers, levées, etc.). Cela nécessite 4 étapes principales :

- o ré-échantillonnage du MNT à une résolution décamétrique (voir ligne rouge Figure 7)
- identification des éléments structurants grâce à des bases de données comme la BDTopo de l'IGN, des ouvrages côtiers (si disponible) et un travail manuel de digitalisation
- o extraction depuis le MNT-1m ou de levés D-GPS des altitudes de ces éléments
- o correction du MNT décamétrique pour le respect de la cote de ces ouvrages structurants (voir ligne verte Figure 7)

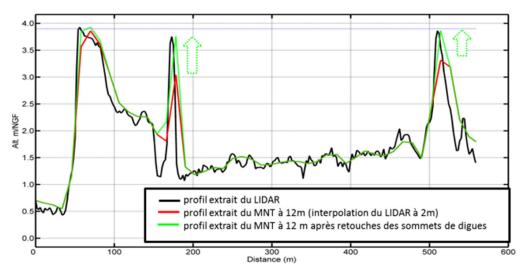


Figure 7 : Illustration en coupe de la correction d'un modele numérique de terrain 12 m (ici exemple pour trois rangs de digues), source BRGM.

La Figure 8 illustre les principales étapes (compilation des données topo-bathymétriques, extraction des éléments structurants pour la « retouche » des altitudes) de la construction d'un MNT de maille régulière de 20 m de la Camargue adapté à la simulation de la submersion marine.

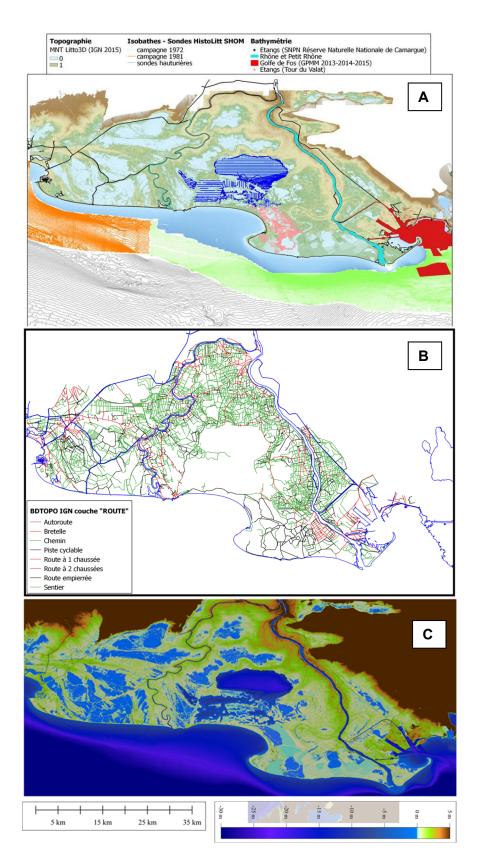


Figure 8 : Exemple de construction d'un MNT de résolution décamétrique de la Camargue. A : Compilation des données Topo-Bathymétriques ; B : éléments linéaires structurants issus de la BDtopo©IGN ; C : MNT final. Source BRGM, Paris et al. 2015.

MNE : Modèle Numérique d'Elévation - prise en compte du bâti

En milieu urbain, la présence d'aménagements et de bâtiments plus ou moins denses conduit à la canalisation des flux. Les conséquences éventuelles correspondent à des accumulations d'eau contre les bâtiments (notamment pour les écoulements à haute énergie : tsunamis, rupture d'une digue...), provoquant un ralentissement global de la propagation de l'inondation, avec des flux localement accélérés dans les rues. La présence de murs et murets conduit à des effets similaires, avec parfois des effets de seuil lorsque le niveau d'eau atteint le sommet du mur. La prise en compte du bâti est donc cruciale lorsque l'on veut réaliser des simulations réalistes de submersion en milieu urbain.

La façon la plus courante de prendre en compte explicitement le bâti, c'est-à-dire suivant une représentation individuelle des bâtiments, murs et autres obstacles, consiste à l'intégrer directement dans le MNT sous forme de « blocs imperméables ». Cette approche permet une représentation correcte des écoulements autour du bâtiment, elle ne permet toutefois pas de prendre en compte l'éventuel « stockage » d'eau à l'intérieur du bâtiment (Le Roy et al. 2013).

Le MNT auquel on ajoute cette couche de sursol « bâti » constitue un MNE (Modèle Numérique d'Elévation). Afin de bien représenter la géométrie du bâti, la résolution spatiale du MNE doit être très fine (mailles sub-métriques à métriques). Fewtrell *et al.* (2011) se sont particulièrement intéressés à l'influence de cette résolution spatiale sur les écoulements. Ils ont utilisé un même code pour simuler une inondation fluviale avec une représentation des bâtiments selon plusieurs résolutions (0,5 m, 1 m, 2 m et 5 m, basées sur un levé LiDAR non aéroporté) ; ils sont finalement arrivés à la conclusion que pour le site étudié et pour le code utilisé, les différences étaient acceptables pour des simulations à 0,5 m, 1 m et 2 m, mais devenaient trop importantes à 5 m. Ces valeurs restent toutefois dépendantes de la configuration du site étudié.

Il est à noter que les MNE adaptés au calcul de la submersion marine n'existent pas. Il faut donc les construire en exploitant notamment les produits issus du Litto3D© ou bien du LiDAR terrestre (exemple RGE ALTI© de l'IGN). Un exemple des principales étapes possibles de cette construction est représenté Figure 9 :

- Un premier MNE représente l'information « brute » relevée par le LiDAR. Il intègre à la fois les caractéristiques du sol et de tout ce qui le recouvre (arbres et végétation, bâti, mais aussi véhicules, aménagements temporaires...). Il est possible d'extraire les bâtiments de cette donnée « brute » en utilisant les couches du bâti disponibles dans les bases de données disponibles (BDTopo© de l'IGN, cadastre, etc..).
- Cette couche extraite contenant le bâti peut alors être fusionnée avec le MNT Litto3D. La nouvelle surface ainsi créée représente donc uniquement le sol et les bâtiments (comme des blocs imperméables).
- Ensuite les obstacles susceptibles d'interagir avec les écoulements lors de la submersion (notamment les murs et murets) sont si nécessaire extraits manuellement car ils ne sont pas présents dans les bases de données.

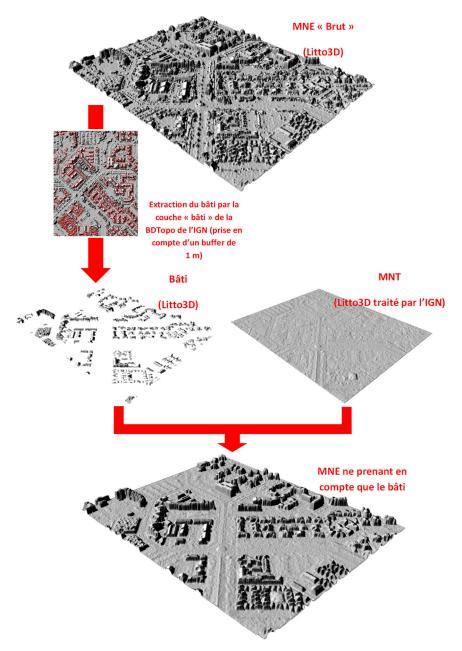


Figure 9 : Schéma de principe du traitement du produit Litto3D pour constituer un MNE permettant des simulations d'inondation (source BRGM Le Roy et al., 2012)

3.1.2. Occupation du sol – MNF (Modèle Numérique de Frottement)

La propagation de la submersion marine est conditionnée par l'occupation du sol. L'impact de l'occupation du sol sur les écoulements est habituellement représenté dans les modèles via un paramètre de frottement caractéristique de la rugosité de chaque type de sol (béton, pelouse, sable,...). La rugosité est généralement paramétrée en termes de coefficients de Manning ou de Strickler (inverse du coefficient de Manning) ; une liste de coefficients de Manning associés aux types de sols est présentée Figure 10.

MS-GAP class	Description	Manning n
1	Agriculture	0.060
2	Freshwater	0.025
3	Aquaculture	0.045
4	Estuarine water	0.025
6	Farmed wetlands	0.035
7	Estuarine emergent	0.050
8	Estuarine woody	0.060
9	Palustrine emergent	0.055
10	Bottomland hardwood	0.140
11	Riverine swamp	0.060
12	Pine savannah	0.160
13	Freshwater shrub/scrub	0.070
14	Palustrine nonvegetated	0.030
15	Transportation	0.032
16	High density urban	0.150
24	Urban freshwater	0.025
25	Wet soil/water/shadow	0.040
26	Urban pine	0.180
27	Urban hardwood	0.160
28	Urban low herbaceous	0.070
29	Urban grassy/pasture	0.035
30	Bare urban I	0.120
31	Bare urban II	0.120
32	Clear cuts	0.036
50	Low-density pine	0.160
51	Medium-density pine	0.180
52	High-density pine	0.200
53	Medium-density hardwood	0.170
54	High-density hardwood	0.170
55	Mixed forest	0.160
56	Recent harvest	0.052
57	Cypress/tupelo	0.180
60	Agriculture (see class No. 1)	0.060
61	Grassy/pasture/range	0.042
62	Low herbaceous vegetation	0.047
63	Evergreen shrub	0.080
71	Wetland	0.045
80	Bare	0.030
81	Sand bar/beach	0.030

Figure 10 : Coefficients de Manning (en s.m^{-1/3}) associés aux types de sol. Source : Bunya et al. (2010).

Il existe plusieurs bases de données nationales proposant des éléments de cartographie de l'occupation du sol (OCS) comme la BD Topo © IGN, la base de données Cartage © IGN et Corine Land Cover – CLC (coordonnée par l'Agence Européenne pour l'Environnement) ainsi que des données plus locales issues des syndicats mixtes par exemple (Figure 11).

Les typologies proposées par ces OCS sont trop détaillées et doivent être simplifiées pour leur exploitation dans la modélisation de la submersion marine comme illustré Tableau 1.

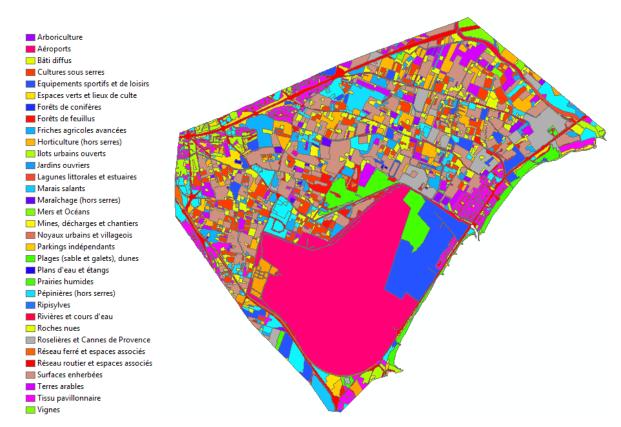


Figure 11 : Carte d'occupation du sol sur la plaine du Ceinturon fournie par le Syndicat Mixte du SCoT PM.

Typologie brute Occupation du sol	Typologie simplifiée	Typologie brute Occupation du sol	Typologie simplifiée
Aéroports	Béton, asphalte Prairies Urbain dense	Plages (sable et galets), dunes	Sol faiblement rugueux
Parkings indépendants		Roches nues	
Places	Béton, asphalte	Chantiers	C-1
Réseau routier et espaces associés		Réseau ferré et espaces associés	Sol moyennement rugueux
Cultures sous serres		Coupes forestières	
Espaces non bâtis en milieu urbanisé		Décharges	Sol fortement rugueux
Friches agricoles avancées		Présence d'habitations ou constructions précaires	
Grandes cultures		Lagunes littorales et estuaires	
Horticulture (hors serres)	Champs	Marais salants	Surface en eau
Jardins ouvriers		Plans d'eau et étangs	<u> </u>
Maraîchage (hors serres)		Bâti individuel compact	
Roselières et Cannes de Provence		Espaces industriels	
Surfaces fourragères		Ilôts urbains semi-ouverts	
Forêts de conifères		llots urbains ouverts	Urbain dense
Forêts de feuillus	Forêt dense	Infrastructures de gestion de l'eau	
Ripisylves		Noyaux urbains et villageois (îlots fermés)	
Autres vergers (dont figuiers)		Zones commerciales	
Oliveraies		Bâti diffus en espace agricole (+ hangars)	
Pépinières (hors serres)	Forêt éparse	Bâti individuel aéré	
Vignes		Equipements collectifs	
Végétation arbustive en mutation		Equipements sportifs et de loisirs	Urbain éparse
Bandes enherbées		Espaces d'activités économiques	
Parcs verts urbains	Prairie	Zones militaires	
Prairies humides	Prairie	Zones portuaires	
Prairies naturelles mésophiles			

Tableau 1 : Typologie simplifiée de l'occupation du sol et regroupement des caissons de la carte d'occupation du sol du SCoT PM (source BRGM, Le Roy et al. 2014).

Lorsque le domaine à étudier est très étendu, il n'est pas possible de descendre à une résolution spatiale suffisamment fine pour représenter individuellement les bâtiments, obstacles, rues, etc..., car cela engendrerait des temps de calculs trop importants. D'autre part, il se peut que l'on manque d'information sur le bâti (géométrie des bâtiments et des obstacles). Dans ces 2 cas, l'influence de la zone urbaine dans les écoulements peut être représentée d'une façon intégrée en lui attribuant une forte rugosité. La valeur de cette rugosité dépend généralement du taux d'urbanisation du secteur considéré comme le montre le Tableau 2.

Type d'occupation du sol	Manning associé (s.m ^{-1/3})
Zone résidentielle peu dense	0,1 – 0,2
Zone résidentielle de haute densité	0,2 – 0,5
Zone industrielle ou commerciale	0,2 - 0,5

Tableau 2 : Coefficients de Manning associés aux rugosités en zones urbaines (d'après Engineers Australia, 2012).

Ces données de la littérature (Figure 10 et Tableau 2 par exemple) permettent d'associer des coefficients de Manning à la typologie simplifiée comme le montre le Tableau 3.

Chaque maille du MNT ou du MNE peut alors se voir attribuer la valeur du coefficient de Manning pour constituer le MNF (Modèle Numérique de Frottement) comme le montre la Figure 12.

Typologie simplifiée	Coefficient de Manning (s/m ^{1/3})
Béton, asphalte	0.016
Prairie	0.04
Champs	0.05
Urbain dense	0.4
Urbain éparse	0.1
Forêt dense	0.1
Forêt éparse	0.04
Surface en eau	0.03
Sol fortement rugueux	0.07
Sol moyennement rugueux	0.045
Sol faiblement rugueux	0.03

Tableau 3 : Coefficients de Manning attribués en fonction de la typologie simplifiée d'occupation du sol (source BRGM, Le Roy et al. 2014).

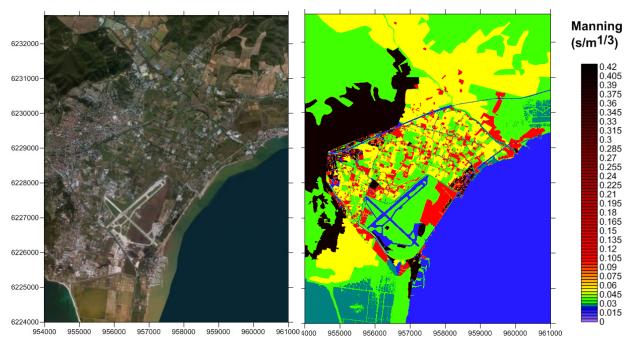


Figure 12 : Photographie satellite de la plaine du Ceinturon et carte des coefficients de Manning à une résolution de 5 m (source BRGM, Le Roy et al. 2014).

La méthode consistant à représenter les zones urbaines d'une façon intégrée en leur attribuant une forte rugosité est la plus utilisée aujourd'hui dans les simulations de submersion marine. Des exemples de ce type d'approche peuvent être consultés dans la littérature scientifique, par exemple : Bates *et al.* (2005) ; Gallien *et al.* (2011) ; Fortunato *et al.* (2013) ; Tibéri et Chassé, 2012, etc... Ces études montrent qu'il est possible d'obtenir de bons résultats concernant les limites de submersion. Le Roy *et al.* (2015) grâce à 2 simulations de franchissements, l'une considérant le bâti sous forme explicite (utilisation d'un MNE) et l'autre avec représentation de la zone urbaine avec un fort coefficient de Manning, indiquent :

- la bonne représentation de l'extension de la submersion ainsi que les cotes du plan d'eau calculées (Figure 13)
- toutefois, les vitesses ainsi calculées ne peuvent pas être considérées comme réalistes, car l'ensemble de l'écoulement à travers de la zone bâtie se trouve ralenti, sans que l'effet de canalisation dans les rues puisse être représenté.

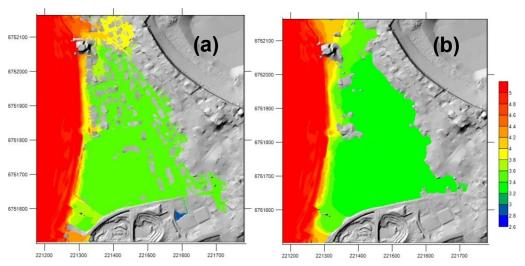


Figure 13 : Altitude maximale du plan d'eau (IGN69, m) au cours des simulations sur Gâvres sur MNE « avec bâti explicite » (a), et sur MNT « sans bâti » (Manning urbain). Source BRGM (Le Roy et al. 2015).

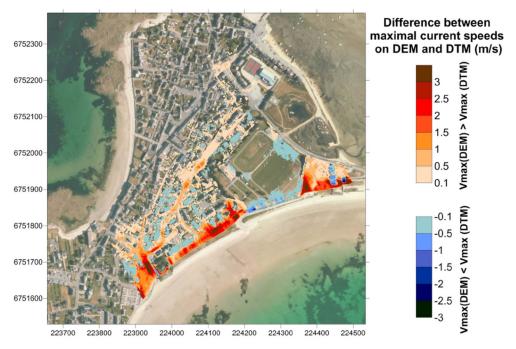


Figure 14 : Difference entre les vitesses des écoulements calculées avec un MNE (bâti explicite) et un MNT (Manning urbain). Source BRGM (Le Roy et al. 2015).

3.1.3. Prise en compte des singularités hydrauliques

La dynamique des écoulements peut être également modifiée par la présence d'ouvrages hydrauliques : pont cadre, écluse motorisée ou non, buse, canalisation avec ou sans clapet, etc... (voir Figure 15). Ces ouvrages hydrauliques peuvent avoir des dimensions inférieures à la maille du MNT ou MNE de référence, de plus les écoulements sont contraints par des relations spécifiques hauteur/pente/débit avec des écoulements qui ne se font pas toujours à surface libre. De ce fait, leur comportement ne peut pas être modélisé directement avec les modèles de submersion (écoulements à surface libre). Par contre ils peuvent être pris en compte sous la

forme de lois hydrauliques (paramétriques) spécifiques dans les modèles numériques. On distingue quatre régimes hydrauliques différents en fonction des caractéristiques géométriques des ouvrages (largeur, hauteur, section, cotes aux 2 extrémités), ainsi que des niveaux d'eau amont et aval : (1) seuil dénoyé ou (2) seuil noyé, (3) orifice dénoyé ou (4) orifice noyé (Figure 16).

La simulation réaliste de la submersion marine nécessite donc la localisation et la caractérisation (géométrie, fonctionnement) de ces ouvrages. Généralement les bases de données sur les ouvrages ne contiennent pas l'ensemble de ces informations. Il est donc nécessaire consacrer du temps pour la collecte des informations sur le terrain et auprès des opérateurs de ces ouvrages.



Figure 15 : Illustration des types d'ouvrages hydrauliques (écluses) pris en compte dans les modèles.

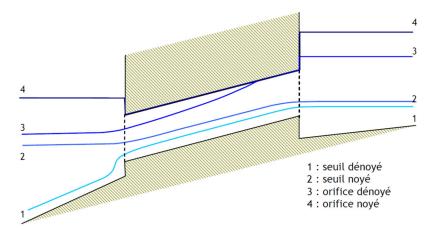


Figure 16 : Exemple de différentes conditions d'écoulement pris en compte dans les modélisations.

3.1.4. Prise en compte des défaillances ponctuelles (brèches) des structures de protection côtière

Les modèles de submersion ne permettent pas aujourd'hui de générer des brèches des structures de défense ou des dunes. Par contre, ils peuvent tenir compte de scénarios de brèche qu'on leur impose de la même manière que pour les connexions hydrauliques. Localement, les brèches sont prises en compte par l'utilisation des lois hydrauliques de seuils (régime seuil noyé ou dénoyé) permettant de calculer les débits transitant d'amont en aval de la brèche. La brèche est ainsi intégrée dans le maillage comme une singularité hydraulique, la topographie du MNT n'étant pas modifiée. La géométrie sur un plan horizontal de la brèche est simplifiée à une forme rectangulaire et de seuil variable dans le temps. Le seuil de la brèche s'affaisse progressivement depuis son altitude initiale (crête de l'ouvrage) jusqu'à la cote du seuil à l'état final, avec une cinétique caractérisée par une durée de rupture de la brèche.

3.1.5. Fonctionnement du site et calage/validation des modèles

La collecte des mesures et observations visuelles d'événements de submersion passés (extension de la zone inondée, hauteurs d'eau, vidéos, photos, etc.) est indispensable pour la compréhension du fonctionnement du site (processus de débordement/franchissement/défaillance ouvrages) et l'identification des paramètres clés à prendre en compte (par exemple vent et débit fluvial en plus des niveaux d'eau et des vagues) ainsi que pour le calage et la validation des modèles.

3.1.6. Données en entrée des modèles

Il est également nécessaire de compiler les données servant à forcer les modèles (caractéristiques des vagues, niveaux d'eau, vent, apports fluviaux, pluie, etc.). Les données seront de différents types en fonction de la finalité des modélisations :

- reconstitution d'événements passés: chroniques de niveaux d'eau, vagues voire vent/pluie/débits fluviaux issues de mesures (par exemple réseau marégraphique national pour les niveaux¹ et CANDHIS² pour les vagues, etc...) et/ou d'autres modélisations numériques (ré-analyses: par exemple BOBWA³ ou ANEMOC⁴ pour les vagues) à proximité du secteur étudié;
- prévention : caractéristiques décennales/centennales/milléniales des paramètres d'entrée (probabilités mono-variées ou conjointes), hypothèses de défaillance des ouvrages et d'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique;
- prévision: utilisation de données de prévisions régionales/locales météorologiques (champs de vent et pression), de niveau d'eaux et de vagues (voir par exemple les produits issus du SHOM et METEO-FRANCE⁵ ou bien d'IFREMER⁶).

¹ http://data.shom.fr/donnees/refmar

² http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/carte/

³ http://bobwa.brgm.fr

⁴ http://anemoc.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/

⁵ http://data.shom.fr/donnees/catalogue/oceano

⁶ https://marc.ifremer.fr/

3.2. MODELISATION DE LA SUBMERSION MARINE

Les différentes données décrites précédemment vont servir à la définition de la stratégie de modélisation, l'implantation de(s) modèle(s) et la(es) validation(s).

Ci-après nous présentons les différentes méthodes de modélisation de la submersion marine par débordement et/ou franchissements par paquets de mer mises en place par le BRGM ainsi que des exemples d'application.

3.2.1. Modélisation de la submersion marine par débordement

La stratégie de modélisation de la submersion par débordement est décrite Figure 17. Elle se base sur le couplage de codes de vagues spectraux (simulation de l'état de mer) avec un code hydrodynamique de niveaux et courants (décrits brièvement dans le paragraphe suivant). Ce couplage permet de calculer dans l'espace et dans le temps l'évolution des niveaux moyens du plan d'eau et des courants générés par les effets de la marée, de la surcote atmosphérique et des vagues (wave setup) à proximité du rivage et de propager ensuite les écoulements à terre (calcul des hauteurs d'eau et des vitesses).

Il existe plusieurs variantes à ce couplage décrites ci-après allant de la plus complète à la plus simplifiée :

- <u>couplage complet</u>: les champs météo (vent et pression), les caractéristiques de la marée et les résultats issus du modèle de vague spectral (hauteur, période, tensions de radiation, etc.) sont injectés dans le code hydrodynamique. C'est ce dernier qui calculera les différentes composantes du niveau moyen (marée, surcote atmosphérique et wave setup), les courants (liés à la marée, au vent et aux vagues) ainsi que la propagation de la submersion à terre. Ce calcul complet permet donc de tenir compte des interactions vagues-niveaux-courants;
- couplage simplifié: le modèle hydrodynamique est forcé par les champs météo, la marée et par le wave setup qui est directement calculé par le modèle de vague spectral. Le niveau moyen (marée, surcote atmosphérique et wave setup) est bien calculé mais sans tenir compte des interactions avec les courants. A noter également que les courants générés par les vagues ne peuvent pas être simulés avec cette configuration;
- <u>couplage paramétrique</u>: cette fois-ci on ne fait pas appel à la modélisation pour le calcul du setup mais à des formules paramétriques comme celle de Stockdon *et al.* (2006). Celle-ci prend 2 formulations en fonction du nombre d'Irribarren : $\varepsilon = \frac{\tan(\beta)}{\text{Hs } L_0}$

setup =
$$0.35\beta$$
 Hs L_0 si $\varepsilon > 0.3$ ou setup = 0.016 Hs L_0 si $\varepsilon < 0.3$

 β correspondant à la pente de la plage, Hs la hauteur significative des vagues (en eau profonde) et L_0 à la longueur d'onde des vagues.

Le modèle hydrodynamique intègre alors ce forçage ainsi que la marée et la météo pour propager les niveaux d'eau à proximité du rivage et à terre. Il est à remarquer que cette configuration est valable uniquement dans des contextes particuliers, comme l'étude de la submersion par débordement sur des emprises spatiales réduites ou bien des secteurs plus étendus mais présentant un wave setup relativement homogène.

Ce type de modélisation de la submersion par débordement présente aujourd'hui un degré de maturité élevé. Il peut être appliqué sur des emprises spatiales allant jusqu'à quelques milliers de km², pour des durées de plusieurs jours tout en tenant compte de l'occupation du sol, du comportement des ouvrages hydrauliques et des éventuelles défaillances des structures de défense côtière. De plus, d'autres phénomènes peuvent être intégrés à la modélisation de la submersion comme l'apport en eau douce des fleuves et/ou de la pluie.

Propagation écoulements Hydrodynamique domaine terrestre Forçages : météo-(Modèles Saint-Venant) Séries temporelles de niveaux et courants Chainage Couplage marin moyens **Emprise spatiale** Km – 100 km Durée **Jours** Frottement hétérogène Oui Singularités hydrauliques Oui Scénario de défaillance Oui **Vagues** Débit fluvial-Autres (Modèles spectraux) Pluie

Modélisation submersion par débordement

Figure 17 : Schématisation de la stratégie de la modélisation de la submersion par débordement.

Nous indiquons ci-après les principaux codes utilisés pour ce type de couplage hydrodynamique/vagues et décrivons rapidement ceux utilisés au BRGM. Enfin, sont présentés des exemples d'application concernant la modélisation numérique de la submersion par débordement réalisés au BRGM.

Brève description des codes de calcul utilisés

Il existe à ce jour plusieurs plateformes de modélisations capables de réaliser le « couplage complet » décrit précédemment. Parmi les plus utilisées, nous pouvons citer :

- les codes industriels Open Source comme la chaîne OPENTELEMAC (http://www.opentelemac.org) avec TELEMAC 2DH pour l'hydrodynamique et TOMAWAC pour les vagues spectrales très utilisé en France et en Europe ainsi que DELFT3D développé au Pays-Bas par Deltares très utilisé en Europe et dans le monde (https://oss.deltares.nl/web/delft3d/home, comprenant notamment le code spectral SWAN, voir plus bas)
- le code industriel commercial **MIKE 21** (http://www.mikepoweredbydhi.com/): très utilisé en Europe et quelques applications en France
- les codes de recherche : **ADCIRC/SWAN** (http://adcirc.org/tag/adcircswan) utilisé principalement sur les côtes des Etats-Unis et en contexte cyclonique et

SCHISM 2DH/WWM (http://ccrm.vims.edu/schismweb/) avec des applications sur les côtes atlantiques françaises (Bertin *et al.* 2015).

Ces différents codes utilisent des MNT avec des maillages structurés (rectangles ou carrés) ou non structurés (principalement des triangles). Le point le plus important pour le MNT concerne la longueur des mailles (résolution) qui doit être métrique à décamétrique et doit respecter la géométrie des obstacles et vecteurs aux écoulements (voir §3.1.1-MNT).

Les couplages utilisés au BRGM font appel au modèle MARS-2DH avec les codes spectraux SWAN ou WW3. Ils sont décrits ci-dessous :

MARS-2DH : modèle hydrodynamique de niveaux et courants

Le code de calcul MARS développé par l'IFREMER (Lazure et Dumas, 2008) permet de calculer l'hydrodynamique (niveaux et courants) au niveau régional et local à partir de composantes de marée et de données de météorologie. Les processus représentés par le modèle sont uniquement liés aux ondes longues (marée et surcote atmosphérique), les ondes courtes (houles, clapot) ne sont pas représentées, d'où le besoin d'un couplage avec un code de vague. Le modèle est utilisé dans sa version 2DH.

MARS-2DH calcule donc la vitesse et la direction de courants moyennés sur la verticale, ainsi que les hauteurs d'eau. Ces grandeurs sont calculées en fonction :

- de conditions aux limites imposées au bord du domaine de calcul (frontières). Ces conditions aux limites peuvent contenir les effets de la marée et de la surcote atmosphérique;
- de conditions de forçages météorologiques (vent et pression) appliquées en chaque nœud du domaine du modèle.

Pour la modélisation de la submersion par débordement plus particulièrement, MARS-2DH peut prendre en compte :

- la gestion des bancs découvrant (recouvrement/découvrement du sol par l'eau);
- le frottement spatialisé sur le fond (prise en compte des MNF).

Par ailleurs, le BRGM a développé dans MARS-2DH des routines pour le couplage avec les codes SWAN et WW3, et d'autres spécifiques à la propagation des submersions capables de :

- simuler les écoulements torrentiels faisant suite à des ruptures de digue ou dunes avec formation de brèches ;
- prendre en compte le fonctionnement des structures hydrauliques (singularités de type buses, seuils hydrauliques, écluses) par le biais de lois hydrauliques intégrées dans le modèle :
- considérer les débits entrants suite à des franchissements de paquets de mer
- de prendre en compte la pluie afin de simuler le ruissellement à terre.

SWAN : modèle spectral de génération et de propagation de vagues

Le modèle SWAN (Simulating WAves Nearshore), développé à l'Université de Technologie de Delft (Pays-Bas), permet de calculer les paramètres décrivant les vagues au niveau des zones côtières, des lacs et des estuaires en résolvant l'équation de conservation de la densité d'action des vagues. Une description détaillée du modèle est faite dans Booij *et al.* (2004).

SWAN modélise les processus de propagation suivants :

- Propagation à travers un espace géographique et gonflement de la houle ;
- Réfraction due à des variations spatiales du fond ou des courants ;
- Diffraction;
- Blocage ou réflexion par des courants de retour ;
- Transmission à travers des obstacles, blocage ou réflexion.

SWAN modélise également les processus de génération et de dissipation :

- Génération par le vent ;
- Interactions houle houle (quadruplets et triplets);
- Dissipation par moutonnement;
- Dissipation par déferlement dû aux variations de profondeur ou aux courants ;
- Dissipation par frottement au fond.

Il présente également l'avantage de pouvoir calculer directement le wave setup ce qui permet un « couplage simplifié » avec MARS-2DH.

WW3 : modèle spectral de génération et de propagation des vagues

Le code WW3 (Tolman 2009) résout l'équation de conservation de la densité d'action des vagues suivant des grilles de calculs structurées (différences finies) ou non structurées (éléments finis). Il est capable de reproduire les différents processus liés aux vagues depuis le large jusqu'au rivage comme la génération par le vent, la propagation dans l'espace (réfraction, interactions avec les courants, ...) et la dissipation (frottement au fond, déferlement, etc...).

Le bon fonctionnement des grilles de calcul non-structurées permet à WW3 des applications sur des domaines de grandes dimensions (linéaire côtier de plusieurs centaines de km) : le secteur proche du rivage est alors maillé à des résolutions fines de 10 à 20 m de façon à bien résoudre la zone de déferlement (et donc le setup local) et les zones plus au large selon une résolution plus grossière (centaine de mètres à plusieurs kilomètres) suffisante pour la génération et la propagation des vagues.

Exemples d'application

Deux cas d'application sont présentés ci-dessous illustrant la modélisation numérique de la submersion par débordement selon un :

- couplage simplifié : Secteur des Boucholeurs
- et un couplage complet : Camargue

Couplage simplifié : secteurs des Boucholeurs

Le Tableau 4 contient les principales informations concernant les simulations par débordement sur le secteur des Boucholeurs qui se situe au sud de la Rochelle.

L'implantation du modèle se trouve facilitée par la faible emprise spatiale : rapide identification des singularités hydrauliques et construction du MNF et du MNT 25 m avec conservation des altitudes des crêtes des ouvrages (retouches manuelles à partir du MNT RGE©ALTI de 1 m).

Les résultats de la simulation de la submersion lors de la tempête Xynthia en février 2010 montrent une bonne reproduction des laisses de mer générées par le débordement lorsqu'on les compare aux observations de terrain (Figure 18).

Ce modèle de faible résolution et emprise spatiale a été construit de façon reproduire correctement l'étendue et les hauteurs d'eau de la submersion en un temps de calcul très faible autorisant de très nombreuses simulations. L'objectif à terme est de déterminer les périodes de retour des hauteurs d'eau à terre à partir d'une analyse statistique des résultats de milliers de scénarios combinant des caractéristiques de vagues et des niveaux d'eau ainsi que des hypothèses de défaillance des ouvrages de protection.

Topo/Bathymétriques Lidar terrestre RGE©ALTI 1m de résoluti			
	sondes SHOM Histolitt		
Occupation du sol	Corinne Land Cover		
Companies au con			
Connexions Orthophotos + terrain			
hydrauliques			
Observations lors de la te	mpête Xynthia (hauteurs d'eau et laisses de mer)		
Opportunition for do la to	impote Atymina (mateure a caa et lalecce de mei)		
Chroniques des niveaux d'eau et des vagues issues de l'étude de Pedreros et			
1 4110 2012.			
Emprise de ~36 km², MNT et MNF de 280 x 280 mailles de 25 m de			
résolution. Pour le MNT-25 m, retouches manuelles des crêtes des ouvrages à partir du MNT 1m.			
MARS-2DH – 4 minutes pour simuler 24 heures (calcul parallélisé, utilisation de 48 processeurs)			
,			
	ur établir les périodes de retour de la submersion à		
partir de milliers de scénarios combinant des niveaux d'eau, des vagues et d'hypothèses de défaillance des ouvrages de protection			
a je a rooto do do do didinari	22 222 222g00 do protocaci.		
Projet R&D BRGM			
Simple : domaine de faible emprise spatiale (construction rapide du MNT),			
disponibilité des données pour la construction et la validation du modèle, prise en compte des brèches dunaires sous forme de scénarios			
	Occupation du sol Connexions hydrauliques Observations lors de la te Chroniques des niveaux of Paris 2012. Emprise de ~36 km², Norésolution. Pour le MNT-2 à partir du MNT 1m. MARS-2DH – 4 minutes de 48 processeurs) Prévention : méthode pour partir de milliers de scér d'hypothèses de défaillant Projet R&D BRGM Simple : domaine de fail disponibilité des données		

Tableau 4 : Principales caractéristiques des simulations de la submersion par débordement sur le secteur des Boucholeurs.

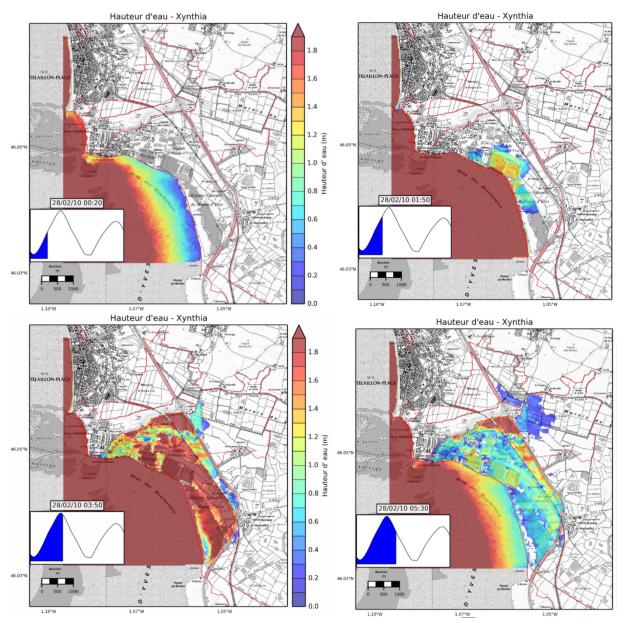


Figure 18 : Vues instantanées de la simulation de la submersion marine sur le secteur des Boucholeurs lors de la tempête Xynthia. Source Brgm.

Couplage complet niveaux/vagues : Camargue

La modélisation numérique mise en place en Camargue a pour objectif d'établir une cartographie de l'aléa submersion marine compatible avec les préconisations des PPRL et des TRI. L'emprise spatiale traitée étant très vaste (~5 800 km²), des difficultés ont été rencontrées dans toutes les phases de la modélisation (Tableau 5), depuis :

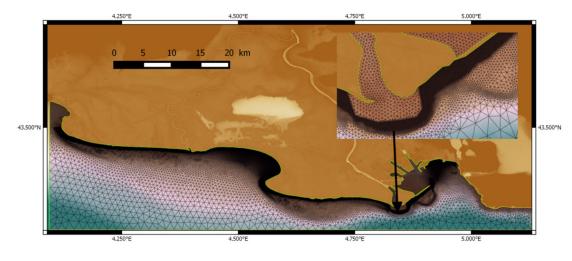
- la collecte des données : beaucoup de fournisseurs conduisant à une hétérogénéité des données ;
- la construction du MNT avec l'utilisation de plusieurs sources de données et domaine complexe avec plusieurs milliers d'éléments structurants (cf. Figure 8) et du MNF ;

- la phase de validation nécessitant la simulation de plusieurs événements passés pour traiter aussi bien les vagues (Figure 19) que la phase d'inondation (Figure 20) tenant compte de l'influence des débits fluviaux du Rhône et du Petit Rhône;
- la génération de scénarios de niveaux marins et vagues faisant appel à l'analyse en probabilités conjointes.

Bien que complexe, le modèle basé sur le couplage MARS-2DH/WW3 permet la simulation réaliste de la submersion marine avec des temps de calcul compatibles avec l'étude de scénario types PPRL et TRI.

	Topo/Bathymétriques	Sources multiples : Litto3D© 1 m+ sondes côtière SHOM Histolitt, bathymétrie des étangs, du golfe		
	Occupation du sol	de Fos, du Rhône et du Petit Rhône •Carte de l'occupation du sol 2011 du Parc Naturel Régional de Camargue •Carte de l'occupation du sol PACA 2006 du CRIGE-PACA •Carte de l'occupation du sol de la région Languedoc-Roussillon de 2006		
Données d'entrée	Connexions hydrauliques	Consultation auprès des gestionnaires (Parc Naturel de Camargue, Réserve Naturelle de Camargue, Conservatoire du Littoral, SYMADREM)		
	Éléments structurants	Couche Réseaux Routiers de la BDTOPO© IGN + retouches manuelles		
	Données marines et fluviales	Base de données de vagues (BRGM); mesures aux houlographes Espiguette et Camargue; données marégraphiques du Grau-de-la-dent (CETE); débits du Rhône (station de Beaucaire)		
Données de validation	Submersion : tempête de 1982 ; Vagues : tempêtes de 2000, 2003 et 2009			
Scénarios de forçage	Probabilités conjointes niveaux/vagues : périodes de retour fréquentes, moyennes et extrêmes associant également le vent (vitesse et direction) et un débit fluvial du Rhône de période de retour 2 ans (station de Beaucaire)			
Caractéristiques du domaine de calcul	Emprise de ~5 800 km², MNT et MNF de 2449 x 5899 mailles de 20 m de résolution. Pour le MNT-20 m, retouches manuelles des crêtes des ouvrages à partir du MNT 1m. WW3 : 511 000 éléments			
Codes utilisés-Temps de calcul	Couplage MARS-2DH/WW3 : environ 7 jours de calcul pour simuler 5 jours (calcul parallélisé, utilisation d'une centaine de processeurs)			
Objectif-exploitation	Prévention : cartographie de l'aléa submersion marine compatible avec les préconisations des PPRL et des TRI			
Cadre	Projet BRGM - DDTM13			
Mise en œuvre	Complexe à toutes les ph	ases de la mise en œuvre de la modélisation.		

Tableau 5 : Principales caractéristiques des simulations de la submersion par débordement en Camargue.



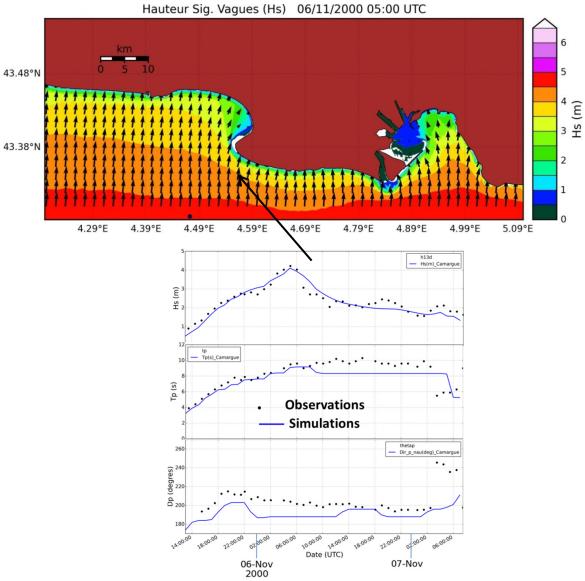


Figure 19 : Exemple de validation du modèle de vague WW3. En haut : maillage non structuré utilisé ; au milieu : caractéristiques du champ de vagues (Hauteur et direction) au pic de la tempête novembre 2000 ; en bas : comparaison des résultats des simulations et des observations à la bouée Camargue. Source BRGM, Paris et al. 2015.

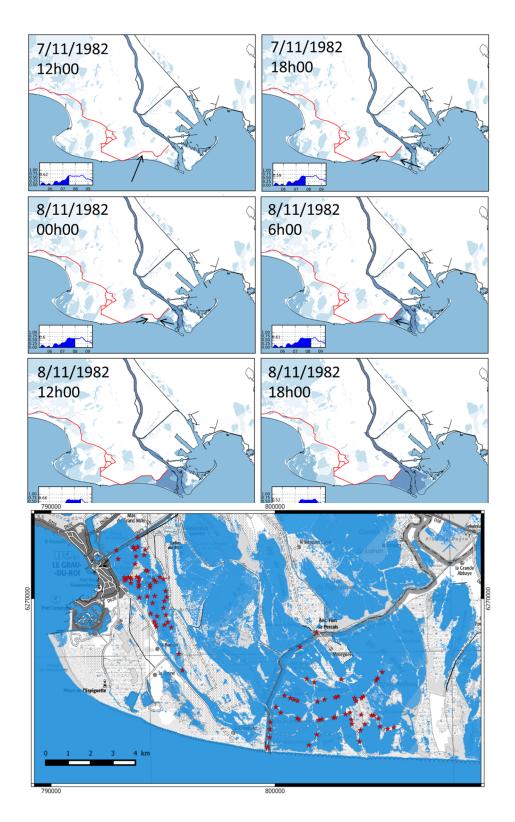


Figure 20 : Exemple de validation de la phase de submersion lors de la tempête de novembre 1982. Instantannées de la simulation et extension de la zone inondée modélisée (bleu) et localisation des observations ponctuelles (étoiles rouges) sur le secteur du Grau du Roi et la petite Camargue. Source BRGM, Paris et al. 2015.

3.2.2. Modélisation de la submersion marine par franchissements de paquets de mer

Nous présentons ici une stratégie de modélisation réaliste de la submersion marine par franchissements de paquets de mer. A noter qu'il existe également des méthodes simplifiées pour traiter les franchissements (§3.2.3).

Cette méthode réaliste se base sur l'utilisation de codes dit « vague-à-vague » (ou bien modèles instationnaires à résolution de phase) en 2DH voire en 3D (Figure 21). Ces codes utilisent des conditions de vagues spectrales et de niveaux d'eau issues de modèles côtiers ou bien de mesures. Un prétraitement permet de convertir ces informations en une chronique de niveaux d'eau instantanée, contenant les évolutions du niveau du plan d'eau au repos (marée + surcote atmosphérique) à laquelle on superpose l'effet de chacune de vagues (Figure 22), que l'on injecte dans le modèle vague-à-vague. Celui-ci va propager à la côte ces niveaux d'eau instantanés en résolvant l'hydrodynamique liée aux vagues (évolution du plan d'eau, calculs des courants engendrés par les vagues, interactions vague-vague et vague-courant), notamment dans la zone de jet-de-rive, et aux écoulements à terre.

Modélisation submersion par franchissements de paquets de mer (et débordement)

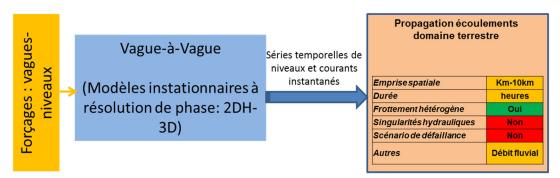


Figure 21 : Schématisation de la stratégie de la modélisation réaliste de la submersion par paquets de mer.

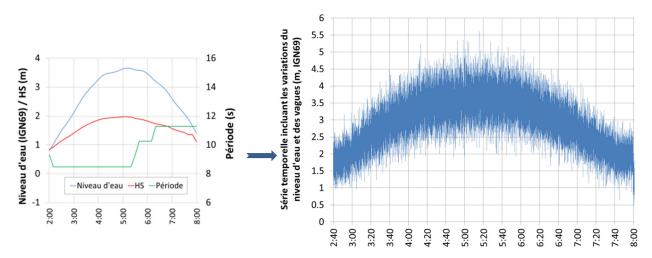


Figure 22 : Exemple de série temporelle de niveau d'eau utilisée en entrée par les modèles vague-àvague. Source BRGM, Le Roy et al. 2015.

Les codes vague-à-vague sont tout à fait adaptés pour simuler la submersion marine par franchissements de paquets de mer (ou par combinaison franchissement et débordement) notamment sur des secteurs fortement urbanisés (de quelques km²) où l'on recherche une

description détaillé des écoulements tenant compte des interactions avec le bâti et les ouvrages (utilisation d'un MNE de résolution spatiale métrique). Les contraintes de temps de calcul ne permettent pas des simulations (2DH ou 3D) au-delà de quelques heures. De plus, ces codes ne permettent pas pour l'instant de tenir compte du comportement des connexions hydrauliques ni des scénarios de défaillance des ouvrages.

Ci-après sont décrits les principaux codes vague-à-vague utilisés au BRGM. Leur utilisation est illustrée grâce à 2 exemples d'application.

Brève description des codes de calcul utilisés

Les modèles instationnaires à résolution de phase (vague-à-vague) sont actuellement en plein développement, et très peu de produits opérationnels existent à ce jour. Les modèles cités ciaprès correspondent à des codes de recherche représentatifs de l'état de l'art.

Ces 2 codes sont SURF-WB et SWASH. Tous les 2 utilisent des schémas numériques à capture des chocs et bien équilibrés et peuvent tenir compte du frottement au sol. A priori, ils peuvent donc traiter correctement l'interface sèche-mouillée et la propagation des écoulements sur des topographies complexes (fortes pentes), en présence d'ouvrages et du bâti.

SURF-WB

Le code SURF-WB (Marche *et al.*, 2007) est un modèle vague-à-vague développé par les Université de Bordeaux et Montpellier. Il est issu de la dérivation d'un modèle de Saint-Venant visqueux bidimensionnel à partir des équations de Navier-Stokes homogènes et incompressibles. Il inclut des termes de diffusion, de friction, de Coriolis ou encore de tension de surface de manière rigoureuse d'un point de vue mathématique. Il prend en compte le frottement au sol par l'intermédiaire de coefficients de Manning qui peuvent être spatialisés.

Le fait que ce modèle repose sur les équations de Saint-Venant le rend capable de représenter le comportement de vagues déferlées, mais il reste cependant incapable d'identifier quand le déferlement survient : son domaine d'application reste donc restreint en général aux zones de surf et de swash.

SWASH

Le modèle *Simulating WAves till Shore* (SWASH), développé par l'Université Technologique de Delft (NL) et diffusé librement, est un outil de modélisation numérique dédié à la simulation des comportements de la surface libre (vagues) et des écoulements pour des flux d'inondation en domaine côtier (Zijlema *et al.*, 2011). Il peut être utilisé en coordonnées cartésiennes ou sphériques, en série ou en parallèle, en 1D, 2DH, 2DV et 3D. Le frottement au fond peut être traité avec des coefficients de Manning spatialisés. Il peut également prendre en compte l'influence les débits fluviaux.

Ce modèle s'appuie sur les équations de Saint-Venant et résout également un terme de pression non-hydrostatique. Cela lui permet un domaine d'application plus étendu que SURF-WB allant de la propagation des vagues, la zone de levée, le déferlement et la submersion. Il propose donc une alternative intéressante à ce dernier.

Exemples d'application

Deux exemples d'application de la modélisation réaliste de la submersion marine par franchissements de paquets de mer sont présentés ci-dessous.

Reconstitution submersion historique avec SURF-WB: tempête Johanna à Gâvres

L'objectif de cette étude est de simuler de la façon la plus détaillée possible la submersion marine sur un secteur ayant connu beaucoup de dégâts et disposant d'assez d'observations pour valider la modélisation, le but final étant d'établir des relations entre les dégâts observés pour chacune des habitations et la submersion locale (hauteur d'eau, vitesse du courant ou de montée des eaux). C'est pourquoi Gâvres, située à l'Est de la sortie de la rade de Lorient dans le Morbihan, fût choisi. Le Tableau 6 récapitule les différentes informations concernant cette simulation.

	Topo/Bathymétriques	RGE ALTI© 1 m+ sondes côtières SHOM Histolitt + sondes DHI	
	Occupation du sol	A partir d'orthophotos	
Données d'entrée	Connexions hydrauliques	Non traitée	
	Éléments structurants	Repérage sur le terrain	
	Données météo- marines	Champs de vent et pression CFSR et vagues issues de IOWAGA	
Données de validation	Chronologie de la montée des eaux, hauteurs d'eau et laisses de mer observées lors de la tempête Johanna (mars 2008)		
Données de forçage	Issues d'un couplage simplifié MARS 2DH/SWAN (réalisé pour cette étude).		
Caractéristiques du domaine de calcul	Emprise de ~0.4 km². MNE et MNF : grille de 663 x 607 mailles de 1 m		
Code utilisé-Temps de calcul	SURF-WB : 8,5 jours de calcul pour simuler une période de 05h20min (calcul effectué sur 1 processeur)		
Objectif-exploitation	Assurantiel : détermination de relations entre les hauteurs/vitesses des courants et de la montée des eaux et les dégâts (coûts) constatés sur le bâti		
Cadre	Projet BRGM – Fondation MAIF - UBO		
Mise en œuvre	Complexe		

Tableau 6 : Principales caractéristiques de la simulation de la submersion par franchissements de paquets de mer à Gâvres lors de la tempête Johanna.

Les étapes les plus délicates ont concerné :

- l'implantation et la validation du couplage simplifié MARS-2DH/SWAN afin de construire la série temporelle des niveaux d'eau instantanés à proximité de Gâvres (Figure 22) ;
- la construction du MNE en reconstituant précisément les habitations ainsi que les murets longeant les routes (Figure 23) ;

la modélisation avec SURF-WB (réglage de l'emprise de calcul et sensibilité à l'occupation du sol avec des temps de calcul très importants).

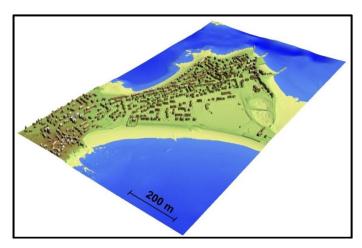


Figure 23 : MNE de 1 m de résolution de Gâvres. Source BRGM, Le Roy et al 2015.

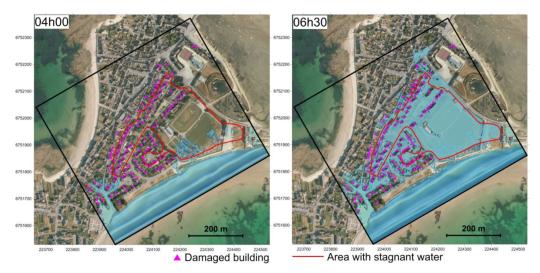


Figure 24 : Instantanées de la simulation de la submersion marine. Source BRGM, Le Roy et al 2015.

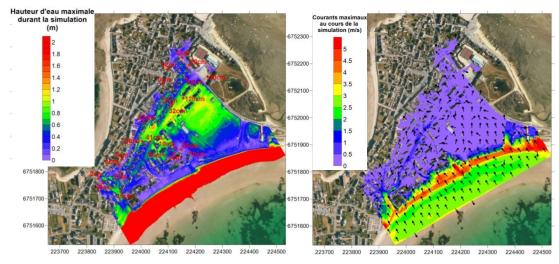


Figure 25 : Hauteurs d'eau et courants maximaux obtenus lors de la simulation. Source BRGM, Le Roy et al 2015.

Les résultats obtenus (voir Figure 24 et Figure 25) sont très bons permettant de reproduire :

- la chronologie de la submersion à 15 minutes près ;
- les hauteurs maximales observées ;
- l'ensemble des bâtiments endommagés par la submersion.

L'animation complète de la simulation est disponible grâce à ce lien suivant : https://www.youtube.com/watch?v=fYiPAnzVkCA.

• Aléa Submersion marine avec SWASH : Secteur de l'Ayguade (Hyères, 83)

L'objectif de ce projet est de disposer d'éléments de connaissances sur la submersion marine actuelle et future sur la Plaine du Ceinturon (à proximité de la ville d'Hyères-les-Palmiers) dans le contexte d'une éventuelle relocalisation de la route littorale qui longe ce rivage depuis le Port Saint-Pierre jusqu'à l'embouchure du Gapeau et à la recomposition spatiale du territoire. Pour cela il s'agit de suivre une méthode compatible avec celle utilisée pour l'estimation de l'aléa submersion dans le cadre des PPRL. Ci-après nous présentons les travaux de modélisation menés particulièrement sur le secteur de l'Ayguade dont les principales informations sont présentées Tableau 7.

	Topo/Bathymétriques	Litto3D© 1 m+ sondes côtières SHOM Histolitt	
	Occupation du sol	Carte de la plaine du Ceinturon fournie par le Syndicat Mixte du SCoT PM (Figure 11).	
Données d'entrée	Connexions Non traitée hydrauliques		
	Éléments structurants	Repérage sur le terrain	
	Données marines	Marégraphe de Toulon et base de données de vagues BRGM	
Données de validation	Extension de la submersi	on pour la tempête de décembre 2008	
Scénarios de forçage	Probabilités conjointes tri-variées : niveau marin/vagues/niveau fluvial : périodes de retour 30, 50 et 100 ans pour des élévations du niveau de la mer aux échéances 2030 et 2100.		
Caractéristiques du domaine de calcul	Emprise de ~1.1 km². MNE et MNF : grille de 861 x 1271 mailles de 1 m		
Code utilisé-Temps de calcul	SWASH: 2 jours de calcul pour simuler une période de 10h30min (calcul effectué sur 48 processeurs)		
Objectif-exploitation	Projet MEDDE/DEB : « Expérimentation de la relocalisation des activités et des biens : recomposition spatiale des territoires menacés par les risques littoraux »		
Cadre	Projet BRGM – ville d'Hyères-les-Palmiers		
Mise en œuvre	Complexe		

Tableau 7 : Principales caractéristiques de la simulation de la submersion par franchissements de paquets de mer aux Ayguade.

Les principales difficultés rencontrées concernent :

- l'établissement des scénarios de période de retour 30, 50 et 100 ans faisant appel à des probabilités conjointes trivariées ;
- la fabrication du MNE avec beaucoup de terrain pour reconstituer les murets longeant le front de mer et quelques rues ;
- la génération du MNF : corrections manuelles de la carte d'occupation du sol utilisée suite à des visites de terrain ;
- l'utilisation du code de recherche SWASH : emprise de la zone de calcul, choix des paramétrages contrôlant la propagation des vagues.

Le modèle a pu être validé en reproduisant correctement les surfaces inondées par les franchissements de paquets affectant ce secteur lors de la tempête de décembre 2008.

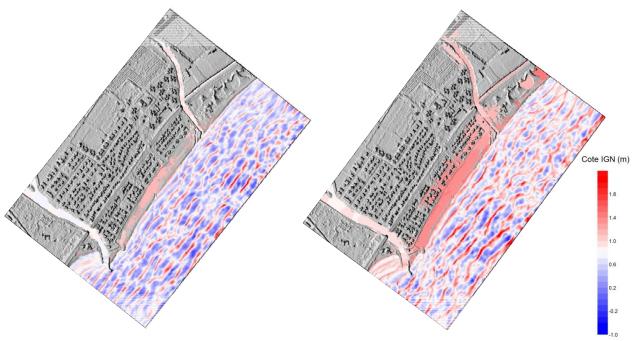


Figure 26 : Instantanés d'une simulation menée sur l'Ayguade (scénario trentennal à échéance 2030) avec le modèle vague-à-vague SWASH. Source BRGM, Le Roy et al. 2014.



Figure 27 : Scénario trentennal à échéance 2030 (gauche), trentennal à échéance 2100 (milieu) et scénario centennal à échéance 2100 (droite) : Hauteurs d'eau maximales simulées à terre à l'Ayguade (résolution 1 m). Source BRGM, Le Roy et al. 2014.

L'exploitation du modèle (Figure 26 et Figure 27) montre que les franchissements peuvent être importants sur l'Ayguade pour des périodes de retour 30 ans à échéance 2030. En revanche l'augmentation du niveau de la mer à l'échéance 2100 rend les processus de débordement dominants : l'étendue de la submersion et les hauteurs d'eau maximales sont quasi les mêmes pour des périodes de retour 30 ans ou 100 ans à échéance 2100 (respectivement situation du milieu et à droite de la Figure 27).

Dans le cas présent, le rôle des vagues dans la submersion marine est subordonné à celui du niveau statique, en particulier dans le cas de l'élévation de la mer liée au changement climatique à échéance 2100.

3.2.3. Approche mixte de la modélisation de la submersion par débordement et franchissement

L'approche mixte présentée dans ce paragraphe (Figure 28) fait appel aux outils déjà décrits §3.2.1 et 3.2.2. Il s'agit d'identifier, sur le domaine étudié, les linéaires potentiellement soumis aux franchissements par paquets de mer. Ces linéaires sont par la suite segmentés en tronçons homogènes selon des critères de pente du haut de plage, d'altitude du rivage et d'orientation par rapport aux vagues. Il est par la suite possible de calculer pour chacun de ces tronçons les débits franchissant à l'aide de modèles vague-à-vague selon des profils afin de limiter les temps de calcul (mode 1D ou 2DV) ou bien des formules paramétriques (Eurotop 2007). Les données de vagues et de niveaux nécessaires à ces calculs de débits proviennent du couplage (complet ou simplifié) hydrodynamique/vagues vu §3.2.1. Enfin, les débits franchissant sont injectés dans le code hydrodynamique (MAR-2DH dans notre cas) afin de les propager à terre simultanément aux éventuels débordements par le niveau moyen du plan d'eau, aux apports fluviaux, voire à la pluie.

Modélisation submersion: approche mixte franchissement et débordement

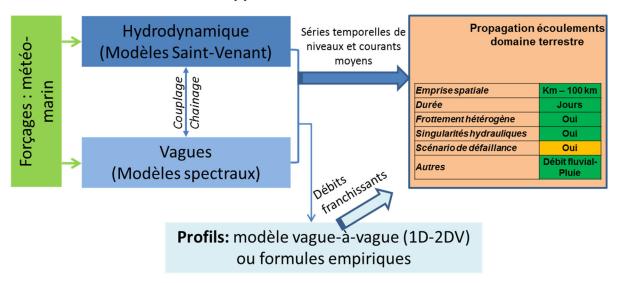
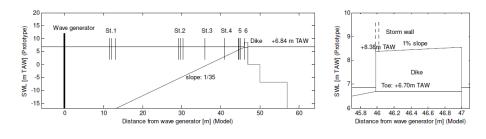


Figure 28 : Schématisation de la stratégie mixte de la modélisation de la submersion marine par débordement et franchissements.

Il est à noter que les formules empiriques de calcul des débits franchissant (EuroTop, 2007) sont à manipuler avec précaution. Des expériences en laboratoire (Figure 29) montrent, pour

des configurations relativement simples par rapport à des cas en nature, tantôt des surestimations importantes des débits, tantôt l'inverse par rapport aux mesures. L'exploitation du modèle SWASH sur ces mêmes expériences donne des résultats nettement meilleurs (Figure 29).



Test No.	Parameter	Physical Model	SWASH Model	EurOtop Eq. 5.8 Lower 5% / Mean / Upper 5%
	$H_{m0,i}$ (m) at $5H_{m0}$ from toe (St.5)	0.073	0.073	0.073
	$T_{m-1,0}$ (s) at -5 m TAW (St.2)	2.1	2.1	2.05
1A	$T_{m-1,\theta}$ (s) at toe (St.6)	18.7	16.7	-
	Wave setup (m) at toe (St.6)	0.019	0.023	-
	q (l/s/m)	0.58	0.45	0.66 / 1.08 / 1.75
	$H_{m\theta,i}$ (m) at $5H_{m\theta}$ from toe (St.5)	0.075	0.075	0.075
	$T_{m-1,\theta}$ (s) at -5 m TAW (St.2)	2.1	2.1	2.05
1B	$T_{m-I,\theta}$ (s) at toe (St.6)	18.7	16.7	-
	Wave setup (m) at toe (St.6)	0.019	0.023	-
	q (l/s/m)	0.14	0.08	0.03 / 0.08 / 0.23
	$H_{m\theta,i}$ (m) at $5H_{m\theta}$ from toe (St.5)	0.080	0.080	0.080
	$T_{m-1,\theta}$ (s) at -5 m TAW (St.2)	2.1	2.1	2.12
2A	$T_{m-I,\theta}$ (s) at toe (St.6)	14.3	13.6	-
	Wave setup (m) at toe (St.6)	0.015	0.019	-
	q (l/s/m)	1.82	1.71	2.58 / 3.38 / 4.43
	$H_{m\theta,i}$ (m) at $5H_{m\theta}$ from toe (St.5)	0.080	0.080	0.080
	$T_{m-1,\theta}$ (s) at -5 m TAW (St.2)	2.1	2.1	2.12
$^{2\mathrm{B}}$	$T_{m-1,0}$ (s) at toe (St.6)	14.3	13.1	-
	Wave setup (m) at toe (St.6)	0.015	0.019	-
	q (l/s/m)	0.45	0.42	0.11 / 0.26 / 0.60

Figure 29 : Comparaisons des débits franchissant mesurés en laboratoire à ceux calculés par des formules paramétriques (Eurotop) et modélisés par SWASH. Source Suzuki et al., 2012.

Cette modélisation simplifiée de la submersion permet des applications sur de grandes emprises spatiales, sur des durées de plusieurs jours tout en tenant compte de l'occupation du sol, du comportement des ouvrages hydrauliques et des éventuelles défaillances des structures de défense côtière (hors linéaires soumis aux franchissements). Elle est illustrée ci-après avec une application sur la commune de Sainte-Suzanne située au NE de l'île de la Réunion. Les principales caractéristiques des modèles implantés sont compilées Tableau 8 et illustrées Figure 30. Ce travail a été mené dans le cadre du projet ANR SPICy dont l'objectif est de développer un système de prévisions des inondations cycloniques.

Les processus à l'origine des inondations pris en compte en entrée du modèle hydrodynamique MARS-2DH sont les suivants :

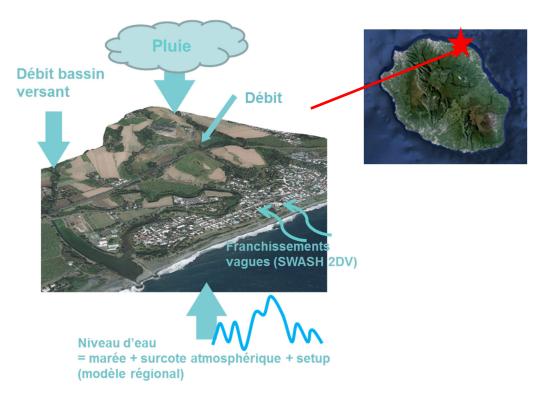
• Le niveau marin constitué de la marée et de la surcote atmosphérique calculé par le modèle hydrodynamique régional proche du rivage de Sainte Suzanne, auquel est ajouté la surcote induite par le déferlement des vagues (wave setup issu de SWAN);

- Les débits des ravines (rivière Ste Suzanne (Niagara), Ravine Bertin, Ravine Les Jacques et Ravine Les Vignes) sous la forme d'hydrogrammes issus des modèles hydrologiques des bassins versants ;
- Les débits entrants par les franchissements de paquets de mer calculés par le modèle vague à vague SWASH-1D (Zijlema et al. 2011) le long du front de mer ;
- La pluie « nette » spatialisée, c'est-à-dire le ruissellement effectif sur surface imperméable issu des résultats des modèles météorologiques ;

Cette chaîne de modélisation a été validée sur des cycloniques historiques. Un exemple de résultat pour un cyclone de type Béjisa (2014) est présenté Figure 31.

	Topo/Bathymétriques	Litto3D© 1 m+ sondes côtières SHOM Histolitt		
	Occupation du sol	Corinne Land Cover		
Données d'entrée	Connexions hydrauliques	Consultation auprès des gestionnaires (ville de Sainte-Suzanne) et visites terrain		
	Éléments structurants	Repérage sur le terrain, le MNT Litto3D© et orthophotos		
Données de validation	Mesures de vagues, niveaux d'eau et laisses de mer pour des cyclones récents : Dina, Gamède, Dumile, Béjisa entre autres			
Données de forçage	Modélisation à l'échelle de l'île (réalisée pour cette étude) : champs de vagues et de niveaux d'eau marins, débits fluviaux et pluie			
Caractéristiques du domaine de calcul		t 7 km². Emprise 1 : MNT et MNF, grille de 400 x 350 2 : MNE et MNF grille de 875 x 400 mailles de 4 m.		
Codes utilisés-Temps de calcul		MARS-2DH, SWAN et SWASH: 3 heures de calcul de 24h (calcul effectué sur 48 processeurs)		
Objectif-exploitation	Système de prévision des inondations cycloniques			
Cadre	Projet ANR SPICy avec: BRGM, METEO-France Réunion, LACY, BRLi, ARMINES (http://spicy.brgm.fr)			
Mise en œuvre	Complexe			

Tableau 8 : Principales caractéristiques de la simulation de la submersion par franchissements, débordement et ruissellement dans la commune de Sainte-Suzanne.



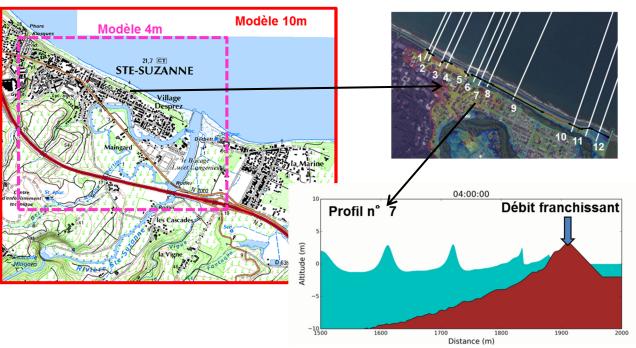


Figure 30 : Implantation d'une chaîne de modélisation de la submersion par débordement, franchissement et ruissellement sur la ville de Sainte-Suzanne. Source BRGM, Lecacheux et al. 2016.

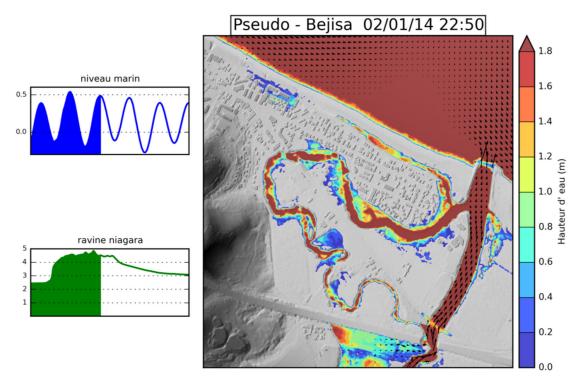


Figure 31 : Exemple de simulation des hauteurs d'eau et des vitesses des courants issues de la modélisation des inondations sur la commune de Sainte Suzanne. Source BRGM, Lecacheux et al. 2016.

4. Détermination de la rupture des cordons dunaires

Les modèles morphodynamiques reposent sur un couplage entre un code de propagation de vagues, un code 2D ou 3D hydrodynamique et un module de transport sédimentaire (Figure 32). Ces modèles morphodynamiques résolvant simultanément l'hydrodynamique, le transport sédimentaire et les évolutions morphologiques sont destinés principalement à des calculs moyen-terme (plusieurs jours) sur des échelles spatiales de plusieurs centaines de mètres à kilomètres.

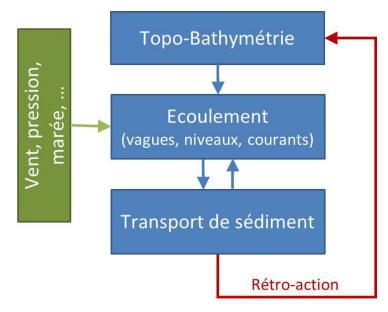


Figure 32 : Illustration du fonctionnement des modèles morphodynamiques. Source BRGM.

Ci-après nous présentons le modèle Xbeach ainsi qu'un exemple d'application de formation de brèches dans un cordon dunaire.

4.1. DESCRIPTION DE XBEACH : MODELE MORPHODYNAMIQUE

XBeach (eXtreme Beach behavior, Roelvink et al., 2009) est un modèle 2DH Open Source représentatif de l'état de l'art qui résout la propagation des vagues en zones côtières en incluant la contribution des ondes longues (infra gravitaires ou « surf beats », c'est-à-dire l'excursion maximale du swash). La circulation littorale dans la frange côtière est également calculée par le modèle qui déduit de ces conditions hydrodynamiques le transport sédimentaire et les évolutions morphologiques : érosion, ensablement, submersion de dunes ou de récifs au cours d'événement climatiques intenses (tempêtes, cyclones). Par défaut, le modèle reçoit en entrée des conditions de vagues côtières. On peut également introduire des niveaux d'eau marins et des conditions de vent et des débits fluviaux.

Il s'agit d'un modèle public qui a été développé grâce aux fonds et au soutien de l'US Army Corps of Engineers et d'un consortium regroupant l'UNESCO-IHE, Deltares (Delft Hydraulics), l'Université de Technologie de Delft et l'Université de Miami.

4.2. EXEMPLE D'APPLICATION : BOUCHOLEURS (TEMPETE XYNTHIA)

Xbeach a été appliqué sur le secteur des Boucholeurs lors de la tempête Xynthia de février 2010 (voir & 3.2.1et Figure 33) avec l'objectif de tester sa capacité à reproduire les brèches générées au niveau du marais d'Yves lors de la tempête.

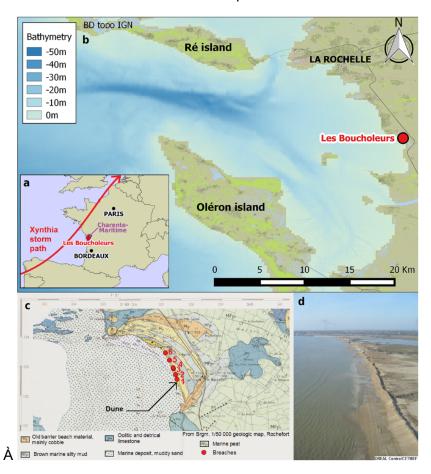


Figure 33 : Localisation des Boucholeurs, trajectoire de la tempête Xynthia et localisation des brèches observées. Source Müller et al. 2016.

Les principales informations concernant la modélisation avec Xbeach sont compilées Tableau 9. Les résultats de la simulation montrent (Figure 34) le début de la génération des brèches à partir de la mi-marée montante. A marée haute la quasi-totalité du cordon dunaire se trouve sous l'eau. A marée descendante, les courants sont chenalisés au niveau des brèches. Le Tableau 10 indique que les dimensions des brèches (longueur et largeur) ont été reproduites correctement.

Xbeach est donc capable de simuler la formation des brèches dunaires. Néanmoins sa mise en œuvre demeure complexe et nécessite des temps de calcul très importants.

	Topo/Bathymétriques	RGE Alti© 1 m+ sondes côtières SHOM Histolitt	
	Occupation du sol	Frottement homogène	
Données d'entrée	Connexions hydrauliques	Non pris en compte	
	Éléments structurants	Repérage sur le terrain et orthophotos	
Données de validation	Observations des brèches	s dunaires formées lors de la tempête Xynthia	
Données de forçage	Chroniques des niveaux d'eau et des vagues issues de l'étude de Pedreros et Paris 2012.		
Caractéristiques du domaine de calcul	Emprise de ~ 15 km². MNT : mailles de taille variale allant de 2m (dune) à 15 m au large.		
Codes utilisés-Temps de calcul	Xbeach: 7 jours de calcul pour simuler une période de 8h (calcul effectué sur 144 processeurs)		
Objectif-exploitation	Tester la capacité de Xbeach à générer des brèches dunaires		
Cadre	Projet R&D BRGM		
Mise en œuvre	Complexe		

Tableau 9 : Principales caractéristiques de la simulation de la génération des brèches dans le secteur des Boucholeurs Müller et al. 2016.

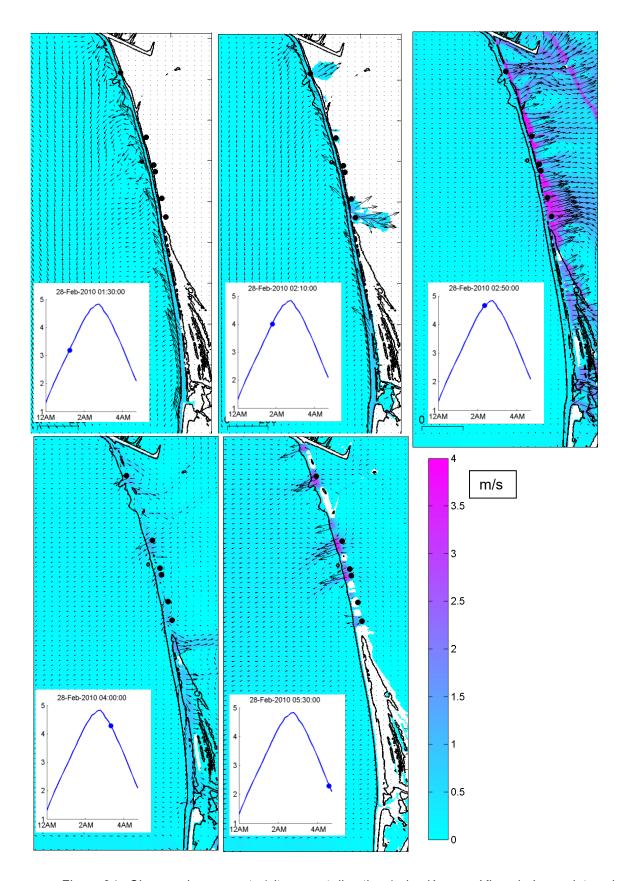


Figure 34 : Champs des courants (vitesses et directions) simulés avec Xbeach. Les points noirs correspondent aux positions des brèches observées. D'après Müller et al. 2016.

		Observations	Model
Breach 6	Length	25m	20m
breach o	Width	15m	20m
Breach 5	Length	35m	40m
breach 5	Width	25m	30m
Dunash 2	Length	50m	60m
Breach 3	Width	20m	20m

Tableau 10 : Comparaisons des dimensions des brèches observées et simulées avec Xbeach sur le secteur des Boucholeurs. D'après Müller et al. 2016.

5. Conclusions

Cette étude a permis de dresser l'état des connaissances des méthodes d'évaluation de la submersion marine et de modélisation de la génération de brèches dunaires. Il ressort que :

- la modélisation numérique de la submersion par débordement est mûre avec des applications sur des domaines de quelques km² à plusieurs milliers de km², sur une durée de plusieurs jours tout en tenant compte de l'occupation du sol, du comportement des ouvrages hydrauliques et des éventuelles défaillances des structures de défense côtière. De plus, d'autres phénomènes peuvent être intégrés si nécessaire à la modélisation de la submersion comme l'apport en eau douce des fleuves et/ou de la pluie;
- la modélisation détaillée et réaliste de la submersion par franchissements de paquets de mer est possible y compris dans des zones fortement urbanisées. Néanmoins sa mise en œuvre reste délicate et couteuse en temps de calcul (outils numériques toujours en phase recherche) et limitée à des domaines de quelques km²;
- des méthodes mixtes de modélisation de débordement/franchissement peuvent être mise en place sur des domaines étendus donnant de bons résultats. Le comportement des ouvrages hydrauliques, les éventuelles défaillances des structures de défense côtière et l'apport en eau douce (fluvial et pluie) peuvent également être intégrés. La mise en place de ces méthodes demeure néanmoins complexe;
- L'état de l'art de la modélisation morphodynamique permet de simuler la génération des brèches dunaires. Toutefois la mise en œuvre des modélisations demeure complexe avec des temps de calcul très importants et limitée à des domaines de quelques km².

6. Bibliographie

Bates P.D., Dawson R.J., Hall J.W., Horritt M.S., Nicholls R.J., Wicks J., Hassan M.A.A.M. (2005) - Simplified two-dimensional numerical modeling of coastal flooding and example applications, Coastal Engineering, 52, 793-810.

Bertin, X., Li, K., Roland, A., and Bidlot, J.R. (2015). The contributions of short-waves in storm surges: two case studies in the Bay of Biscay. Continental Shelf Research 96 (2015) 1–15.

Booij, N., Haagsma IJ.G.; Holthuijsen L.H.; Kieftenburg, A.T.M.M.; Ris, R.C.; Van der Westhuysen A.J. and Zijlema M., (2004). Swan Cycle III version 40.41. User's Manual, 115p.

Bunya, S., J.C. Dietrich, J.J. Westerink, B.A. Ebersole, J.M. Smith, J.H. Atkinson, R. Jensen, D.T. Resio, R.A. Luettich, C. Dawson, V.J. Cardone, A.T. Cox, M.D. Powell, H.J. Westerink, H.J. Roberts (2010). "A High-Resolution Coupled Riverine Flow, Tide, Wind, Wind Wave and Storm Surge Model for Southern Louisiana and Mississippi: Part I – Model Development and Validation." Monthly Weather Review, Volume 138, 345-377.

Engineers Australia, Water Engineering - « Australian Rainfall & Runoff » Project. Rapports disponibles sur http://www.ncwe.org.au/arr/comm report.html.

EurOtop (2007). Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures – Assessment Manual. Eds. Pullen, T., N.W.H Allsop, T. Bruce, A. Kortenhaus, H. Schüttrumpf & J.W. van der Meer. www.overtoppingmanual.com.

Fewtrell T.J., Duncan A., Sampson C.C. Neal J. and Bates P.D. (2011) – Benchmarking urban flood models of varying complexity and scale using high resolution terrestrial LiDAR data. Physics and Chemistry of the Earth, 36, 281-291.

Fortunato A.B., Rodrigues M., Dias, J.M., Lopes C., Oliveira A. (2013) - Generating inundation maps for a coastal lagoon: A case study in the Ria de Aveiro (Portugal), Ocean Engineering, 64, 60-71.

Gallien T.W., Schubert J.E., Sanders B.F. (2011) - Predicting tidal flooding of urbanized embayments: A modeling framework and data requirements, Coastal Engineering, 58, 567-577.

Garcin M., Nicolae Lerma A., Pedreros R. avec la collaboration de F. Paris. (2012) – Evaluation de la submersion marine maximale à l'échelle régionale. Rapport final. BRGM/RP-62259-FR, p.97, fig.40, tabl.9, ann4.

Gervais M. (2012). Impacts morphologiques des surcotes et vagues de tempêtes sur le littoral méditerranéen. Thèse de Doctorat, Université Perpignan. 401 p

Lazure P., Dumas F. (2008). An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). Advances In Water Resources, 31(2), 233-250.

Lecacheux S., R. Pedreros, F. Paris, E. Chateauminois, A. Nicolae Lerma, et al.. Toward the implementation of a cyclone-induced coastal hydrodynamics and marine inundation forecasting system for Reunion Island. International Coastal Symposium (2016), Mar 2016, Sydney, Australia. In: Vila-Concejo, A.; Bruce, E.; Kennedy, D.M., and McCarroll, R.J. (eds.), Proceedings of the 14th International Coastal Symposium (Sydney, Australia). Journal of

Coastal Research, Special Issue, No. 75, 2016, Proceedings of the 14th International Coastal Symposium (Sydney, Australia).

Le Roy S., Monfort D. et Pedreros R. (2012) – Projet ALDES : Simulations numériques de tsunamis en Méditerranée Occidentale. Rapport BRGM/RP-61473-FR, 95 p., 62 ill.

Le Roy S., Pedreros R., Nicolae Lerma A., (2013) – Modélisation de la submersion marine en milieu urbain. Rapport final. BRGM/RP-63477-FR, 84 p., 48 ill., 3 tabl.

Le Roy S., Stepanian A., Pedreros R., Bulteau T., Nicolae-Lerma A. et Balouin Y. (2014) – Modélisation de la submersion marine sur la Plaine du Ceinturon (Hyères-les-Palmiers). Rapport final. BRGM/RP-63945-FR, 98 p., 80 ill., 6 ann., 8 cartes hors-texte.

Le Roy S., Pedreros R., André C., Paris F., Lecacheux S., Marche F., Vinchon C. (2015) – Coastal flooding of urban areas by overtopping: dynamic modelling application to the Johanna storm (2008) in Gâvres (France). Natural Hazards and Earth System Sciences, 15, 2497–2510.

Marche F., Bonneton P., Fabrie P. and Seguin N. (2007) – Evaluation of well-balanced bore-capturing schemes for 2D wetting and drying processes. Int. J. Numer. Meth. Fluids 2007; 53:867–894.

MEDDE (2014) - Guide Méthodologique, Plan de Prévention des Risques Littoraux. Version de mai 2014, 169 p.

Muller, H.; van Rooijen, A.; Idier, D.; Pedreros, R., and Rohmer, J., 2016. Assessing storm impact on a French coastal dune system using morphodynamic modeling. Journal of Coastal Research, Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.

Paris F., Stépanian A., Pedreros R., Bulteau T., et Lecacheux S. (2015) – Modélisation de la submersion marine en Camargue – Phase 1. Rapport final. BRGM/RP-65241-FR, 84 p., 53 fig., 7 tabl., 1 ann.

Pedreros R., S. Lecacheux, F. Paris, J. Lambert, S. Le Roy, M. Garcin et J.M. Mompelat (2016) – OURAGAN 1928: Modélisation de la submersion marine que générerait aujourd'hui un ouragan de type 1928 sur le Petit-Cul-de-Sac Marin et l'agglomération Pointoise. Rapport final, BRGM/RP-63706-FR, 68 p., 42 ill., 1 ann.

Pedreros R. avec la collaboration de F. Paris (2012). Expertise Xynthia. BRGM/RP-61078-FR 70 p., 46 fig., 8 Tabl.

Roelvink, J.; Reniers, A.; Van Dongeren, A.; Van Thiel de Vries, J.; McCall, R., and Lescinski, J., (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. Coastal Engineering, 56, 1133-1152.

Sallenger A. H., Jr. (2000). Storm Impact Scale for Barrier Islands. *Journal of Coastal Research*, 16, (3), p. 890-895.

Stockdon H.F., Holman R.A., Howd P.A., et al. (2006) - Empirical parametrization of setup, swash and runup. Coastal Engineering 53, pp 573-588. Doi:10.1016/j.coastaleng.2005.12.005.

Suzuki, T., Verwaest, T., Veale, W., Trouw, K. and Zijlema, M., (2012). A numerical study on the effect of beach nourishment on wave overtopping in shallow foreshores, in: P.J. Lynett and J.M.

Smith (Eds.), Proc. 33th Int. Conf. on Coast. Engng., ASCE, World Scientific Publishing, Singapore, paper no. waves.50.

Tibéri A.L. et Chassé P. (2012) – Tempête Xynthia - Modélisation 2D de la submersion à Portdes-Barques (Charente-Maritime). Présentation aux Journées Scientifiques et Techniques du CETMEF, 5/12/2012.

Tolman, H. L.: User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III version 3.14, Technical Report 276, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, 2009.

Zijlema M., Stelling G., Smit P. (2011) - SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters Coastal Engineering 58, 992–1012.

Etat des connaissances sur la submersion marine et des méthodologies d'évaluation



Centre scientifique et technique
Direction risques et prévention
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr