

Document public

Cinétique de la submersion marine : comparaison des méthodes de détermination de la submersion marine par modélisation numérique

Rapport final

BRGM/RP-67361-FR
Novembre 2017



Document public

Cinétique de la submersion marine : comparaison des méthodes de détermination de la submersion marine par modélisation numérique

Rapport final

BRGM/RP-67361-FR

Novembre 2017

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2017

A. Nicolae Lerma, R. Pedreros,
Balouin, Y. et Bulteau, T.

Vérificateur :

Nom : **OLIVERO C.**

Fonction : Responsable d'Unité

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : **Blum A.**

Fonction : Directrice Occitanie

Date :

Signature :

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

Contact : qualite@brgm.fr



En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Nicolae Lerma A., Pedreros R., Balouin Y. et Bulteau T. (2017) - Cinétique de la submersion marine : comparaison des méthodes de détermination de la submersion marine par modélisation numérique. Rapport final. BRGM/RP-67361-FR, 74 p., 42 fig., 7 tab., 1 ann.

Synthèse

Afin d'évaluer l'aléa de submersion marine sur le littoral en prenant en compte la complexité des phénomènes en jeu (débordements, franchissements par paquets de mer) et la difficulté d'une approche « tous modèles » à l'échelle régionale, la Direction Régionale pour l'Environnement, l'Aménagement et le Logement d'Occitanie et le BRGM ont décidé de réaliser une étude méthodologique visant à comparer plusieurs approches d'évaluation de la submersion marine.

Dans ce cadre, 4 méthodes de détermination de la submersion marine (1 SIG par extrapolation des niveaux d'eau au rivage et 3 par modélisation numérique) ont été mises en œuvre sur le site pilote de Leucate - Le Barcarès. Après évaluation des performances des méthodes au regard des données disponibles lors d'un évènement historique, les processus conduisant à la submersion marine sont simulés pour un évènement de tempête extrême (période de retour conjointe niveau d'eau/vagues centennale).

Les approches de modélisation sont mises en place à des résolutions différentes afin d'assurer un compromis satisfaisant entre reproduction des processus physiques modélisés, représentation de l'espace urbain, temps/moyens de calcul. Les contraintes que soulèvent chacune des méthodes et le travail préparatoire des données nécessaires pour la réalisation des modélisations sont exposées.

Les résultats obtenus montrent, dans la situation actuelle pour un évènement extrême, une forte sensibilité du site d'étude aux submersions par franchissements de paquets de mer et relativement limitée aux débordements. En revanche, un scénario de forçage associant à l'évènement centennal une élévation du niveau moyen de la mer de 60 cm (élévation du niveau de la mer liée au réchauffement climatique) présente une évolution importante de l'ampleur des submersions caractérisée par un changement de processus et la submersion de nombreux nouveaux secteurs. Le lido serait affecté prioritairement par des débordements, ayant pour conséquence une extension drastique des secteurs affectés.

L'application de chacune des méthodes est comparée et leur pertinence est évaluée au regard des besoins de connaissances et de l'effort nécessaire à la mise en œuvre de ces méthodes. Il ressort que l'utilisation d'une méthode ou d'une autre trouve sa justification dans les caractéristiques du site d'étude et dans le degré de précision attendu pour répondre aux questions posées par l'aléa. Ainsi, les résultats obtenus par ces méthodes ne s'opposent pas mais s'inscrivent plutôt dans une démarche progressive consistant à affiner à chaque étape les connaissances relatives à la détermination de la submersion marine.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS	11
1.2. RAPPEL SUR LES PROCESSUS À L'ORIGINE DES SUBMERSIONS MARINES ..	11
2. Site d'étude.....	15
2.1. LOCALISATION ET CARACTÉRISTIQUES GÉOMORPHOLOGIQUES DU LITTORAL.....	15
2.2. SENSIBILITÉ À LA SUBMERSION MARINE	16
2.3. MÉTHODES POUR LA CARTOGRAPHIE DE LA SUBMERSION MARINE	18
3. Scénarios d'évènements météo-marins.....	21
3.1. ESTIMATION DE LA SUBMERSION MARINE OBSERVÉE SUR LE SITE	21
3.2. ESTIMATION D'UN SCÉNARIO MÉTÉO-MARIN PAR MÉTHODE STATISTIQUE ..	22
4. Architecture et mise en place des modèles.....	29
4.1. MODÈLES UTILISÉS ET EMPRISES	29
4.2. STRATÉGIE DE MODÉLISATION.....	30
4.2.1. Stratégie 1 ou modèle de submersion grande emprise (méthode 2 et 3)	30
4.2.2. Stratégie 2 ou modèles de submersion locaux (méthode 4)	34
5. Données et traitements nécessaires pour la modélisation de submersion marine...37	
5.1. DONNÉES TOPO-BATHYMÉTRIQUES DE HAUTE PRÉCISION (MNT ET MNB)...37	
5.1.1. Intégration des données bathymétriques	37
5.1.2. Traitement des données topographiques	38
5.1.3. Traitement des éléments urbains structurants.....	39
5.2. DONNÉES D'OCCUPATION DU SOL – MNF (MODÈLE NUMÉRIQUE DE FROTTEMENT)	40
5.3. DONNÉES RELATIVES À L'IMPLANTATION DU BÂTI – MNE (MODÈLE NUMÉRIQUE D'ÉLÉVATION) ET DES SINGULARITÉS HYDRAULIQUES	42
5.3.1. Intégration du bâti	42
5.3.2. Prise en compte des singularités hydrauliques	43
6. Résultats	45
6.1. ÉVÈNEMENT HISTORIQUE (MARS 2013)	45
6.1.1. Stratégie 1 : validation du modèle grande emprise	45
6.1.2. Stratégie 2 : validation des modèles locaux	46

6.2. ÉVÈNEMENT DE TYPE CENTENNAL	48
6.2.1. Stratégie 1 : modèle grande emprise	48
6.2.2. Stratégie 2 : modèles locaux (Méthode 4)	50
6.3. ÉVÈNEMENT TYPE CENTENNAL ET ÉLÉVATION DU NIVEAU DE LA MER.....	52
7. Analyse comparative des approches de modélisation pour l'évènement type centennal.....	55
7.1. HAUTEUR D'EAU	55
7.2. VITESSE D'ÉCOULEMENT	57
7.3. SYNTHÈSE DES APPORTS ET COMPLÉMENTARITÉ DES MÉTHODES	60
8. Discussion et limites.....	63
8.1. VALIDATION DES SIMULATIONS DE SUBMERSION.....	63
8.2. FORÇAGES ET SCÉNARIOS	63
8.3. DONNÉES TOPO-BATHYMÉTRIQUES ET MORPHOLOGIE DES PLAGES.....	64
9. Conclusion.....	69
10. Bibliographie	71

Liste des figures

Figure 1 : Schéma des différentes contributions au niveau du plan d'eau lors d'une tempête (surcotes) jusqu'au rivage.	12
Figure 2 : Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer/dégradation des ouvrages / débordement, ©BRGM).....	13
Figure 3 : Localisation du site d'étude, dimensions et fonctionnement général de la lagune de Salse Leucate.	15
Figure 4 : Rose des vagues. La valeur de Hs se lit sur l'axe radial. L'enveloppe des points de la série temporelle est représentée par la ligne noire en tirets. La fréquence d'occurrence des couples (Hs,Dp) est représentée par l'échelle de couleur (min=0,02 ‰) avec une discrétisation de 5° pour Dp et 5 cm pour Hs. Dp est en convention nautique (i.e. indique la provenance des vagues). Observations à la bouée Leucate période 12/2006 - 03/2013	16
Figure 5 : Diagramme bivarié (Tp,Hs). Même symbologie que la Figure 4. Pour la fréquence d'occurrence, Tp est discrétisée toutes les 0,25 s et Hs tous les 5 cm. Observations à la bouée Leucate période 12/2006 - 03/2013	16
Figure 6 : Submersions historiques récentes sur la commune de Leucate (Source photos N. Guilpain et R. Meynier).	17
Figure 7: Méthodes de calculs de la submersion (source BRGM).	18
Figure 8 : Conditions météo-marines au large de la lagune de Leucate lors de la tempête de mars 2013 (Source projet CRISSIS)	22

Figure 9 :	À gauche, GPD ajustée à la série tronquée du marégraphe de Sète. Seuil de la loi fixé à 0,96 m/0 hydro. Les paramètres de la loi sont estimés par la méthode des moments. Les intervalles de confiance sont calculés par bootstrap paramétrique (Mazas and Hamm, 2011). À droite, loi GPD ajustée aux données de Hs (Candhis et SCOT) par la méthode HIBEVA. Seuil de la loi fixé à 2m. Pour l’affichage, les données SCOT sont représentées par la valeur centrale de chaque intervalle, illustration issue de Nicolae Lerma <i>et al.</i> , 2018.....	25
Figure 10 :	À gauche, résultats de simulation Monte Carlo basée sur 6 années communes entre la série marégraphique à Sète et les données Candhis. Données initiales en noire, données simulées (10 000 ans) en rouge. À droite, Résultat de la simulation de Monte Carlo pour les couples (Hs, Tp). Points noirs : données initiales. Points gris : données simulées. En rouge : courbe des médianes de Tp en fonction de Hs calculée à partir des données simulées (Nicolae Lerma et al., 2018).....	25
Figure 11 :	À gauche, contours d’iso période de retour de dépassement conjoint pour les valeurs 1 an, 10 ans et 100 ans. À droite : Contours environnementaux pour les périodes de retour 1 an, 10 ans et 100 ans. Dans les deux cas, les points noirs représentent les données initiales (après sélection des événements indépendants).....	26
Figure 12 :	Cinétique de la tempête événement de période de retour 100 ans.....	28
Figure 13 :	Emprise des domaines de calcul pour chacun des modèles utilisés.....	30
Figure 14 :	Approche mixte franchissement et débordement.	31
Figure 15 :	Maillage structuré à gauche utilisé par le modèle MARS-2DH et maillage non structuré à droite utilisé par WW3.	32
Figure 16 :	Exemples de profils utilisés pour la modélisation des franchissements (profil Leucate-Plage à gauche et Mourets à droite, la croix rouge est le point d’extraction des volumes franchissant, au sommet du muret de front de mer pour Leucate-Plage, au sommet de la dune pour Mourets).	33
Figure 17 :	Exemple de simulation de volumes franchissants.	33
Figure 18 :	Approche intégrée des submersions par franchissement et potentiel débordement.....	34
Figure 19 :	Emprise spatiale des modèles locaux de submersion. (1) de Port Leucate au grau de Leucate – (2) du grau de Leucate au Mouret.....	35
Figure 20 :	Illustration du passage d’un produit « brut » LIDAR à une surface adaptée à la modélisation des submersions.	37
Figure 21 :	Exemple des compositions de sondes pour Port Leucate à gauche et Port Barcarès à droite.....	38
Figure 22 :	Exemple d’aspérité et de lissage effectué sur un transect situé sur une route.	38
Figure 23 :	Correction du MNT 10 m servant à la modélisation grande emprise à partir des données MNT – 1 m, les points rouges et bleus (parfois confondus) correspondent à la hauteur du sol dans le MNT 10 m ré-échantillonné, les points noirs à la hauteur du sol après traitement et correction.	39
Figure 24 :	Correction des MNT 10 m (modèle grande emprise) et 2 m (modèle local des Mourets), à partir de données D-GPS. Le transect A-B représente en long, la correction appliquée au niveau du muret ; les points rouges orrespondent à la hauteur du sol dans le MNT 1 m, les points noirs à la hauteur du sol après traitement et correction à partir de données D-GPS. Le transect C-D représente en coupe, la correction appliquée permettant de réintégrer la présence du muret dans les modèles à 2 m et à 10 m de résolution.	40
Figure 25 :	Exemple de passage de la donnée Corine Land Cover à un MNF ($m^{1/3}.s^{-1}$).....	41
Figure 26 :	Illustration de la méthode d’intégration du bâti pour la modélisation à haute résolution.	43
Figure 27 :	Buses d’évacuation sous la RN	44

Figure 28 : Cartes issues de la modélisation grande emprise pour l'évènement historique (hauteur d'eau à terre), à gauche ne tenant compte que des débordements (méthode 2), à droite intégrant débordements et franchissements (méthode 3, les segments noirs indiquent la localisation des profils types).....	46
Figure 29 : Simulation des submersions lors de la tempête de mars 2013, modèle local 1.	47
Figure 30 : Cartographie des inondations lors de la tempête (après le pic) et témoignages photos.....	47
Figure 31 : Cartes issues de la modélisation grande emprise pour l'évènement de type centennal (hauteur d'eau à terre), à gauche ne tenant compte que des débordements (méthode 2), à droite intégrant débordements et franchissements (méthode 3, les segments noirs indiquent la localisation des profils types).	49
Figure 32 : Hauteur d'eau lors du pic de l'évènement de type centennal pour le secteur du village naturiste (modèle local 1).....	50
Figure 33 : Simulation des submersions a) lors du début des franchissements ($t_0 + 6$ h), b) 3 h avant le pic de l'évènement ($t_0 + 9$ h), c) au pic de l'évènement ($t_0 + 12$ h), d) 3 h après le pic ($t_0 + 15$ h) les conditions marines associées à chaque situation sont présentées dans le Tableau 4.	51
Figure 34 : Cartes issues de la modélisation grande emprise pour l'évènement de type centennal et une élévation du niveau moyen de la mer de 60 cm (hauteur d'eau à terre), à gauche ne tenant compte que des débordements (méthode 2), à droite intégrant débordements et franchissements (méthode 3, les segments noirs indiquent la localisation des profils types).	53
Figure 35 : Cartographie des submersions (scénario type centennal) pour chacune des méthodes implémentées pour secteur du village naturiste, a) méthode 1, cyan = 1,14 m hauteur d'eau au large associée au scénario centennal, bleu = 1,50 m idem + 36 cm d'élévation du niveau moyen de la mer de wave setup, valeur moyenne sur le littoral issue de la modélisation grande emprise, b) méthode 2, c) méthode 3 (les segments noirs indiquent la localisation des profils types), d) méthode 4.	56
Figure 36 : Cartographie des submersions (scénario type centennal) pour chacune des méthodes implémentées pour le secteur des Mourets, a) méthode 1, cyan = 1,14 m hauteur d'eau au large associée au scénario centennal, bleu = 1,50 m idem + 36 cm d'élévation du niveau moyen de la mer de wave setup, valeur moyenne sur le littoral issue de la modélisation grande emprise, b) méthode 2, c) méthode 3 (les segments noirs indiquent la localisation des profils types), d) méthode 4.	57
Figure 37 : Cartes des courants au pic de la tempête (vitesses maximales) pour l'évènement de type centennal (méthode 4), secteur nord des Mourets.	58
Figure 38 : Illustration des vitesses maximales et de la direction des écoulements pour la zone nord du village naturiste. À gauche, la méthode 3 (résolution 10 m) et à droite la méthode 4 (résolution 2 m). Les vitesses sont représentées sur une image du MNT de résolution 2 m avec bâtiments.	59
Figure 39 : Illustration des vitesses maximales et de la direction des écoulements pour une zone de franchissement de cordon dunaire. À gauche, la méthode 4 (résolution 2 m), à droite la méthode 3 (résolution 10 m). Les vitesses sont représentées sur une image du MNT de résolution 2 m.....	60
Figure 40 : Localisation du profil type sur le littoral du village naturiste.	65
Figure 41 : Profils de plage utilisés pour la réalisation des tests de sensibilité.	66
Figure 42 : Résultats de l'analyse de sensibilité sur les volumes franchissants en fonction de la morphologie du profil de plage.....	67

Liste des tableaux

Tableau 1 : Données utilisées pour l'élaboration des scénarios statistiques.	23
Tableau 2 : Combinaison de paramètres déterminée par les méthodes statistiques JEC et ENC.	27
Tableau 3 : Valeurs des coefficients de frottement utilisés.....	42
Tableau 4 : Conditions au large associées aux illustrations (Figure 33) lors de l'événement de type centennal.....	52
Tableau 5 : Caractéristiques principales de chacune des méthodes envisagées.	61
Tableau 6 : Conditions de forçage pour les tests de sensibilité.....	66
Tableau 7 : Volumes franchissants sur 20 minutes (m ³ /m).	67

Liste des annexes

Annexe 1 : Descriptif synthétique des codes de calcul utilisés pour la plateforme modélisation	73
--	----

1. Introduction

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Les espaces littoraux de Méditerranée, et en particulier les « zones basses » du Golfe du Lion, sont caractérisés par une topographie à fleur d'eau, parsemés 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 s'est déroulée en deux phases principales :

- la première phase a été consacrée à la présentation de l'état des connaissances sur la dynamique et la cinétique de la submersion marine. Une revue des méthodes d'évaluation a été réalisée et a fait l'objet d'un rapport (Pedreros, 2016) ;
- l'objectif de la présente étude (deuxième phase) est de tester les méthodes pertinentes d'évaluation de la submersion marine et de sa cinétique, décrites en phase 1, sur un site-pilote de la région Occitanie. À l'issue de la phase 1, le site de Leucate - Le Barcarès a été sélectionné en raison de la diversité des processus de submersion avérés sur ce territoire (débordements, franchissements) qui en fait un site particulièrement pertinent pour tester les différentes approches. De plus, sur ce site de lido, très représentatif du littoral régional, les données hydrodynamiques (houles, niveaux d'eau) sont disponibles pour mettre en œuvre des analyses de probabilités jointes pour affiner les scénarios de référence à prendre en compte dans les simulations d'événements d'occurrence centennale avec le modèle retenu.

Il s'organise de la manière suivante. Après un court rappel des processus à l'origine de la submersion, le rapport détaille les caractéristiques du site d'étude puis les caractéristiques des événements météo-marins utilisés comme scénarios de modélisation. On présente ensuite l'architecture des différents modèles mis en place. Les données et les étapes de préparation pour la réalisation d'une modélisation adaptée à la submersion marine notamment en milieu urbain sont détaillées. Enfin, les résultats pour les différents scénarios envisagés et une étude comparative des méthodes mises en place précèdent une discussion sur les limites associées à ce travail.

1.2. RAPPEL SUR LES PROCESSUS À L'ORIGINE DES SUBMERSIONS MARINES

« 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).

Les épisodes de tempête entraînent des surélévations du niveau de la mer qui s'ajoutent temporairement aux fluctuations du niveau d'eau d'origine astronomique (marées). Ces composantes principales sont (Figure 1) :

- la surcote atmosphérique qui est une surélévation du niveau d'eau générée par (i) la chute de la pression atmosphérique (effet de baromètre inverse : 1 cm d'élévation du niveau d'eau pour ≈ 1 hPa de diminution de pression) et (ii) les courants induits par les vents d'afflux poussant les masses d'eau vers la côte ;

- la surcote de vague « *wave setup* » qui est une surélévation générée par le déferlement des vagues dans le secteur proche côtier ;
- le jet de rive (flux et reflux des vagues à la côte) caractérisé par des variations instantanées du niveau d'eau à la côte.

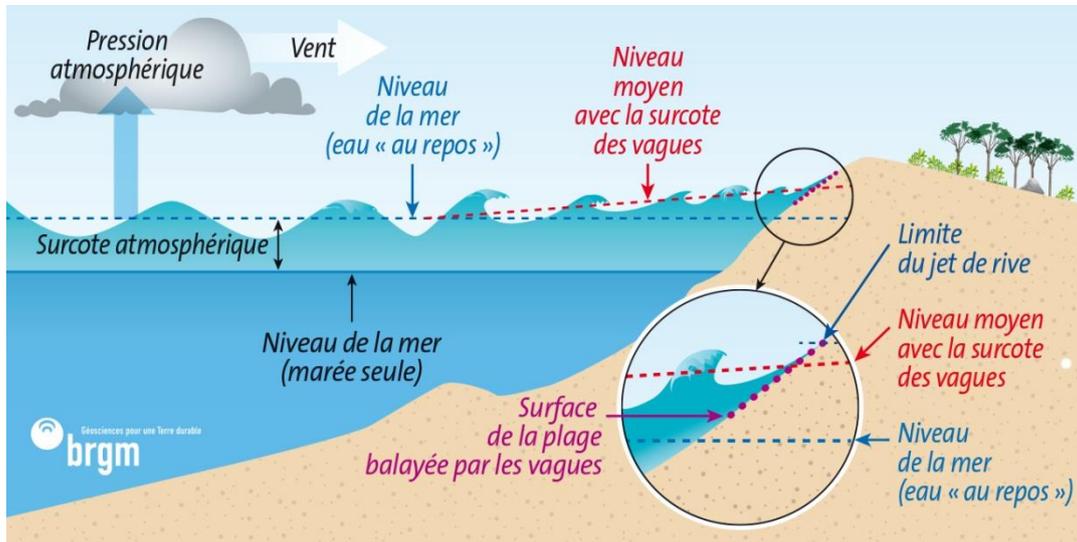


Figure 1 : Schéma des différentes contributions au niveau du plan d'eau lors d'une tempête (surcotes) jusqu'au rivage.

Lors des tempêtes on peut ainsi observer différents types de submersion provoquée par :

- des **franchissements** par paquets de mer, correspondant au passage des vagues par-dessus 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 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) ;
- des **débordements**, correspondant à une élévation du niveau d'eau statique (ou niveau moyen avec la surcote des vagues) 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 ;
- la **rupture** de structures de protection (ouvrages ou cordons dunaires) 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 particulier de débordement.

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, on assiste généralement à une montée progressive du niveau moyen (ou statique) et à un renforcement de l'intensité des vagues (Temps 1, Figure 2). 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).

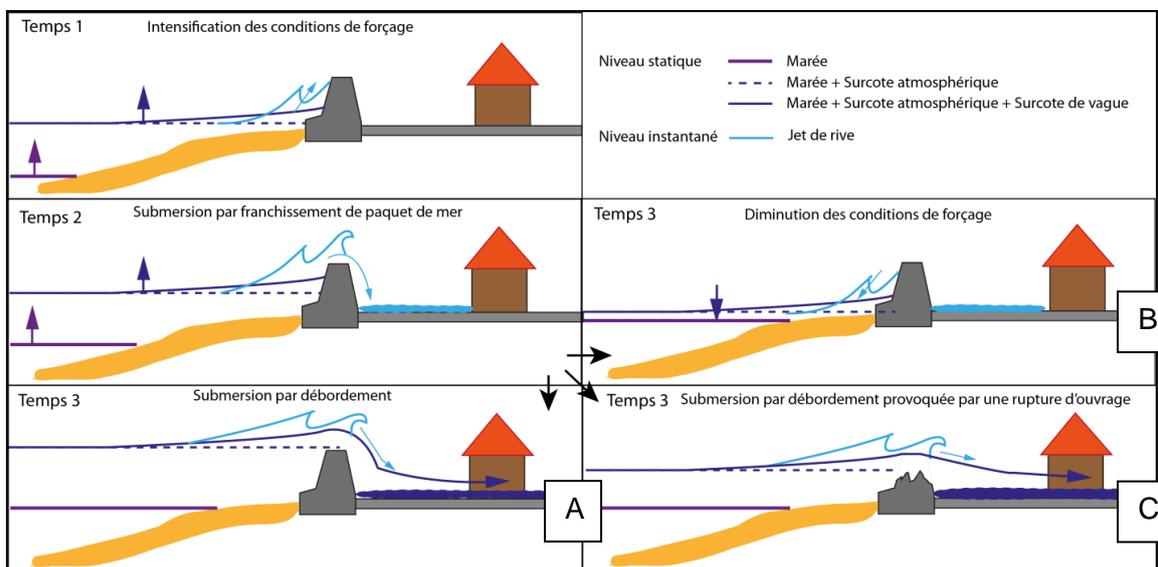


Figure 2 : Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer /dégradation des ouvrages / débordement, ©BRGM).

Comme évoqué, les vagues jouent un rôle très important dans les processus à l'origine des submersions. Dans ce rapport, on utilisera plusieurs paramètres descriptifs des caractéristiques des vagues. Ces abréviations sont communément utilisées dans les études sur les risques côtiers :

- **Hs (m)** : hauteur significative des vagues exprimée en mètres, correspondant à la moyenne du tiers des plus fortes vagues. Cette mesure statistique de la hauteur des vagues est le paramètre conventionnellement utilisé pour les études en océanographie littorale, notamment les études de submersion ou d'érosion ;
- **Tp (s)** : période pic des vagues, correspondant à la durée en secondes entre deux crêtes de vagues dominantes c'est-à-dire pour laquelle la densité spectrale est maximale ;
- **Lo (m)** : longueur d'onde des vagues, correspondant à la distance en mètres séparant deux crêtes ou deux creux successifs de vagues ;
- **Dp (°)** : direction pic de provenance des vagues correspondant à la direction en degrés au moment du maximum d'énergie spectral. L'angle est compté positivement, suivant le sens des aiguilles d'une montre par rapport au Nord géographique (convention nautique).

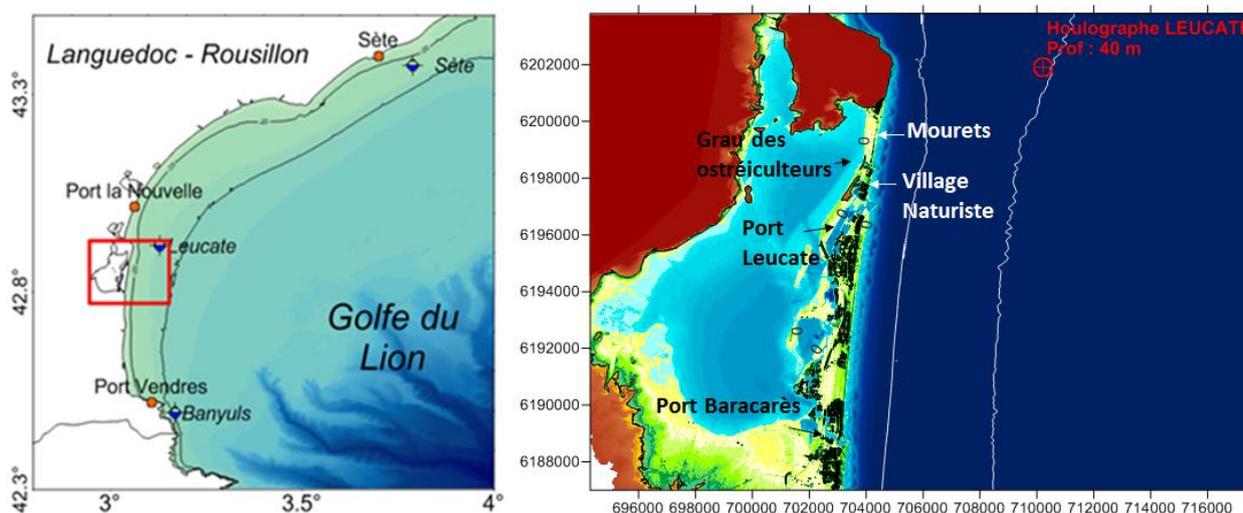
2. Site d'étude

2.1. LOCALISATION ET CARACTERISTIQUES GEOMORPHOLOGIQUES DU LITTORAL

Le littoral étudié est localisé à l'ouest du golfe du Lion. Il s'agit d'un lido qui sépare la lagune de Salse-Leucate de la mer méditerranée à l'est (Figure 3).

L'espace du lido est administré par deux communes, la commune de Leucate au nord (département de l'Aude), la commune du Barcarès au sud (département des Pyrénées-Orientales). Ce lido, d'une topographie généralement basse, possède une largeur variable comprise entre 300 m et 1,5 km. Il est constitué sur sa partie marine de plages sableuses à systèmes de barres tridimensionnelles. Le lido est entrecoupé par 3 passes, ou graus, artificialisés permettant la connexion entre l'étang et la mer. Du nord au sud, il s'agit : du grau des ostréiculteurs, du grau de Port-Leucate et du grau du Barcarès. Les graus, contrôlent les échanges d'eau entre la mer et l'étang. Le volume échangé entre les deux systèmes dépend des dimensions des passes. Ainsi, la circulation des eaux par le grau de Port-Leucate est environ cinq fois plus importante que celle transitant par Port-Barcarès, tandis que les échanges par le grau de Leucate (des ostréiculteurs) sont comparativement très faibles (IFREMER, 2003). Les niveaux d'eau de l'étang de Salses-Leucate varient en fonction de ces échanges marins par les graus mais aussi par des apports ponctuels d'eau douce par des sources karstiques (en moyennes annuelles Fond Estramar 2 m³/s et Fond Dame 1,4 m³/s au sud-ouest) et des ruisseaux au régime torrentiel au nord-ouest (IFREMER, 2003).

La marée sur ce littoral est de type microtidale (marnage entre 0,2 et 0,4 m) et les conditions de vague sur le site sont en moyenne peu énergétiques : Hs = 0,67 m Tp = 4,6 s (moyenne sur la période d'observation 12/2006 - 03/2013) avec deux directions privilégiées de provenance nord-ouest et est-sud-est (Figures 4 et 5).



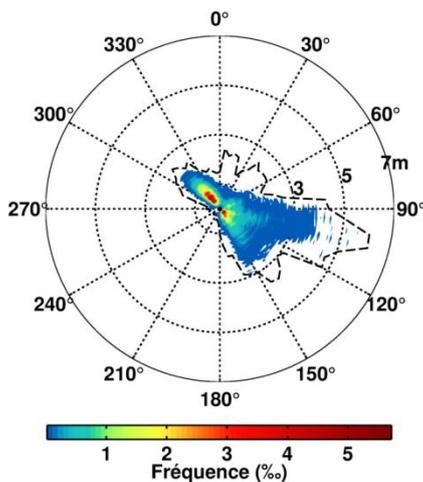


Figure 4 : Rose des vagues. La valeur de H_s se lit sur l'axe radial. L'enveloppe des points de la série temporelle est représentée par la ligne noire en tirets. La fréquence d'occurrence des couples (H_s, D_p) est représentée par l'échelle de couleur (min=0,02 ‰) avec une discrétisation de 5° pour D_p et 5 cm pour H_s . D_p est en convention nautique (i.e. indique la provenance des vagues). Observations à la bouée Leucate période 12/2006 - 03/2013.

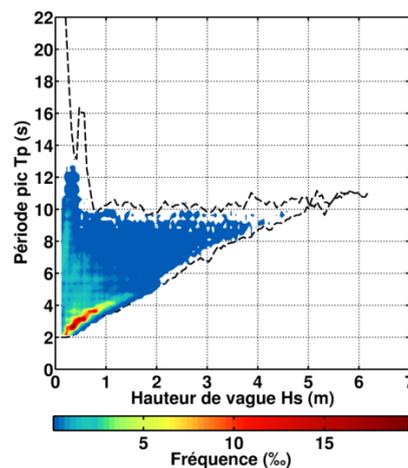


Figure 5 : Diagramme bivarié (T_p, H_s) . Même symbologie que la Figure 4. Pour la fréquence d'occurrence, T_p est discrétisée toutes les 0,25 s et H_s tous les 5 cm. Observations à la bouée Leucate période 12/2006 - 03/2013.

2.2. SENSIBILITÉ À LA SUBMERSION MARINE

En Occitanie, les tempêtes sont récurrentes et ont des impacts spatialement hétérogènes (<http://littoral.languedocroussillon.fr>). Comme de nombreuses stations balnéaires littorales du Languedoc et du Roussillon, le site étudié est particulièrement exposé à la submersion. La circulation de tempêtes hivernales associant d'importantes surcotes atmosphériques (entre 0,6 et 1 m et exceptionnellement supérieures à 1 m) et de très intenses conditions des vagues de secteur est-sud-est (H_s pouvant dépasser 6 m pour des périodes pics se situant entre 10 et 12 s, Nicolae Lerma *et al.*, 2018), sont à l'origine de dégradations sur le front de mer et d'épisodes de submersion affectant différentes parties du lido (front de mer, port, passes...).

L'aléa de submersion marine est d'autant plus important que l'urbanisation est massive, que les échanges de masse d'eau entre la mer et la lagune en arrière sont contraints et que la partie interne du lido est topographiquement très basse. Enfin certains quartiers sont construits directement sur le haut de plage (l'avant dune), ce qui les expose directement à l'action des vagues (Anselme *et al.* 2011).

Sur le lido, la commune de Leucate est actuellement la plus sensible à la submersion (Figure 6). Elle a connu de nombreux arrêtés portant reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle (arrêtés CATNAT) notamment en 1997, 1999, 2003, 2009, 2013 et 2014 pour « inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues ». À partir des données existantes, comme celles archivées au sein du réseau tempête Occitanie (vent, pression, précipitations (Météo-France), houle (CEREMA) et niveau d'eau (SHOM) et de l'observatoire de la côte sableuse catalane, les événements les plus marquants ont été répertoriés (cf. Elineau *et al.*, 2016) dans le cadre du projet CRISSIS. (Caractérisation des Risques Submersion marine sur des SItes Sensibles) cf. Figure 6.

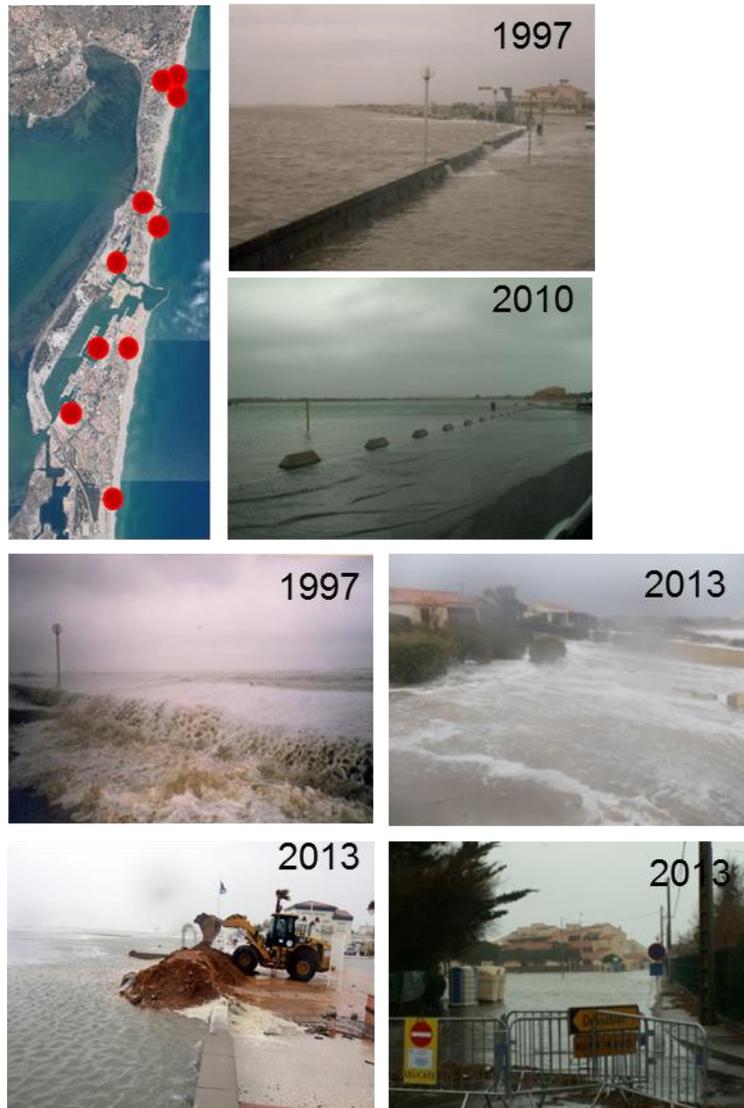


Figure 6 : Submersions historiques récentes sur la commune de Leucate
(Source photos N. Guilpain et R. Meynier).

L'analyse des événements historiques de tempêtes a permis de mettre en évidence une vingtaine d'évènements sur la période 2007-2015 (critère retenus houles > 3 m et/ou niveau marin > 0,80 cm (cote marine)). Parmi ces événements, la tempête de mars 2013 avec des houles supérieures à 6 m de Hs constitue un des événements les plus marquants. Du point de vue des conditions de vague, cet événement est, selon les statistiques ANEMOC (<http://anemoc.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>), de l'ordre d'une période de retour de 30 à 50 ans. Les niveaux d'eau associés à cet événement au marégraphe de Sète (0,73 m/NGF à Sète) le place sur ce critère comme un événement de période de retour compris entre 1 et 5 ans (CETMEF 2013). Cette tempête de très forte intensité, bien documentée tant du point de vue des conditions marines que des impacts sur le lido en terme de submersion marine, nous servira de référence et d'élément de validation lors de mise en place des modèles.

Toutefois, cet événement a principalement montré la sensibilité du front de mer à la submersion par franchissements de paquets de mer. D'autres témoignages historiques montrent que les modalités de la submersion sur le lido peuvent également être de nature différente et notamment se manifester par des débordements lors de tempêtes caractérisées par de très hauts niveaux marins. Ce fut notamment le cas en novembre 2014, où les niveaux d'eau ont atteint 0,99 m/NGF à Port-la-Nouvelle et 1,10 m/NGF à Sète et où la hauteur des quais à Port-Leucate a été dépassée.

2.3. MÉTHODES POUR LA CARTOGRAPHIE DE LA SUBMERSION MARINE

Compte tenu des éléments historiques, de l'exposition du site et de ses particularités morphologiques, le traitement de la submersion sur le site du lido de Leucate - Le Barcarès par méthode SIG ne paraît pas adapté (cf. Figure 7, cas 1, 2 et 3). Ce type d'approche a par ailleurs été développée dans Balouin et Belon, 2012 et ne sera que partiellement évoquée dans cette étude portant sur les méthodes de modélisation numériques.

Afin de proposer une représentation réaliste et complète de la submersion, les outils utilisés doivent permettre de reproduire les différents processus à l'origine des submersions (Figure 7, cas 4) : circulations d'eau entre la mer et la zone lagunaire, variations du niveau d'eau marin, action des vagues, processus de franchissement. Par ailleurs, le site étant constitué de zones urbanisées et aménagées à des degrés différents, la modélisation doit intégrer le type d'occupation du sol, les obstacles et les vecteurs à la propagation des écoulements à terre.

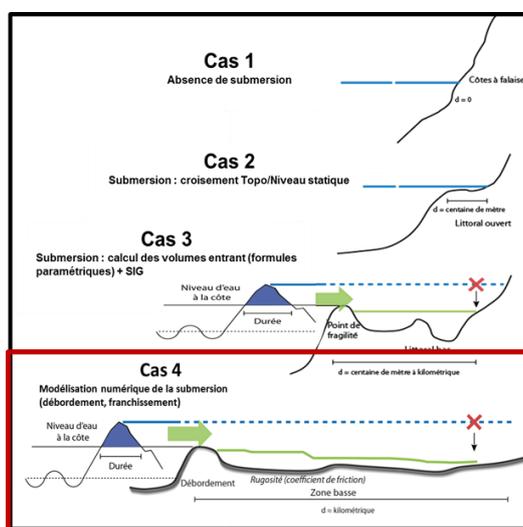


Figure 7: Méthodes de calculs de la submersion (source BRGM).

Afin de simplifier les comparaisons, les différentes méthodes seront référencées dans le texte ainsi :

- méthode 1 : traitement SIG de l'extension de la submersion ou méthode de croisement entre la topographie et un niveau d'eau spatialement homogène (correspondant au cas 3, Figure 7) ;
- méthode 2 : modélisation grande emprise des submersions par débordement ;
- méthode 3 : modélisation grande emprise des submersions par débordement et par franchissement via l'approche profils ;
- méthode 4 : modélisation par modèles locaux permettant de traiter de manière intégrée l'ensemble des processus susceptibles de provoquer des submersions et leur propagation à terre.

Les méthodes 2, 3, 4 sont des méthodes de modélisations dynamiques exploitant différents outils et stratégies de chaînage/couplage de modèles. Ces stratégies seront détaillées dans la suite du texte.

À noter que pour la modélisation des submersions marines, les apports ponctuels d'eau douce par des sources karstiques et des ruisseaux d'origines torrentielles ne seront pas pris en compte car ils sont très variables dans le temps et il n'existe pas de données permettant de caractériser leurs dynamiques durant les tempêtes.

Enfin, il convient d'indiquer que les simulations réalisées sont des modélisations hydrodynamiques opérées sur des modèles numériques dit à fonds fixes. Cette contrainte implique que les résultats dépendent en partie de la configuration morphologique du MNT utilisée et que le modèle ne permet pas représenter l'érosion des plages et des dunes associées aux conditions de tempête. En effet, la morphologie des plages (si les plages sont érodées en hiver ou plutôt engraisées en été ou après intervention de rechargement), peut jouer un rôle important notamment sur le déferlement des vagues et les phénomènes de franchissements. Afin de mettre en perspective nos résultats, des tests de sensibilités sur ces aspects (différentes configurations morphologiques du profil de plage) sont présentés partie 8.3.

3. Scénarios d'évènements météo-marins

La submersion marine sera simulée pour un événement historique (validation de la modélisation) et pour un scénario de période de retour de centennale. Les données utilisées et la constitution de ces scénarios sont décrites ci-après.

3.1. ESTIMATION DE LA SUBMERSION MARINE OBSERVÉE SUR LE SITE

L'approche historique a consisté à reconstituer l'évènement de tempête de mars 2013 à partir de chroniques de niveaux d'eau, vagues, vents issus de mesures et/ou d'autres modélisations numériques (ré-analyses) à proximité du secteur étudié.

Différentes sources de données ont été exploitées (Figure 8) :

- (i) Données d'observations de la bouée Candhis 01101 afin de connaître les paramètres locaux de vagues ;
- (ii) Données IFREMER MEDNORD, code WWIII, résolution 0,03° x 0,05° (projet IOWAGA) utilisées comme forçages pour la modélisation des cas historiques ;
- (iii) Données de niveaux d'eau issues du marégraphe de Sète. Le marégraphe le plus proche du site est localisé à Port la Nouvelle (SHOM, Conseil Régional Occitanie) à environ 15 km au nord du site, mais il n'était pas en activité en mars 2013 ;
- (iv) Données de vents/pressions issues du sémaphore de Leucate (données Météo France) ;
- (v) Données issues du projet CRISSIS¹ (Caractérisation de la submersion marine sur des sites sensibles).

¹ <http://crisis2015.free.fr/>

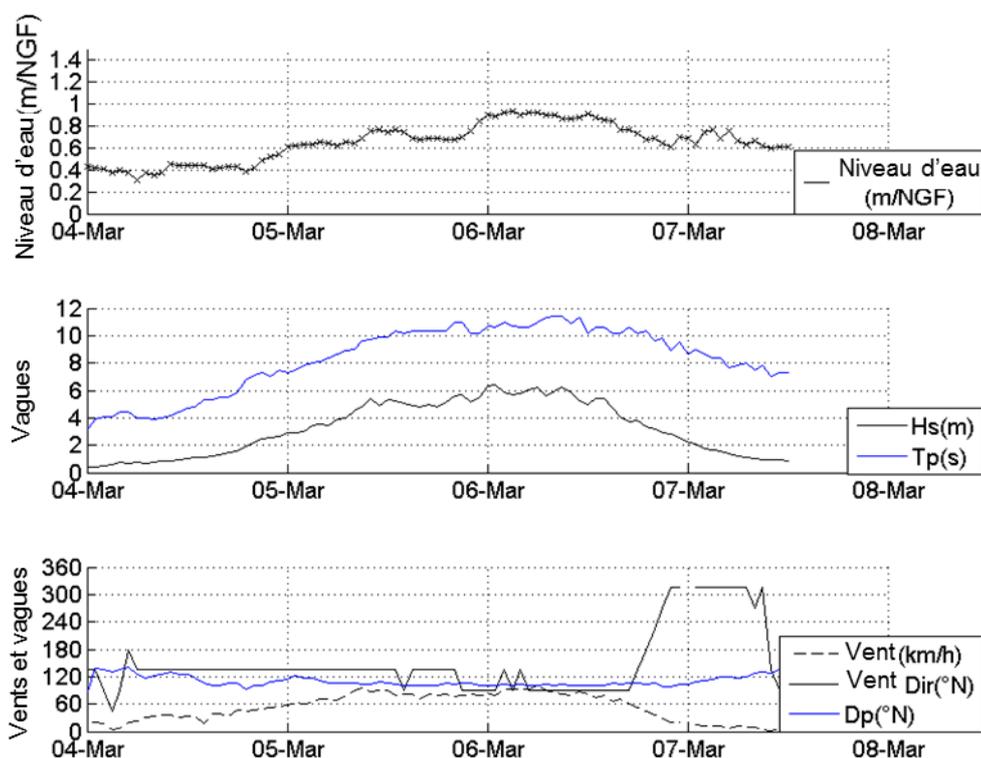


Figure 8 : Conditions météo-marines au large de la lagune de Leucate lors de la tempête de mars 2013 (Source projet CRISSIS).

3.2. ESTIMATION D'UN SCÉNARIO MÉTÉO-MARIN PAR MÉTHODE STATISTIQUE

L'aléa de submersion est généralement associé à une période de retour (i.e. une probabilité d'occurrence). L'analyse classique et recommandée au sein des directives européennes (Directive Cadre Inondation, TRI) ou nationale (en France, directive PPRL), consiste à considérer plusieurs scénarios associés à des probabilités d'occurrence différentes (dont 100 ans) ainsi que plusieurs scénarios pour une même période de retour. Dans le cadre des submersions marines plusieurs facteurs peuvent être à l'origine du phénomène, particulièrement, le niveau d'eau moyen, les conditions de vagues et le vent. Lorsque la période de retour d'une inondation dépend d'une seule variable (le niveau d'eau par exemple), alors celle-ci peut être définie sans ambiguïté. Cette définition est plus complexe lorsqu'au moins deux variables sont considérées conjointement.

Dans la plupart des études de risque impliquant plusieurs variables, les scénarios sont choisis en considérant que la période de retour définie à partir des variables d'entrée (dans notre cas : niveau d'eau, conditions de vagues, vents...) est identique à la période de retour de la réponse du système, i.e. la submersion. Toutefois la réponse du système est souvent complexe et une telle relation directe est rarement valable.

Ici, le scénario retenu comme hypothèse de travail est le scénario représentant un événement de type centennal proposé par Bulteau *et al.*, (2017) et illustré dans Nicolae Lerma *et al.*, (2018). Un rappel succinct des données exploitées et des méthodes statistiques employées est présenté ci-dessous.

Données disponibles

Un problème classique rencontré lors de la réalisation d'analyses statistiques en valeurs extrêmes à partir de données d'observations est la faible durée des périodes d'observations disponibles. En théorie, il est pertinent d'extrapoler la distribution de probabilité dans les extrêmes à environ 4 fois la durée d'observation. À titre d'exemple, il est donc nécessaire de disposer d'une série temporelle continue de 25-30 ans pour permettre de proposer des scénarios de période de retour 100 ans. Un travail important de préparation des séries temporelles afin de permettre des statistiques en valeurs extrêmes robustes a donc été nécessaire.

Les données disponibles de niveau (SWL, Sea Water Level) à Sète présentent une série quasi-continue pour la période 1996-2015, qui représente 16,4 années effectives. Pour l'analyse statistique, la tendance linéaire long-terme d'augmentation du niveau de la mer a été éliminée et les valeurs ont été rattachées au niveau moyen officiel de Port-la-Nouvelle : 0,59 m/0 hydro (SHOM, 2014). Les données de vagues exploitées sont issues des observations de la bouée CANDHIS 01101 couvrant la période 2007-2015 (Tableau 1). Les données simulées issues de l'étude Stépanian *et al.*, (2014) et nommées par la suite données SCOT, sont également utilisées pour le traitement de la variable Hs (ajustement de la distribution marginale, voir plus bas). Ces données sont co-localisées à la bouée et couvrent la période 1979-2009.

Variable	Source	Période	Durée effective
SWL	Sète marégraphe	1996-2015	16.4 années
Hs	Bouée Leucate	2007-2015	7.6 années
Hs	Re-analyse (Stepanian et al., 2014)	1979-2009	31 années

Tableau 1 : Données utilisées pour l'élaboration des scénarios statistiques.

Traitement de la variable niveau d'eau (SWL)

Le littoral languedocien est soumis à un régime microtidal qui ne justifie pas l'utilisation d'une méthode indirecte (i.e. séparant le signal déterministe – la marée, du signal aléatoire – la surcote atmosphérique) pour calculer les niveaux d'eau extrêmes. Une méthode directe d'analyse en valeurs extrêmes du signal a donc été employée.

Le calcul de la distribution marginale de SWL a été effectué à partir de la série tronquée du marégraphe de Sète (Tableau 1), soit 16,4 ans environ. La série temporelle est d'abord ré-échantillonnée en prenant le maximum du niveau d'eau par bloc de 3 jours (durée d'une tempête classique dans le golfe du Lion), puis un seuil statistique est choisi au-delà duquel la GPD (Global Pareto Distribution) est ajustée aux données. Le choix du seuil est effectué à l'aide de plusieurs techniques basées sur l'appréciation visuelle de graphes quantile-quantile et de tests statistiques. Le choix du meilleur ajustement entre 3 méthodes d'estimation des paramètres de la GPD, est également fait à partir de tests visuels et statistiques. Pour la variable SWL, l'ajustement retenu est celui réalisé avec la méthode des Moments au-delà du seuil 0,96 m/0 hydro (Figure 9).

Traitement de la variable Hs

Les données d'observations CANDHIS ne couvrent que 7 ans et de manière discontinue. Cette durée très faible ne permet pas d'extrapoler la distribution de probabilité dans les extrêmes et de considérer des périodes de retour élevées (typiquement 100 ans).

Pour pouvoir extrapoler les distributions de probabilité dans les extrêmes, il est nécessaire d'avoir suffisamment de données afin de réduire les incertitudes statistiques à un niveau raisonnable et aboutir à des résultats significatifs. Lorsque les données d'observations ne sont pas exploitables ou disponibles, une alternative possible consiste à utiliser des sorties de modèle représentant des séries temporelles de situation passées (ré-analyses). Mais dans ce cas, les erreurs commises par le modèle (dues soit à une résolution spatio-temporelle trop lâche, une bathymétrie pas assez précise, ou des données de forçage imprécises ...) se transfèrent à l'analyse statistique et génèrent des incertitudes sur les résultats.

Bulteau *et al.* (2015) ont développé une méthode (appelée HIBEVA pour Historical Information in Bayesian Extreme Value Analysis) dans un cadre bayésien pour utiliser des données historiques d'archives, dans l'analyse en valeurs extrêmes de niveaux d'eau. La flexibilité et le cadre général de cette méthode justifient son utilisation dans cette étude pour estimer la distribution de probabilité marginale des hauteurs significatives de vagues combinant données d'observations et sorties de modèle. Les données d'observation (Candhis) sont traitées comme des données systématiques et les données issues de modèle (données SCOT, Stépanian *et al.*, 2014) sont traitées comme de l'information historique incertaine. Seule la période 1979-2006 des données SCOT est donc utilisée (i.e. période antérieure au début des données Candhis).

Afin d'estimer l'incertitude liée aux données de modèle, une comparaison a été effectuée entre les deux jeux de données sur la période commune, de 2007 à 2009. Nous en avons déduit une hypothèse de travail : pour la période 1979-2006, les vraies valeurs de pics de Hs sont comprises dans un intervalle $I = [\text{pic de Hs SCOT} - 0,15 \text{ m} ; \text{pic de Hs SCOT} + 1,60 \text{ m}]$.

Similairement au traitement des niveaux d'eau, les séries temporelles (observations et sorties de modèle) sont d'abord ré-échantillonnées en prenant le maximum de Hs par bloc de 3 jours puis un seuil statistique est choisi (à partir des observations uniquement) au-delà duquel la GPD est ajustée aux données par la méthode HIBEVA. Celle-ci requiert également un « seuil de perception historique ». Dans le cas présent, ce seuil est fixé à 0,15 m.

La Figure 9 présente les résultats de la mise en œuvre de la méthode HIBEVA pour Hs. Le seuil est fixé à 2 m. Les paramètres de la GPD retenue (courbe rouge trait plein) correspondent au mode de la distribution de probabilité a posteriori des paramètres (voir Bulteau *et al.*, 2015 pour les détails).

Grâce à la combinaison des données SCOT et Candhis, la durée effective d'observation pour l'analyse statistique des vagues peut être étendue de 7 ans (données Candhis seules) à 35 ans. En utilisant uniquement les données Candhis, la période de retour maximale qui pouvait être considérée était de l'ordre de 30 ans. Désormais, cette période de retour maximale est de l'ordre de 140 ans.

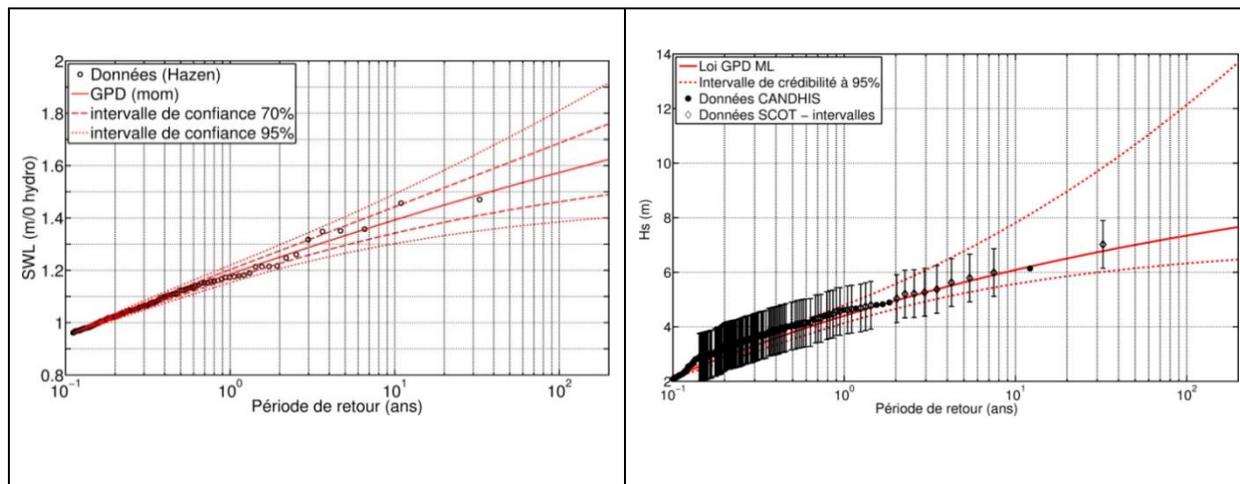


Figure 9 : À gauche, GPD ajustée à la série tronquée du marégraphe de Sète. Seuil de la loi fixé à 0,96 m/0 hydro. Les paramètres de la loi sont estimés par la méthode des moments. Les intervalles de confiance sont calculés par bootstrap paramétrique (Mazas and Hamm, 2011). À droite, loi GPD ajustée aux données de Hs (Candhis et SCOT) par la méthode HIBEVA. Seuil de la loi fixé à 2 m. Pour l’affichage, les données SCOT sont représentées par la valeur centrale de chaque intervalle, illustration issue de Nicolae Lerma et al., (2018).

Simulation de Monte Carlo

La réalisation des méthodes statistiques prévue dans l’étude exige de disposer d’un nombre de données très importants. Il est classiquement fait appel aux simulations dites de Monte Carlo afin de générer une représentation artificielle des données nécessaires à la réalisation des statistiques conjointes. Pour notre cas d’étude, une période fictive de 10 000 ans a été simulée. Ces 10 000 ans ne constituent en rien une prédiction ou une projection dans l’avenir, mais sont représentatifs des données disponibles actuellement. La Figure 10 montre les résultats obtenus.

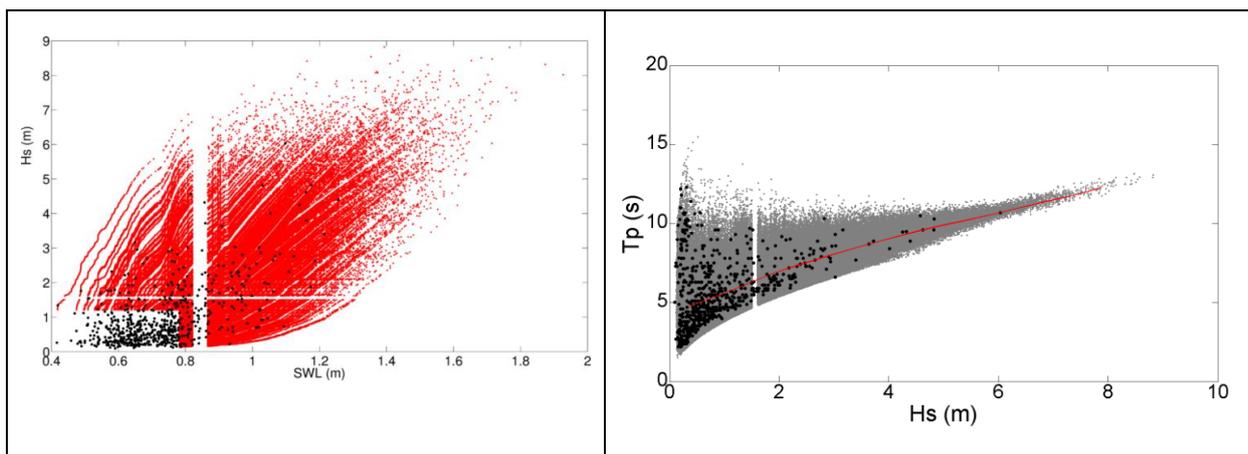


Figure 10 : À gauche, résultats de simulation Monte Carlo basée sur 6 années communes entre la série marégraphe à Sète et les données Candhis. Données initiales en noire, données simulées (10 000 ans) en rouge. À droite, Résultat de la simulation de Monte Carlo pour les couples (Hs, Tp). Points noirs : données initiales. Points gris : données simulées. En rouge : courbe des médianes de Tp en fonction de Hs calculée à partir des données simulées (Nicolae Lerma et al., 2018).

Méthodes statistiques et périodes de retour

Une fois l'échantillon de données marines offshore « artificiellement » élargi, des scénarios à propager correspondants à la période de retour envisagée T (ici $T = 100$ ans) sont sélectionnés. Une approche communément employée dans le domaine des risques côtiers consiste à choisir des combinaisons de forçages dont la période de retour de dépassement conjoint est égale à T (méthode nommée JEC par la suite pour *Joint Exceedance Contour*).

Cette approche fait l'hypothèse que la période de retour de la réponse est égale à la période de retour de dépassement conjoint des variables d'entrée. En réalité, la méthode JEC sous-estime la probabilité de dépassement de la variable de réponse car il est possible que des combinaisons dont la période de retour est inférieure à 100 ans dans notre cas (variables de forçages), puissent provoquer des submersions d'ampleurs supérieures à des submersions de période de retour 100 ans (réponse du système).

La seconde approche consiste à utiliser des contours environnementaux (notés *ENC* par la suite pour *Environmental Contour*), communément employés dans le domaine de l'ingénierie des structures offshore. Ces contours se définissent dans l'espace des variables d'entrée mais sont basées sur la probabilité de dépassement de la variable de réponse. Ces méthodes reposent sur une approximation de la courbe d'état limite. Nous suivons ici l'approche de Huseby *et al.* (2013, 2015). À l'inverse de la méthode JEC cette méthode est supposée délimiter un espace statistique maximisant, la variable de réponse (ampleur des submersions marines) étant au moins supérieure à la période de retour considérée (100 ans).

Ici la considération de ces deux méthodes (Figure 11) pour la définition de scénario suppose que dans des conditions normales, les deux approches (*JEC* et *ENC*) permettent de calculer des bornes supérieures et inférieures de la vraie réponse : ampleur des submersions marines (nommée Z) et ainsi d'encadrer les zones soumises à la submersion marine résultant de la propagation des conditions de forçage depuis le large jusqu'aux côtes tel que :

$$Z_{JEC} \leq Z \leq Z_{ENC}$$

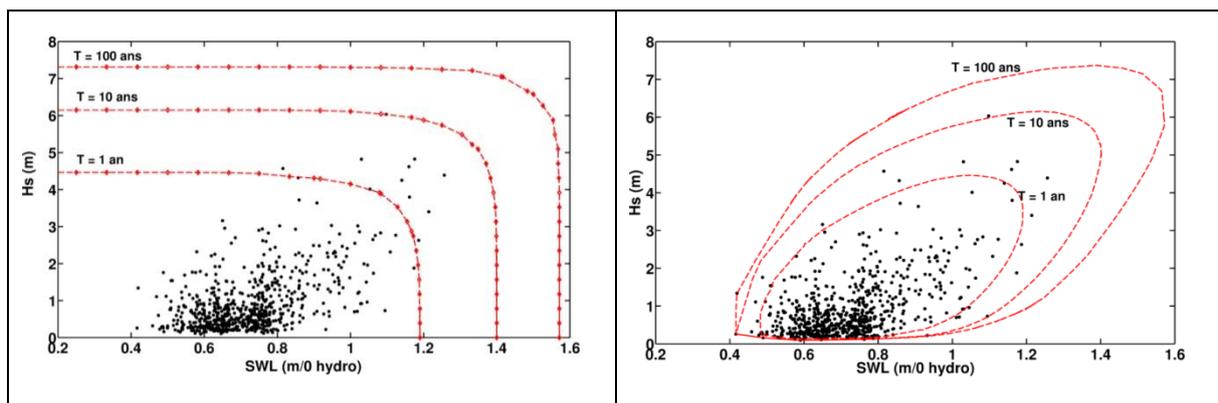


Figure 11 : À gauche, contours d'iso période de retour de dépassement conjoint pour les valeurs 1 an, 10 ans et 100 ans. À droite : Contours environnementaux pour les périodes de retour 1 an, 10 ans et 100 ans. Dans les deux cas, les points noirs représentent les données initiales (après sélection des évènements indépendants).

Covariables

Une fois les combinaisons (H_s , SWL) identifiées par les méthodes *JEC* ou *ENC*, il faut associer à chaque H_s , une valeur de période pic et de direction pic.

Ici, seules les vagues du secteur directionnel 60°-210° ont été conservées. Les données montrent qu'à partir de $H_s > 2,75$ m, la direction pic la plus probable se situe entre 100° et 110° (Figure 4). On retiendra donc la valeur $D_p = 105^\circ$ pour les futures simulations.

Pour modéliser la période pic des vagues, une approche identique à celle de Gouldby *et al.* (2014) est utilisée : les données de période pic sont d'abord transformées en cambrure selon l'équation :

$$Ca = (2\pi \cdot H_s) / (g \cdot T_p^2)$$

Puis, un modèle de régression conditionnelle sur H_s , prenant en compte la relation entre H_s et Ca qui veut que la cambrure tende vers une constante lorsque H_s augmente, est ajusté aux données. Lors de la simulation de Monte Carlo, une valeur de cambrure (et donc de période pic) est ainsi associée à chaque valeur de H_s simulée (Figure 10 b)).

À partir des données simulées par Monte Carlo, et au regard de l'évolution de la relation T_p vs H_s qui tend vers une loi déterministe, le choix a été fait d'associer une valeur unique de T_p à chaque H_s issue des combinaisons sélectionnées sur les JEC et ENC, en prenant la médiane des périodes simulées pour chacune des hauteurs significatives considérées.

Scénario sélectionné

À l'issue des traitements statistiques, 10 scénarios (5 par méthode) présentant chacun des combinaisons de facteurs Niveau d'eau/Hauteurs significative des vagues/Période pic/Direction pic ont été retenus. L'étude Nicolae Lerma *et al.*, (2018) a permis de déterminer le scénario maximisant en terme de zones inondées relatif à chaque méthode statistique, les différences en termes de limites d'extension de la submersion et de hauteurs d'eau et ainsi l'incertitude relative liée aux méthodes statistique utilisées.

Dans la présente étude, c'est le scénario maximisant (deux méthodes confondues) qui est retenu (en rouge dans le Tableau 2) et qui servira pour simuler la submersion associée à un évènement de de type centennal.

	Scenarios				
	JEC1	JEC2	JEC3	JEC4	JEC5
Hs (m)	5,09	6,27	6,66	7,04	7,22
Tp (s)	10,0	10,9	11,2	11,5	11,7
Dp (°)	105	105	105	105	105
SWL (m/NGF)	1,14	1,10	1,05	1,01	0,92
	ENC1	ENC2	ENC3	ENC4	ENC5
Hs (m)	6,67	6,98	7,15	7,30	7,37
Tp (s)	11,2	11,5	11,6	11,7	11,8
Dp (°)	105	105	105	105	105
SWL (m/NGF)	1,14	1,10	1,08	1,03	0,96

Tableau 2 : Combinaison de paramètres déterminée par les méthodes statistiques JEC et ENC.

Cinétique des conditions marines

Le scénario de l'événement prévoit un temps de simulation de 24 h de conditions de tempête. Cette durée correspond à la durée régulièrement observée des pics de tempête sur le site d'étude. Pour chaque scénario, la dynamique du niveau moyen et des vagues aux limites des modèles a été calquée sur l'évolution des conditions de la tempête de 2013 et prévoit une concomitance des pics de niveaux et d'intensité des vagues à $t + 12$ h (cf. figure). Ce choix est maximisant en ce sens qu'il prévoit un pic simultané pour les deux variables ce qui n'est pas nécessairement le cas lors de tempêtes observées. L'évolution des conditions au cours de l'évènement est illustrée Figure 12.

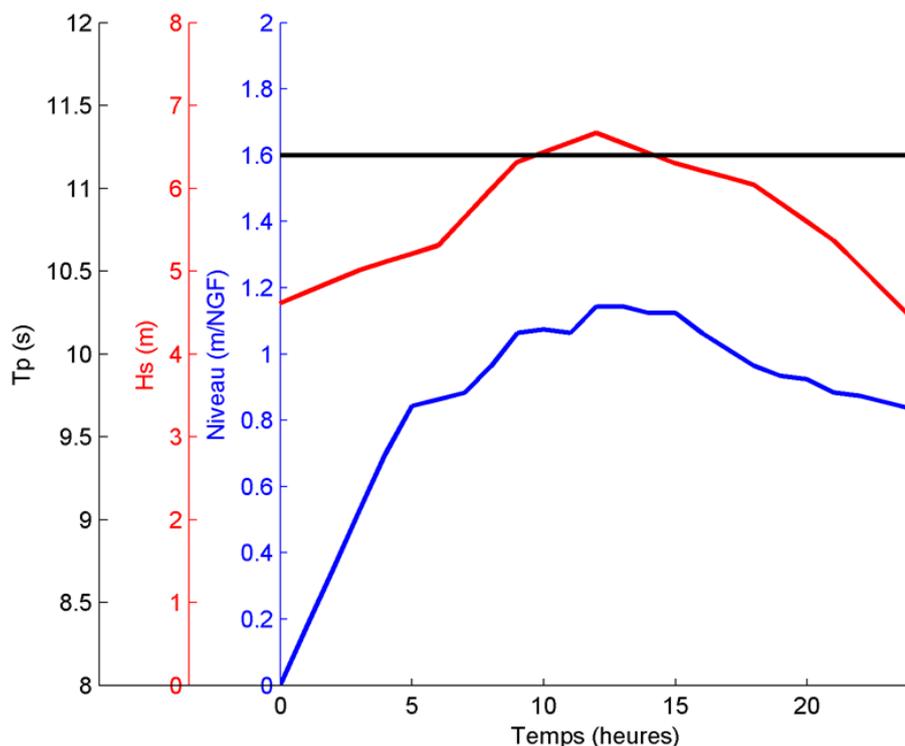


Figure 12 : Cinétique de la tempête événement de période de retour 100 ans.

Synthèse

À partir des données historiques recueillies et de méthodes statistiques permettant d'étendre les séries temporelles de données en vue de réaliser des statistiques d'extrêmes de période de retour centennale, deux scénarios de forçage au large ont été déterminés.

Le premier correspondant à la tempête de mars 2013 sera utilisé pour la validation de la performance des modèles.

Le second correspondant à un scénario maximisant de période de retour centennale servira à comparer les cartographies de la submersion marine obtenues par différentes méthodes.

4. Architecture et mise en place des modèles

4.1. MODÈLES UTILISÉS ET EMPRISES

Comme évoqué précédemment (§ 3.3), la modélisation réaliste au sens où elle intègre l'ensemble des processus pouvant provoquer des submersions et le comportement des écoulements spécifiques à terre exige l'utilisation de plusieurs modèles dont les capacités sont soit couplées (réalisation des calculs simultanément), soit chaînées (réalisation des calculs un modèle après l'autre).

La stratégie de modélisation de la submersion par débordement se base sur le couplage de codes de vagues spectraux avec un code hydrodynamique de niveaux et courants. 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). Comme évoqué dans le rapport de phase 1 (Pedreros 2016) plusieurs plateformes de modélisation permettent de réaliser ce type de couplage et ce type de simulation présente un fort degré de maturité. Nous ne présenterons ici que les modèles utilisés régulièrement au BRGM pour ces applications à savoir le modèle hydrodynamique **MARS-2DH** (Lazure et Dumas 2008), dont certains modules ont été intégrés ou adaptés pour permettre la reproduction des écoulements à terre. Ce modèle est nommé ici **MARS-Flood** et est couplé avec le code **spectral WW3** (Tolman 2009). Pour la modélisation des submersions associées au franchissement par paquets de mer, les modèles hydrodynamiques utilisés sont de type instationnaire à résolution de phase (dit vague-à-vague). Ce type de modèle permet de reproduire la dynamique du niveau d'eau instantané 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, écoulements à terre) dans la zone littorale, la zone de déferlement et à terre en cas de submersion. Ces codes de calcul sont actuellement en plein développement et très peu de produits opérationnels existent à ce jour. Le code vague-à-vague utilisé ici est le modèle de recherche **SWASH** (Zijlema *et al.*, 2011). Il est adapté pour simuler la submersion marine par franchissements de paquets de mer notamment sur des secteurs fortement urbanisés (de quelques km²) où l'on recherche une description détaillée des écoulements à terre tenant compte des interactions avec le bâti et les ouvrages. L'utilisation de ce modèle se fait en chaînage avec la plateforme de modélisation hydrodynamique évoquée précédemment. Il utilise en entrée les conditions de vagues spectrales et de niveaux d'eau issues des modélisations couplées niveau-courant-vague.

Les caractéristiques générales des modèles utilisés dans l'étude pour l'élaboration de la plateforme de modélisation peuvent être retrouvées dans le rapport phase 1 (Pedreros 2016) ou au sein de la littérature scientifique. Un descriptif synthétique de ces modèles est également disponible en Annexe 1.

Au-delà des processus fondamentaux à reproduire pour représenter la submersion de manière réaliste, deux autres contraintes principales doivent être évaluées afin d'adapter la stratégie de modélisation :

- l'extension du domaine traité (pluri-kilométriques/kilométrique) ;
- la résolution spatiale de travail qui peut être variable en fonction des caractéristiques d'aménagements de la zone étudiée (par exemple : zones urbaines ≤ 2 m vs zones naturelles ≥ 5 m).

En effet, si la modélisation des processus conduisant au débordement et la modélisation des débordements à terre est peu contrainte par les temps de calcul et la résolution spatiale de travail, la modélisation des franchissements exige à l'inverse des ressources informatiques et des temps de calculs prohibitifs dès lors que les domaines dépassent quelques kilomètres carrés.

Deux stratégies qui seront détaillées dans les parties suivantes ont donc été choisies pour traiter la submersion marine :

- stratégie 1 ou « modèle grande emprise » permet de traiter la question de la submersion à l'échelle de l'ensemble du lido (emprise en jaune et profils, Figure 13) et elle permet le développement des méthodes 2 et 3 (cf. §2.3) ;
- stratégie 2 ou « modèle local » (emprise rouge, Figure 13) est consacrée au traitement local sur des sites particulièrement sensibles et où la morphologie de front de mer est atypique ou en lien avec une vulnérabilité particulière (forte concentration urbaine). Cette stratégie permet le développement de la méthode 4 (cf. §2.3).

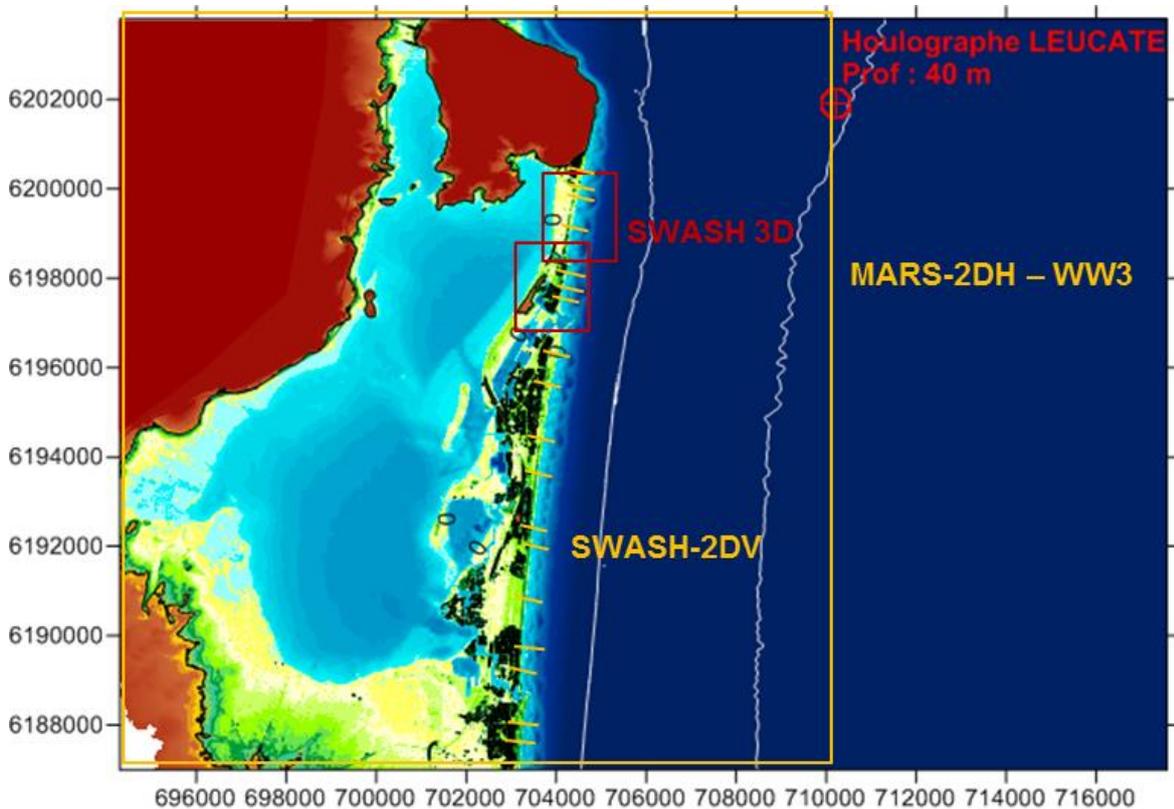


Figure 13 : Emprise des domaines de calcul pour chacun des modèles utilisés.

4.2. STRATÉGIE DE MODÉLISATION

4.2.1. Stratégie 1 ou Modèle de submersion grande emprise (méthode 2 et 3)

Au sein du modèle grande emprise (Figure 14), les variations du niveau moyen de la mer intègrent les effets de la marée, de la surcote atmosphérique, de la surcote liée au déferlement des vagues (*wave setup*). Ces niveaux variables dans le temps et l'espace ainsi que les conditions de vague évolutives à chaque pas de temps sont reprises comme données d'entrée pour simuler le déferlement des vagues et les volumes franchissant le front de mer sur des profils représentatifs de la morphologie des plages. Chaque profil est défini comme représentatif d'un tronçon de littoral pour lequel les caractéristiques morphologiques et

d'exposition aux vagues sont considérées comme homogènes. Une fois les simulations du déferlement des vagues réalisées sur les profils, une nouvelle simulation est effectuée. Elle consiste à réinjecter les valeurs de volumes franchissant le front de mer au sein du modèle hydrodynamique configuré pour permettre de reproduire les écoulements à terre en fonction des caractéristiques d'occupation du sol.

Fiche modèle

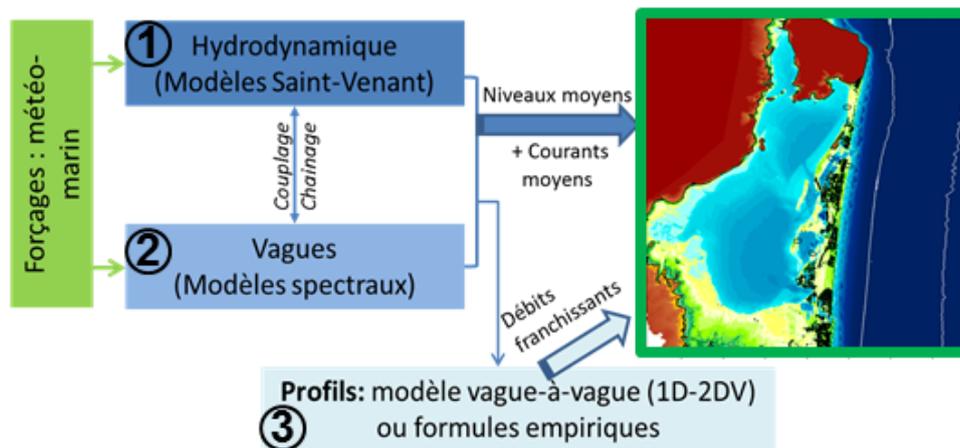


Figure 14 : Approche mixte franchissement et débordement.

Fiche descriptive de la plateforme modèle
<ul style="list-style-type: none"> > Domaine : Ensemble de la façade de la lagune (≈ 17 x 15 km) > Résolution spatiale : 10 m > Durée (temps réel) : 24 h à plusieurs jours > Modèles /Processus <ul style="list-style-type: none"> • Modèle MARS-Flood/WW3 - Niveau d'eau intègre = Marée + surcote + wave setup • Modèle SWASH 2DV - Déferlement des vagues et volumes franchissants <ul style="list-style-type: none"> > Représentation de l'urbain : <ul style="list-style-type: none"> - Rugosités hétérogènes/bâtiments implicites - Éléments structurants (front de mer) - Singularités hydrauliques (canaux, seuils, écluses, buses...)

Plusieurs maillages ont été réalisés pour procéder aux simulations.

Le modèle hydrodynamique repose sur un domaine de calcul dit « structuré » c'est-à-dire constitué d'éléments de mailles carrées de 10 m * 10 m (Figure 14).

Le modèle spectral repose quant à lui sur un maillage « flexible », constitué d'éléments triangulaires de taille variable et dont le raffinement (résolution) est accentué sur les secteurs d'intérêt, particulièrement dans les secteurs où les contraintes liées la bathymétrie (petit fond) ou à la forme du trait de côte (passes, ouvrages côtiers...) sont fortes. Les résolutions obtenues au large sont d'une taille de l'ordre de 500 m, 300 m dans l'étang et 10 m sur le littoral ainsi que dans les passes du lido.

Pour réaliser le couplage les résultats obtenus par le modèle spectral sur maille flexible sont ré-interpolés aux dimensions et caractéristiques du maillage structuré exploité par le modèle hydrodynamique.

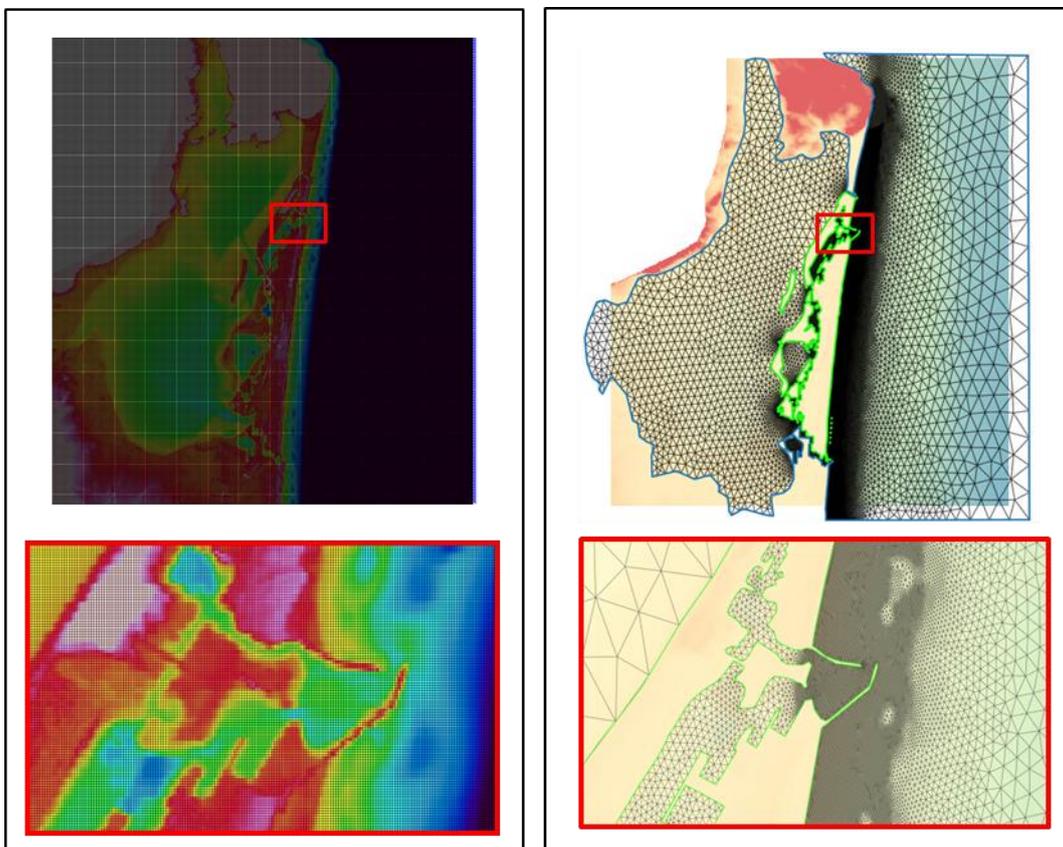


Figure 15 : Maillage structuré à gauche utilisé par le modèle MARS-2DH et maillage non structuré à droite utilisé par WW3.

La modélisation vague à vague est réalisée sur la base de profil de plage de résolution spatiale homogène de 1 m (Figure 16). La modélisation est dite 2DV car la colonne d'eau soit segmentée en plusieurs couches. Dans notre application, une discrétisation en 2 couches est suffisante pour reproduire avec une précision satisfaisante les comportements hydrodynamiques dans la zone de déferlement.

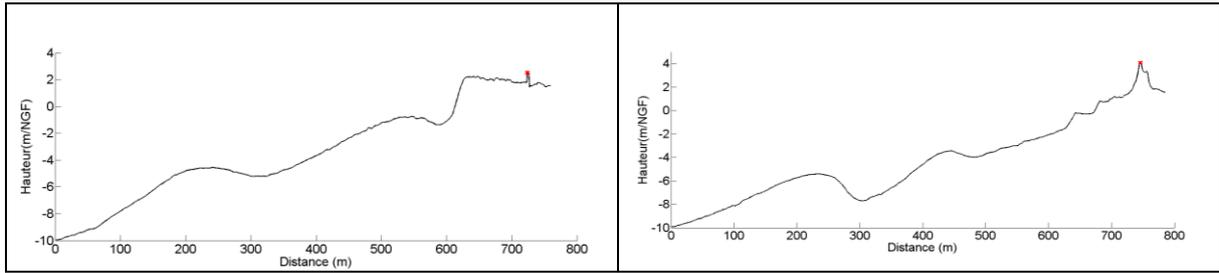


Figure 16 : Exemples de profils utilisés pour la modélisation des franchissements (profil Leucate-Plage à gauche et Mourets à droite, la croix rouge est le point d'extraction des volumes franchissant, au sommet du muret de front de mer pour Leucate-Plage, au sommet de la dune pour Mourets).

Ci-dessous Figure 17, la dynamique des volumes franchissants instantanés sur un profil

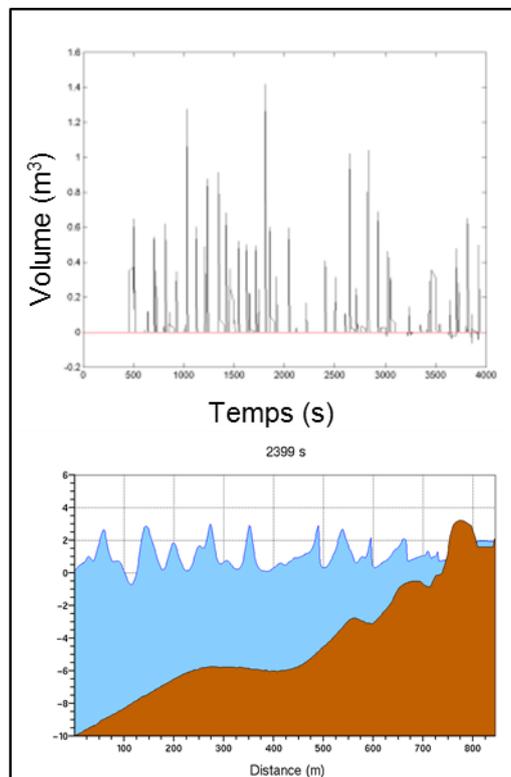


Figure 17 : Exemple de simulation de volumes franchissants.

4.2.2. Stratégie 2 ou modèles de submersion locaux (méthode 4)

Les modèles locaux sont des modèles indépendants couvrant quelques kilomètres carrés du lido (Figure 18). Leur mise en place permet à partir d'une série temporelle de variation du niveau d'eau (incluant les effets de marée et de surcote atmosphérique) et de conditions de vagues au large, de simuler le déferlement des vagues et les processus associés : la surcote liée au déferlement des vagues (*wave setup*) et le jet de rive. Au sein de ces modèles les franchissements et la propagation des inondations sont simulés par pas de temps successifs de 20 min. À terre, la propagation des écoulements est contrainte par une représentation explicite des bâtiments (considérés comme des blocs pleins et imperméables) et une rugosité du sol adaptée.

Fiche modèle

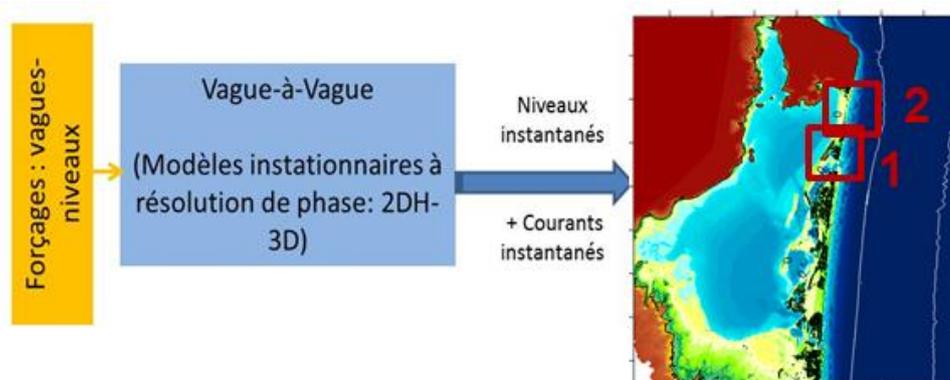


Figure 18 : Approche intégrée des submersions par franchissement et potentiel débordement.

Fiche descriptive de la plateforme modèle	
>	Domaine : Unité spatiale du lido ($\approx 2 \times 2$ km)
>	Résolution spatiale : 2 m
>	Durée (temps réel) : 12 h
>	Modèle : SWASH 3D
>	Processus modélisés : Marée + surcote + wave setup + runup
>	Représentation de l'urbain :
-	Rugosités hétérogènes/bâtiments explicites
-	Éléments structurants front de mer

La mise en place de ces modèles nécessite de travailler à une résolution spatiale fine. La résolution doit permettre de simuler correctement la forme des vagues et leur transformation lors du déferlement. Elle doit également être adaptée pour reproduire au plus près la géométrie des bâtiments ou des ouvrages de protection. Les modèles reposent sur une grille d'éléments carrés de résolution spatiale 2 m.

Deux modèles ont été mis en place (Figure 19), ils couvrent de manière indépendante, le secteur du village naturiste et la zone du Mouret. Ces deux sites ont été privilégiés au sein du lido car :

- ils ont été inondés à des degrés divers lors de tempêtes récentes ;
- les inondations ont été principalement ou exclusivement causées par des franchissements ;
- ils permettent d'analyser la dynamique de submersion dans des contextes très différents, dans un cas (modèle 1), concentration d'enjeux urbains positionnés en front de mer, dans l'autre (modèle 2), zone naturelle formant une dépression topographique propice à l'accumulation d'eau.

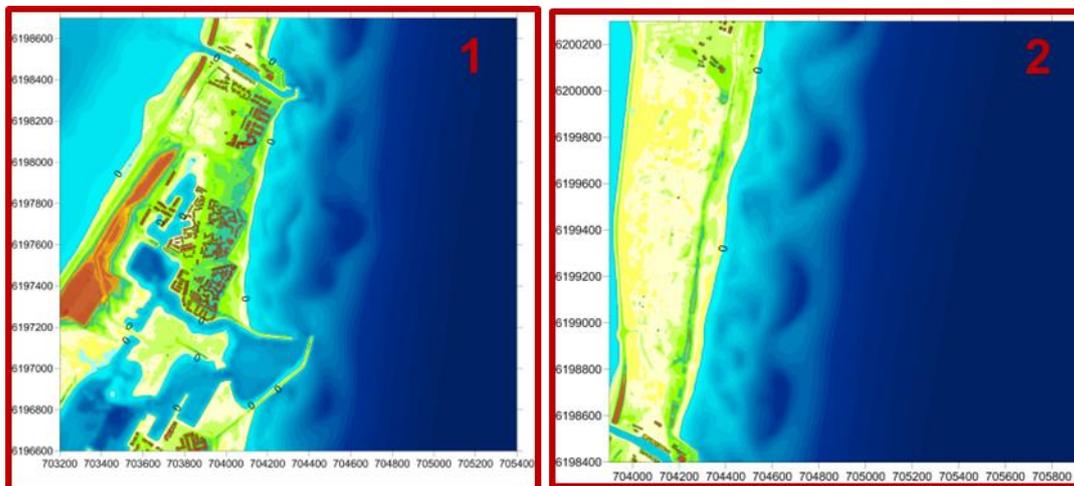


Figure 19 : Emprise spatiale des modèles locaux de submersion. (1) de Port Leucate au grau de Leucate – (2) du grau de Leucate au Mouret.

Synthèse

Plusieurs stratégies de modélisation ont été mises en place pour reproduire les processus à l'origine des submersions (débordement et franchissement). Chaque modèle est exploité à une résolution différente afin d'assurer un compromis satisfaisant entre reproduction des processus physiques modélisés, représentation de l'espace urbain et temps/moyens de calcul.

Trois modèles ont été mis en place, un modèle « grande emprise » permettant de traiter la submersion marine à l'échelle de l'ensemble du lido et deux modèles dits « locaux » permettant un traitement à haute résolution de la submersion sur des secteurs particulièrement sensibles.

5. Données et traitements nécessaires pour la modélisation de submersion marine

Le rapport phase 1 (Pedreros 2016) a illustré de manière exhaustive les traitements à réaliser pour passer d'une donnée topo-bathymétrique brute à une surface adaptée à la modélisation numérique de la submersion (Figure 20). De nombreux traitements et contrôle des données sont nécessaires, on détaillera ci-après les principales étapes.

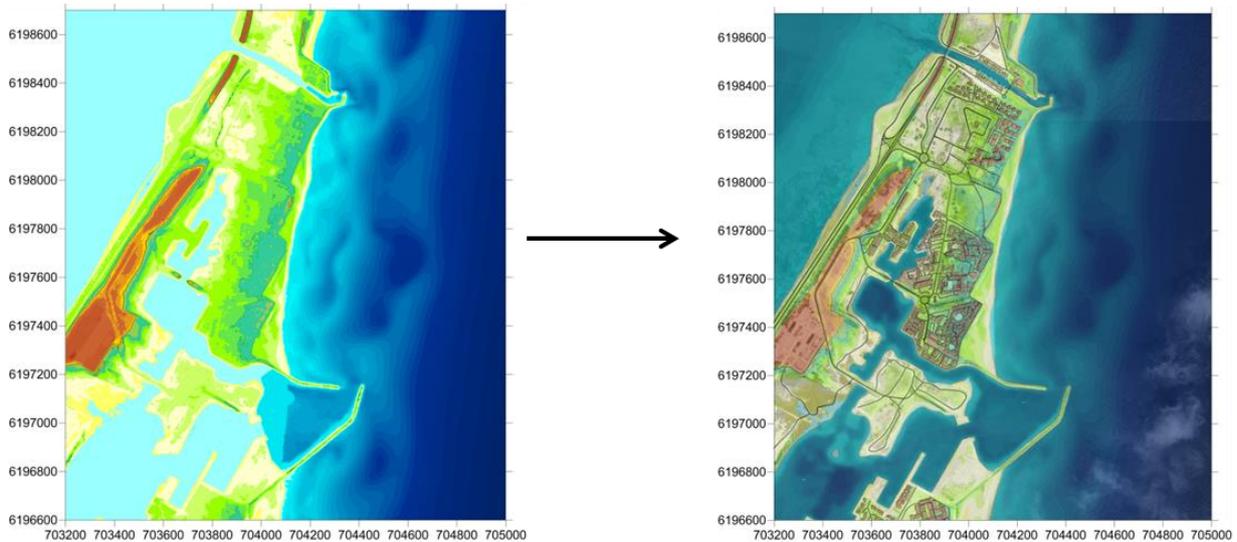


Figure 20 : Illustration du passage d'un produit « brut » LIDAR à une surface adaptée à la modélisation des submersions.

5.1. DONNÉES TOPO-BATHYMÉTRIQUES DE HAUTE PRÉCISION (MNT ET MNB)

5.1.1. Intégration des données bathymétriques

La mise en place d'une modélisation haute résolution de la submersion marine nécessite une représentation fine de la bathymétrie et de la topographie du secteur d'étude afin d'assurer un continuum terre-mer. Un travail important de collecte et de traitement de données est nécessaire afin de représenter avec précision ces éléments du site d'étude (parties terrestres, lagune, passes, port, proche côtier, haute mer).

La donnée Litto3D© (SHOM-IGN) à haute-résolution (1 m) levée en 2011, constitue le socle des données utilisées pour constituer le modèle numérique pour la modélisation. Toutefois, cette donnée ne couvre que la partie terrestre et la bathymétrie externe du front de mer jusqu'à une profondeur d'environ 10 m. Un certain nombre de données ont donc dû être ajoutées pour disposer d'une topo-bathymétrie complète (Figure 21) :

- dalles bathymétriques du SHOM pour le large (profondeurs supérieures à 10 m) ;
- levés portuaires de 2001 et 2003 (DREAL LR) pour Port-Barcarès ;
- levés multifaisceaux de 2012 (Mesuris) et monofaisceau (Asconit) pour Port-Leucate ;
- levés de la campagne IFREMER, 2001 (SMNLR, sextant IFREMER) pour la bathymétrie de l'étang.

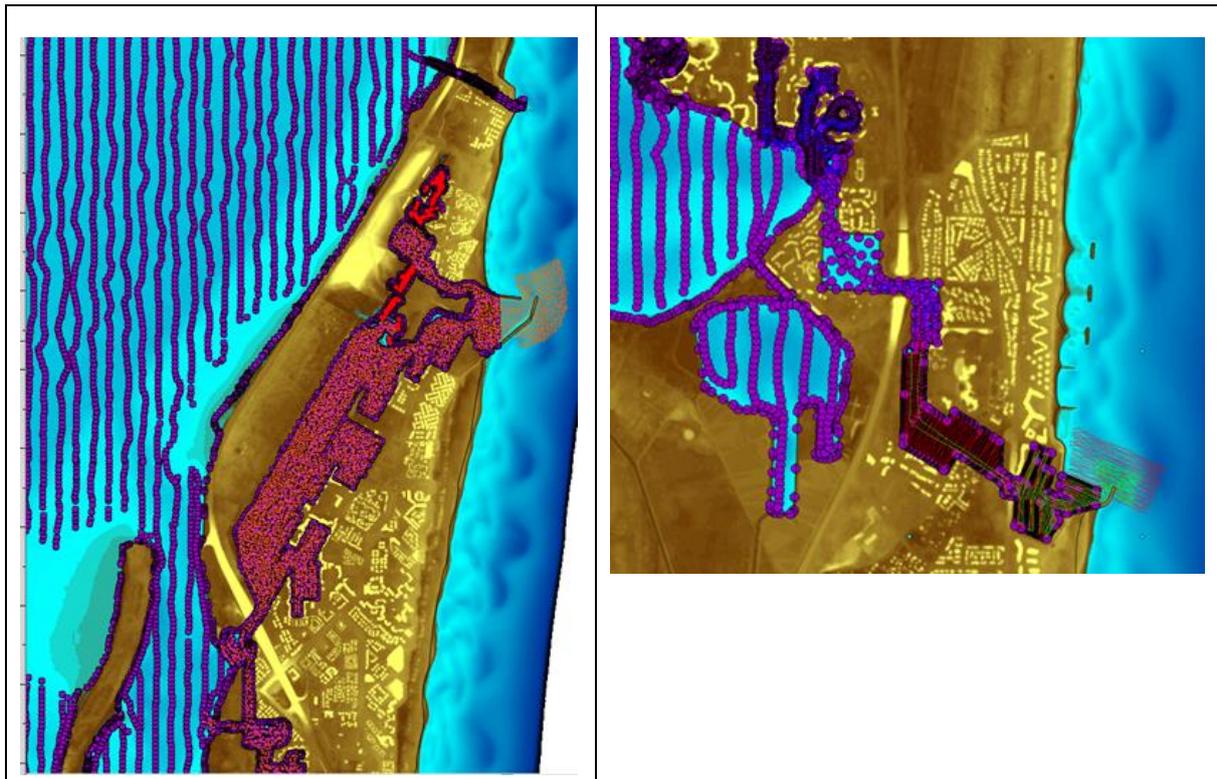


Figure 21 : Exemple des compositions de sondes pour Port Leucate à gauche et Port Barcarès à droite.

5.1.2. Traitement des données topographiques

La partie terrestre de la donnée Litto3D© a également été traitée pour être adaptée à la modélisation. De manière générale, la donnée est disponible sous forme d'une grille régulière de points (mailles carrées de 1 m de côté) dont l'altitude est connue avec une précision ayant une moyenne quadratique de 0,2 m en terrain plat et sans végétation.

Sur cette donnée de base, lorsque des transects du MNT sont réalisés sur secteurs plats comme des routes par exemple (voir Figure 22), on constate des variations de l'altitude de 0,1 m à 0,2 m sur de courtes distances (inférieures à 5 m). Cet effet « nid de poule » est artificiel et nuit à une bonne représentation des écoulements car ces aspérités artificielles peuvent induire de manière inappropriée des chenalizations ou freiner les écoulements.

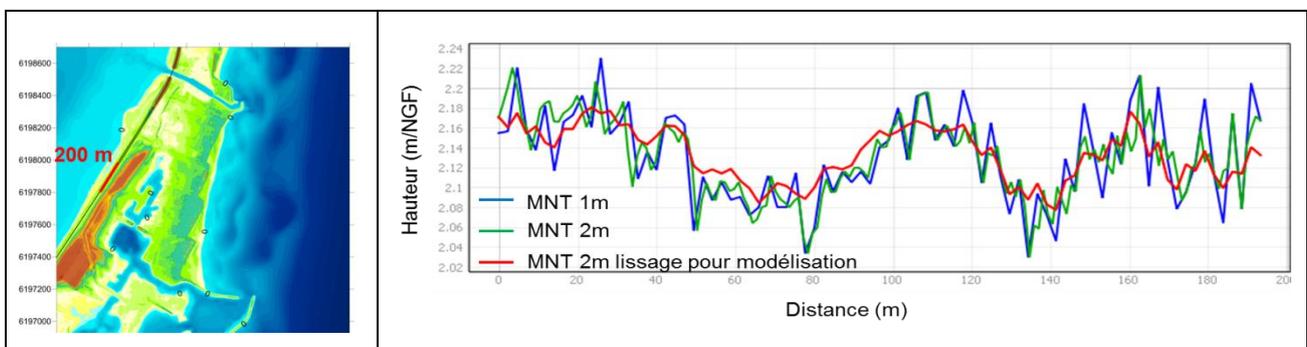


Figure 22 : Exemple d'aspérité et de lissage effectué sur un transect situé sur une route.

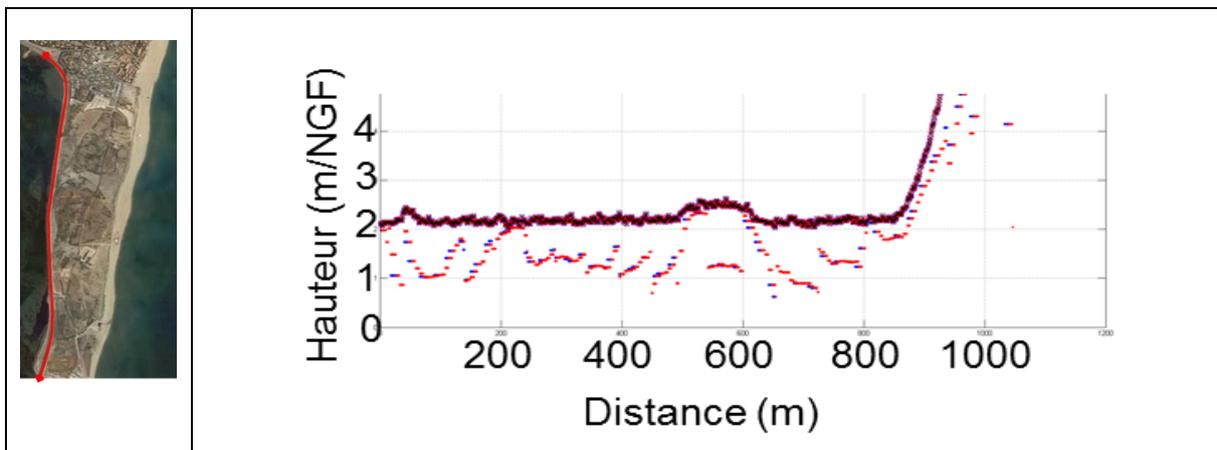
Afin de minimiser cet effet, le traitement réalisé ici a consisté en l'application d'un lissage suivant une moyenne glissante sur 5 mailles. Ce traitement permet de réduire de manière satisfaisante les aspérités ou « bruits » en n'altérant pas la morphologie générale. Ce traitement n'est utile que pour la mise en place de modélisation haute résolution. Elle n'a donc été réalisée que pour les modèles « locaux ».

5.1.3. Traitement des éléments urbains structurants

Comme évoqué précédemment lors de la présentation des caractéristiques des modèles la résolution spatiale de calcul pour le modèle grande emprise (10 m) et les modèles locaux (2 m) est inférieure à la résolution initiale du MNT LIDAR. Cela implique que pour constituer les surfaces de modélisation les données doivent être ré-échantillonnées. Pour ce faire, et afin de conserver une représentation des éléments susceptible de contraindre la submersion et les écoulements plusieurs étapes sont réalisées.

Pour le modèle grande emprise de résolution 10 m :

- ré-échantillonnage du MNT à la résolution 10 m ;
- identification des éléments structurants (routes digues, front de mer, muret de front de mer...);
- extraction depuis le MNT-1m ou de levés D-GPS des altitudes de ces éléments ;
- correction du MNT avec ces cotes (cf. Figures 23 et 24).



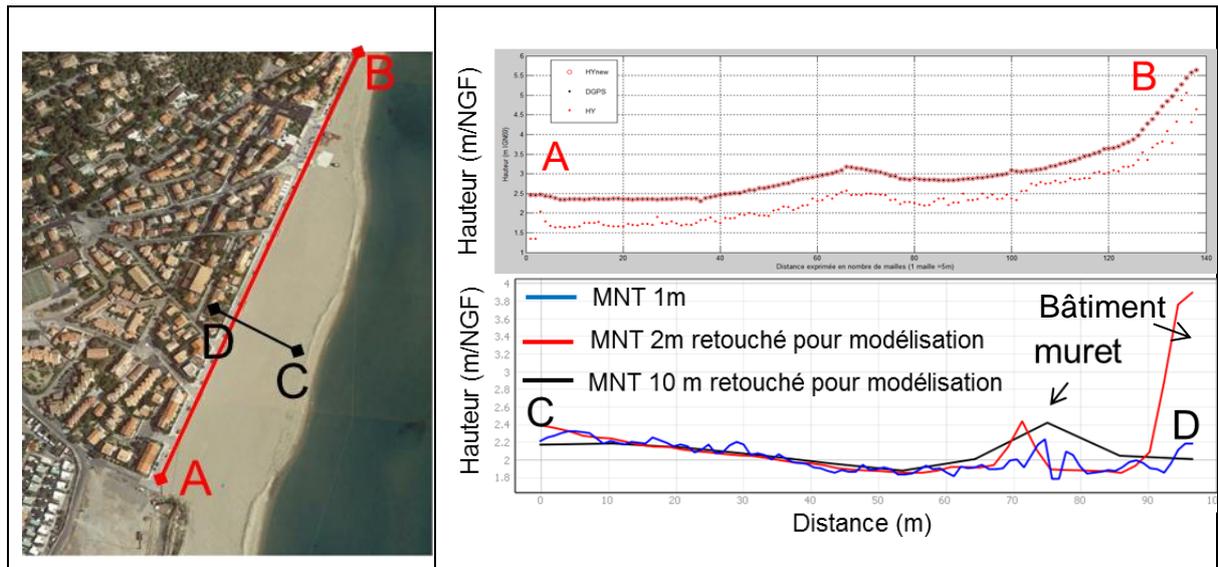


Figure 24 : Correction des MNT 10 m (modèle grande emprise) et 2 m (modèle local des Mourets), à partir de données D-GPS. Le transect A-B représente en long, la correction appliquée au niveau du muret ; les points rouges correspondent à la hauteur du sol dans le MNT 1 m, les points noirs à la hauteur du sol après traitement et correction à partir de données D-GPS. Le transect C-D représente en coupe, la correction appliquée permettant de réintégrer la présence du muret dans les modèles à 2 m et à 10 m de résolution.

5.2. DONNÉES D'OCCUPATION DU SOL – MNF (MODÈLE NUMÉRIQUE DE FROTTEMENT)

La représentation de l'occupation du sol est un paramètre important à prendre en compte dans les modèles afin d'assurer une bonne représentation des écoulements. Cette occupation du sol est prise en compte dans les modèles via un coefficient de frottement variable en fonction du type de couverture du sol (sol nu, végétation nulle, herbacée, arbustive ou forêt), le type de matériaux (sable, terre, ciment, goudron) ainsi que le type d'urbanisation en fonction de sa densité.

Dans cette étude, une représentation spatialisée de la rugosité a été réalisée sous la forme de Modèle Numérique de Frottement (MNF, voir Figure 25). Il a été élaboré à partir d'une classification de l'occupation des sols issue des données Corine Land Cover de 2006 et d'un travail de correction et réajustement des limites des secteurs de rugosité différenciés à partir de photographies aériennes. Un traitement particulier a été notamment réalisé pour la représentation des routes qui sont des zones où la circulation de l'eau est facilitée de par l'absence d'obstacles et la nature des matériaux (béton d'où asphalté).

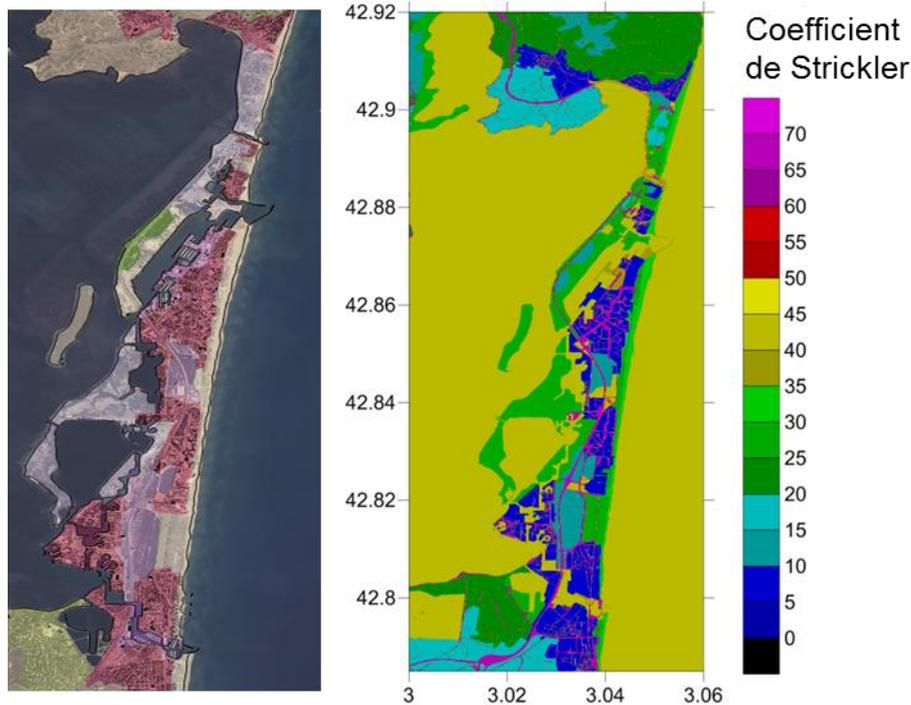


Figure 25 : Exemple de passage de la donnée Corine Land Cover à un MNF ($m^{1/3}.s^{-1}$).

Les valeurs utilisées pour caractériser la rugosité sont celles préconisées par différentes sources et sont applicables pour les études domaines marins et côtiers (Bunya *et al.* 2010, Tableau 3).

Deux MNF ont été réalisés pour être utilisés en cohérence avec la résolution spatiale de calcul. En effet, il existe plusieurs manières de représenter les zones urbaines dans les modèles et la manière la plus adaptée dépend principalement de la résolution spatiale de travail.

Pour une modélisation des submersions et des écoulements en milieu urbain à une résolution supérieure ou égale à 10 m, la méthode la plus couramment utilisée consiste à considérer les zones urbaines de manière intégrée. Les bâtiments et autres éléments urbains sont considérés de manière implicite en attribuant une forte rugosité pour reproduire la forte contrainte aux écoulements dans les zones urbaines.

En revanche pour une modélisation à une résolution de l'ordre de 1 à 2 m en milieu urbain, la méthode privilégiée est de reproduire les bâtiments de manière explicite. Cette approche qui nécessite un traitement spécifique est décrite dans le paragraphe suivant. Dans ce cadre-là, la rugosité appliquée aux zones urbaines est faible et correspond au revêtement des rues, généralement équivalent à de l'asphalte.

Les valeurs de rugosité utilisées après regroupement des classes de la BD Corine Land Cover (d'après Bunya *et al.* 2010) sont exprimées par le coefficient de Strickler (Tableau 3). Un coefficient élevé correspond à une surface lisse ; faible, à une surface rugueuse.

Type de couverture	Strickler coefficient en $m^{1/3}/s$
Forêt de pin	10
forêt	10
Dune avec buissons	15
Zone agricole	17-20
Dune végétalisée	25
Sable	33
Espace vert urbain	33
Zone industrielle	40
Fond marin	40
Asphalte	67

Tableau 3 : Valeurs des coefficients de frottement utilisés.

5.3. DONNÉES RELATIVES À L'IMPLANTATION DU BÂTI – MNE (MODÈLE NUMÉRIQUE D'ÉLEVATION) ET DES SINGULARITÉS HYDRAULIQUES

5.3.1. Intégration du bâti

Dans le cas des modèles locaux, le milieu urbain a été pris en compte de manière explicite (c'est-à-dire que les bâtiments sont considérés comme des blocs imperméables). Pour ce faire un MNE adapté pour la modélisation a été réalisé en exploitant les données Litto3D© 1m. Les principales étapes de cette construction sont représentées Figure 26.

À partir du MNE « brut » relevé par le LiDAR qui intègre à la fois les caractéristiques du sol et de tout ce qui le recouvre (arbres et végétation, bâti, mais aussi véhicules, aménagements temporaires...) une extraction des zones bâties est réalisée. La délimitation des zones bâties est issue de la couche « bâti » (bâti indifférencié, industriel et remarquable) de la BD Topo de l'IGN. N'ont été retenues ici que les surfaces >20 m². Cette extraction qui constitue une couche « bâti » a été fusionnée avec le MNT 1 m ayant subi les traitements précédents (paragraphe 5.1.2)

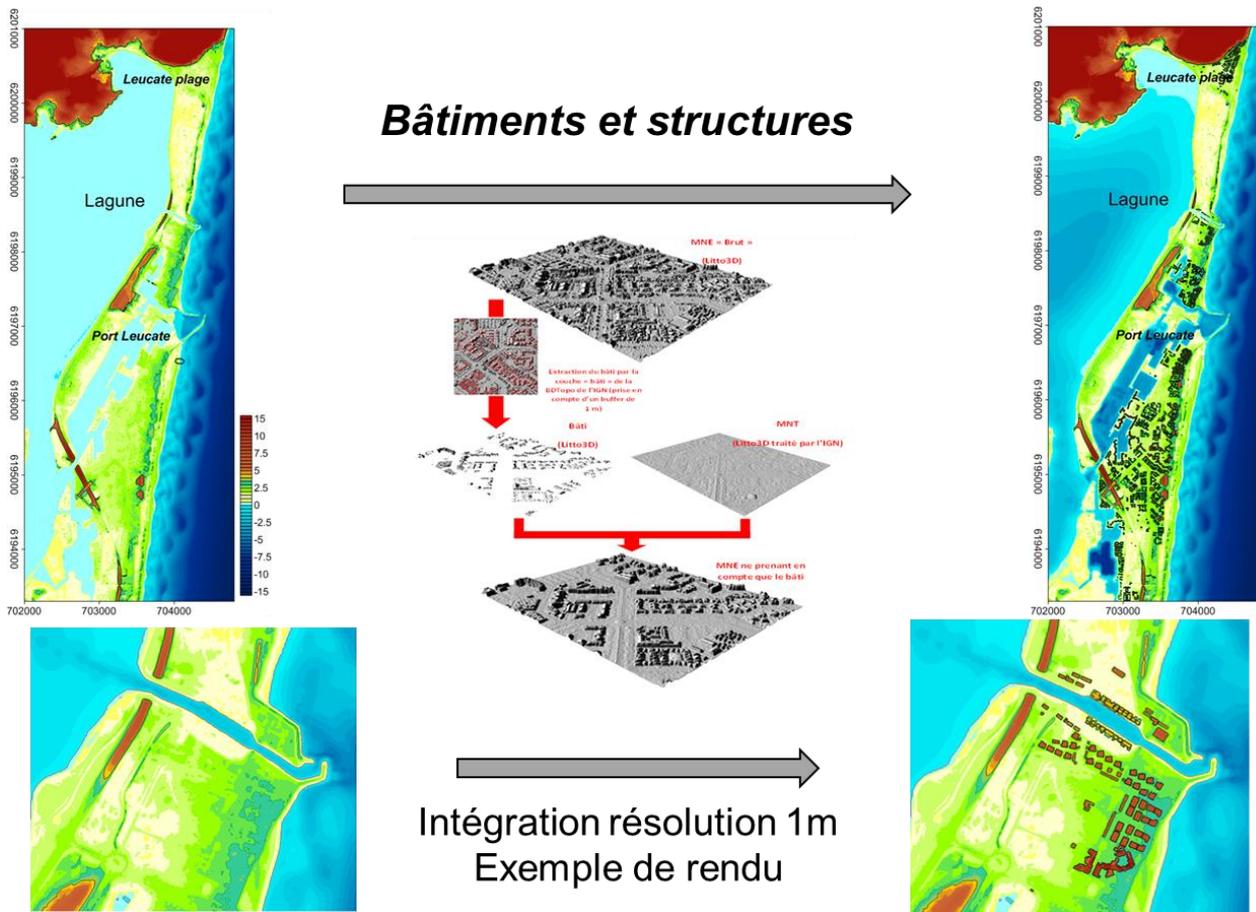


Figure 26 : Illustration de la méthode d'intégration du bâti pour la modélisation à haute résolution.

5.3.2. Prise en compte des singularités hydrauliques

La présence d'ouvrages hydrauliques de tous types (pont cadre, écluse, buses...) peut jouer un rôle important dans la dynamique des écoulements. La simulation réaliste de la submersion marine passe donc par la localisation et la caractérisation (géométrie, fonctionnement) de ces ouvrages. Les principaux ouvrages recensés sur le site du lido sont localisés sur la commune de Leucate, sous la route nationale. Ils permettent de faire communiquer la lagune et la zone du Mouret. La dimension de ces ouvrages est inférieure à la taille des mailles de calcul et les régimes d'écoulement potentiel nécessitent d'intégrer ces éléments au sein du modèle comme des singularités hydrauliques. Pour des précisions sur les types de régime hydraulique se référer à Pedreros 2016.

Ces buses ont été intégrées au sein du modèle, leur caractéristiques d'écoulement ont été paramétrées buse par buse conformément à leur état de comblement lors d'une campagne de terrain réalisée au printemps 2015 (cf. Figure 27). Lors de cette campagne, la section permettant les écoulements était significativement réduite du fait de comblement important.



Figure 27 : Buses d'évacuation sous la RN.

Synthèse

Afin de réaliser des modèles numériques adaptés à la simulation numérique de nombreux traitements ont été réalisés. Ces traitements destinés à assurer une bonne reproduction des processus à l'origine des submersions et une reproduction réaliste des écoulements à terre sont de natures différentes en fonction de la résolution à laquelle sont réalisées les simulations. Certains de ces traitements permettent également d'envisager des scénarios de défaillances, d'ouvrages de protection ou des systèmes d'évacuation des eaux par exemple.

6. Résultats

6.1. ÉVÈNEMENT HISTORIQUE (MARS 2013)

Une des difficultés pour évaluer la fiabilité des modélisations de submersion marine est le manque de données précises permettant de définir à terre les limites maximales d'inondation, les hauteurs d'eau, la vitesse des écoulements ou la temporalité des inondations. Des moyens indirects permettent toutefois de s'assurer de manière semi-quantitative de la pertinence des résultats de simulations.

Sur le site du lido, les ports (Leucate et Le Barcarès), ne disposant pas de marégraphe ou d'appareils de mesure permettant d'enregistrer le niveau d'eau dans les ports, l'ensemble des données disponibles sur les niveaux d'eau pour la validation sont indirectes et issues de photos, prises à des heures différentes en plusieurs lieux du site d'étude. Les hauteurs d'eau sur ces photos peuvent être déterminées à partir de repères sur le terrain (quais, trottoirs, murets...) et ont été mesurées au D-GPS lors d'une campagne réalisée dans le cadre du projet CRISSIS. L'analyse des documents existants et des témoignages des services techniques de la mairie de Leucate a ainsi permis de déterminer que lors de l'évènement de tempête de mars 2013, les niveaux d'eau atteints dans le port de Leucate sont de l'ordre de 0,85 m NGF +/- 5 cm (Nicolae Lerma *et al.*, 2018).

Les principales submersions observées durant cet évènement sont imputables à des franchissements de paquets de mer ayant affectés le front de mer du village naturiste mais également à l'ouverture d'une brèche couplée à des franchissements au niveau du front de mer de Leucate plage.

6.1.1. Stratégie 1 : Validation du modèle grande emprise

Deux configurations ont été utilisées pour simuler la submersion associée à l'évènement de mars 2013 avec le modèle grande emprise (cf. Figure 28). La première a consisté à exploiter le modèle uniquement pour simuler les submersions par débordement (Méthode 2). La seconde configuration intègre à la fois les débordements et les franchissements selon des profils (Méthode 3).

Les submersions représentées par le modèle en configuration 1 (uniquement débordement) présentent des résultats conformes aux témoignages disponibles. Les témoignages comme les simulations montrent que les submersions par débordements n'ont que légèrement affecté les quais à l'entrée de la zone du port de Port Leucate. On n'observe pas de surverse au niveau du quai du port de plaisance. La seule zone considérablement affectée lors de cet évènement par des débordements est la zone naturelle et non urbanisée à l'ouest du Port de Leucate (cf. Figure 28).

Cette configuration ne permet pas de prendre en compte les franchissements qui ont été à l'origine de la majorité des submersions lors de cet évènement. En effet, comme on peut le constater Figure 28, les secteurs de Leucate plage et du Mouret (respectivement repères 1 et 2) sont considérablement affectés, dès lors que l'on intègre les franchissements. On note également que pour la zone du village naturiste (repère 3), on n'observe pas de franchissement avec le modèle grande emprise.

Cette sous-estimation des zones potentiellement affectées par l'approche grande emprise s'explique par les nécessaires hypothèses à réaliser pour sa mise en place. Particulièrement ici, la sélection d'un profil représentatif du tronçon de littoral. Toutefois, ici, plusieurs profils

pouvant être considérés comme représentatifs ont été testés et présentent systématiquement l'absence de franchissement pour ce scénario.

Ce point est discuté dans la sous-partie suivante. Enfin, plus au sud et jusqu'au Barcarès les simulations ne montrent pas de franchissement notable sur les profils choisis (cohérent avec les informations de terrain collectées).

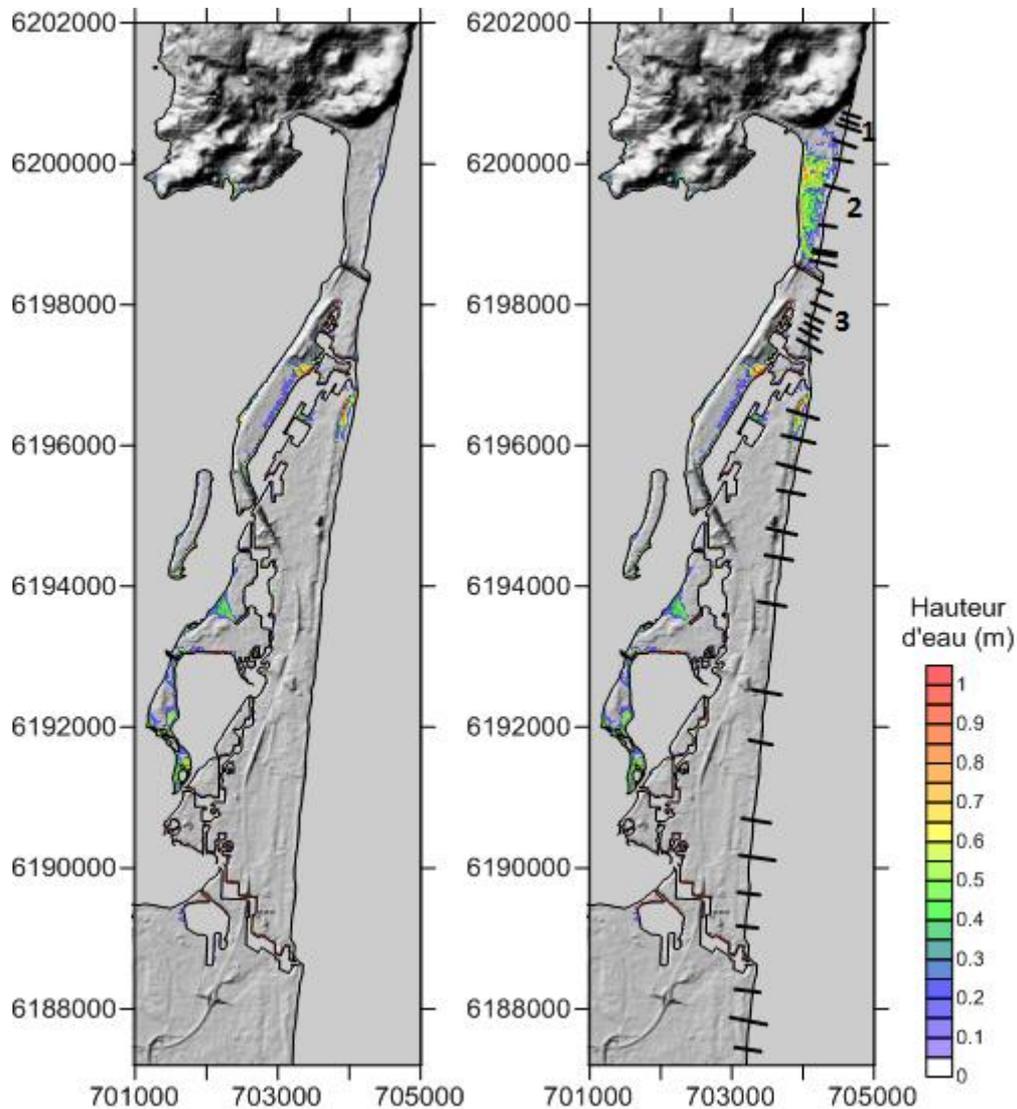


Figure 28 : Cartes issues de la modélisation grande emprise pour l'évènement historique (hauteur d'eau à terre), à gauche ne tenant compte que des débordements (méthode 2), à droite intégrant débordements et franchissements (méthode 3, les segments noirs indiquent la localisation des profils types).

6.1.2. Stratégie 2 : Validation des modèles locaux

La zone du village naturiste a été affectée de manière conséquente durant la tempête de mars 2013. Des photos et des vidéos prises durant l'évènement permettent d'apprécier au moins qualitativement la conformité des résultats de simulation avec les témoignages disponibles. Le modèle utilisé pour reproduire les conséquences de l'évènement est ici le modèle local 1. Les simulations comprennent les 4 heures de pic de la tempête (Figure 29).

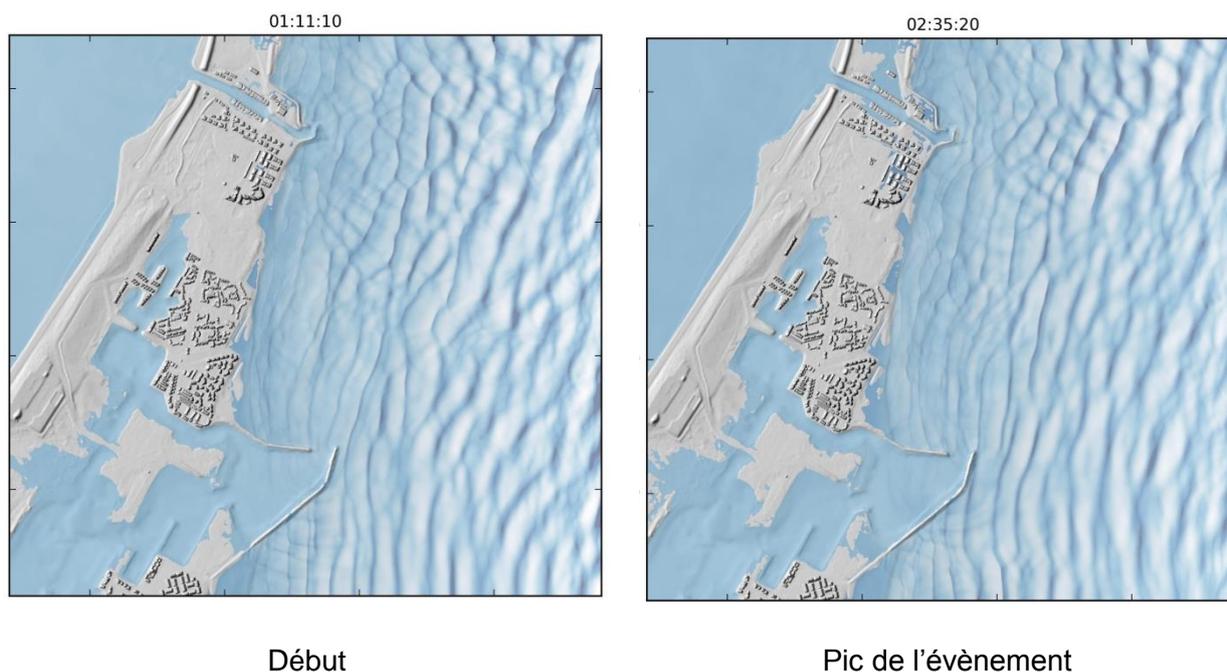


Figure 29 : Simulation des submersions lors de la tempête de mars 2013, modèle local 1.

La comparaison des résultats de modélisation et des documents disponibles (photos et films) montrent que les modèles représentent de manière assez fidèle les submersions tant du point de vue de l'extension des zones inondées que des hauteurs d'eau. Concernant l'extension des submersions bien que les documents disponibles ne permettent pas de recenser de manière exhaustive les zones inondées, les simulations présentent des inondations dans chacune des zones où celles-ci ont pu être observées. Par ailleurs, comme on peut le voir sur la Figure 30, les hauteurs d'eau dans les rues ont été relativement faibles (10 à 20 cm). Ceci est également correctement reproduit par le modèle.

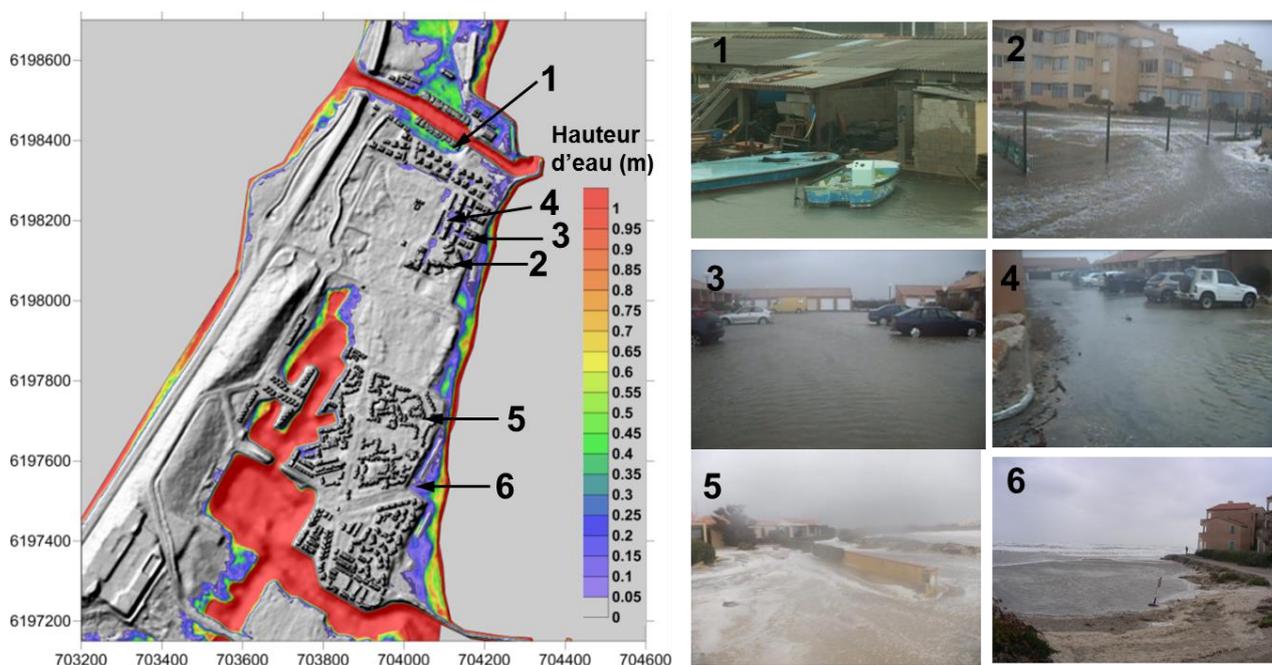


Figure 30 : Cartographie des inondations lors de la tempête (après le pic) et témoignages photos.

Compte tenu des informations disponibles, on peut considérer que les simulations de submersions réalisées avec le modèle local reproduisent correctement l'évènement de mars 2013, les zones simulées comme inondées étant conformes aux observations.

L'approche avec le modèle local, permet de tenir compte de l'ensemble des variétés morphologiques de la plage et des différentielles le long de la plage de la dynamique du jet de rive. L'approche locale permet ainsi de simuler les franchissements ponctuels et très localisés.

6.2. ÉVÈNEMENT DE TYPE CENTENNAL

Comme évoqué dans la partie 3.2, le scénario extrême est caractérisé par des conditions marines de période de retour 100 ans en envisageant la synchronisation des pics de niveau d'eau avec le pic d'intensité des vagues. Pour l'ensemble des éléments concernant ce scénario, se reporter partie 3.2.

6.2.1. Stratégie 1 : Modèle grande emprise

De manière similaire à la reproduction de l'évènement historique, deux configurations ont été utilisées pour simuler la submersion associée à l'évènement centennal avec le modèle grande emprise. La première (Méthode 2) a consisté à exploiter le modèle uniquement pour simuler les submersions par débordement. La seconde configuration (Méthode 3) intègre à la fois les débordements et les franchissements.

Pour ce scénario on peut observer plusieurs points concernant les submersions par débordements (cf. Figure 31) :

- 1) la zone de Leucate plage n'est pas affectée par les débordements ;
- 2) la zone naturelle du Mouret est légèrement impactée là où le cordon dunaire est le plus bas ;
- 3) le rivage de la partie interne du village naturiste (bassin du port) est affecté ;
- 4) les zones basses non aménagées au nord et ouest de Port Leucate sont considérablement affectées ;
- 5) la zone de Port Leucate est affectée par des hauteurs d'eau de plus de 20 cm et jusqu'à 50 cm au niveau de la capitainerie et de la zone technique du port ;
- 6) le front de mer de Port Leucate n'est pas affecté par les débordements ;
- 7 et 8) le Barcarès n'est pas affecté par les débordements.

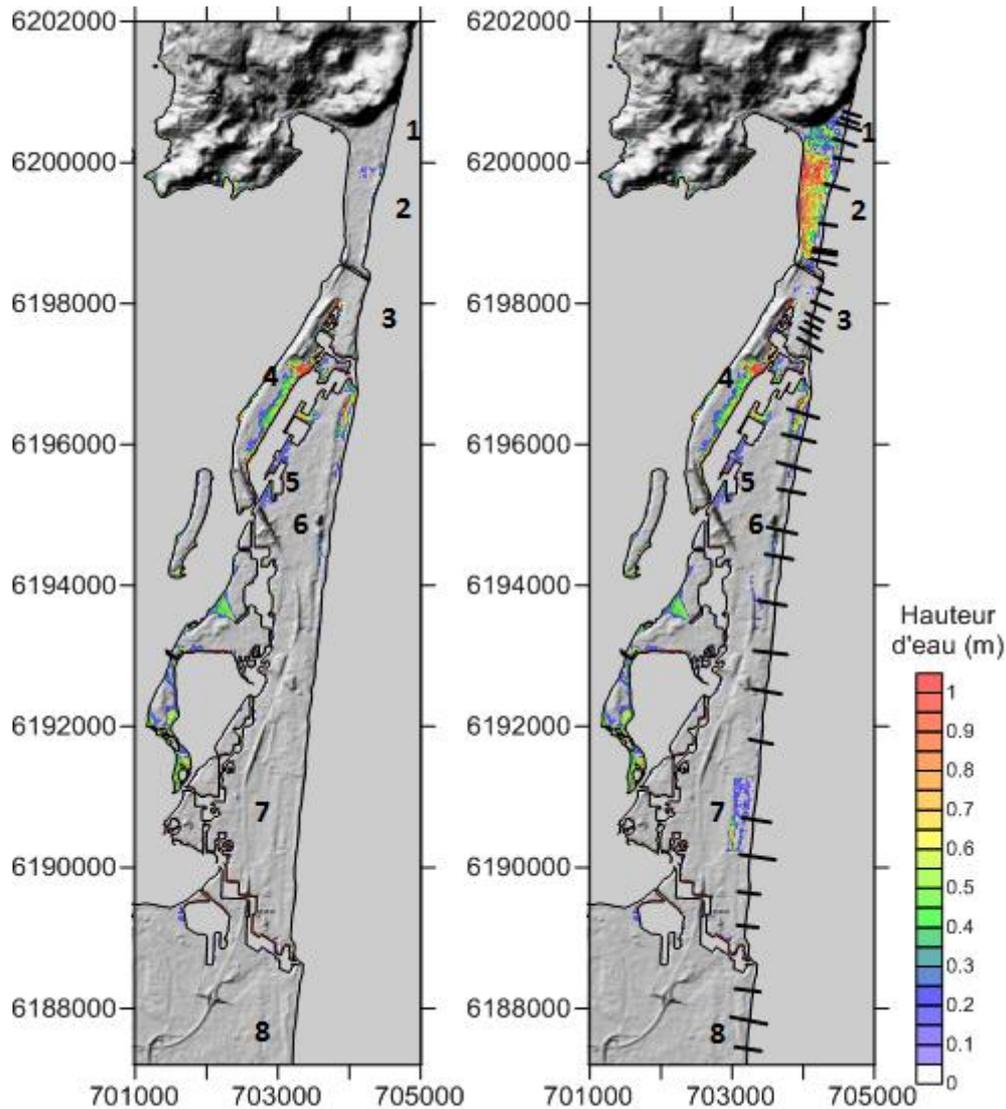


Figure 31 : Cartes issues de la modélisation grande emprise pour l'évènement de type centennial (hauteur d'eau à terre), à gauche ne tenant compte que des débordements (méthode 2), à droite intégrant débordements et franchissements (méthode 3, les segments noirs indiquent la localisation des profils types).

Concernant spécifiquement les submersions par franchissement (Figure 31 droite) :

- 1) le secteur urbain de Leucate plage est affecté par des franchissements importants. Les volumes d'eau franchissants couvrent le quartier sous plusieurs dizaines de centimètres d'eau. Les hauteurs d'eau peuvent dépasser 50 cm au niveau de certains points bas ;
- 2) la zone du Mouret est presque totalement couverte par les eaux, avec des hauteurs d'eau proche du mètre en de nombreux secteurs ;
- 3) le front de mer du nord du village naturiste est affecté par les franchissements. Les volumes d'eau sont toutefois modérés ;
- 6) des franchissements modérés affectent le front de mer ;
- 7) du fait d'un cordon dunaire plus étroit et plus bas, des franchissements notables affectent cette zone non urbanisée.

On constate enfin que compte tenu de la méthodologie utilisée (modèle grande emprise et méthode 2), la zone des brises lames au nord de la passe du Barcarès n'est pas affectée par les franchissements.

6.2.2. Stratégie 2 : Modèles locaux (Méthode 4)

Zone du village naturiste

Le scénario de type centennal a également été simulé sur les modèles locaux. Le modèle local 1 permet de constater que les zones inondées sont relativement proches de celles concernées par l'évènement historique (cf. Figure 32). En effet ce sont principalement les quais du grau qui sont impactés ainsi que le front de mer au nord du secteur. L'extension des inondations au pic de l'évènement centennal est comparable à celles des inondations observées lors de l'évènement de mars 2013. On constate également que le front de mer est affecté. En revanche, les hauteurs d'eau sont supérieures de 10 à 20 cm à celles de l'évènement de 2013.

Les simulations sur le modèle local 1 confirment donc que les submersions sur ce secteur sont principalement associées aux franchissements et que la zone inondée pour un évènement type centennal est globalement du même ordre de grandeur que pour l'évènement historique.

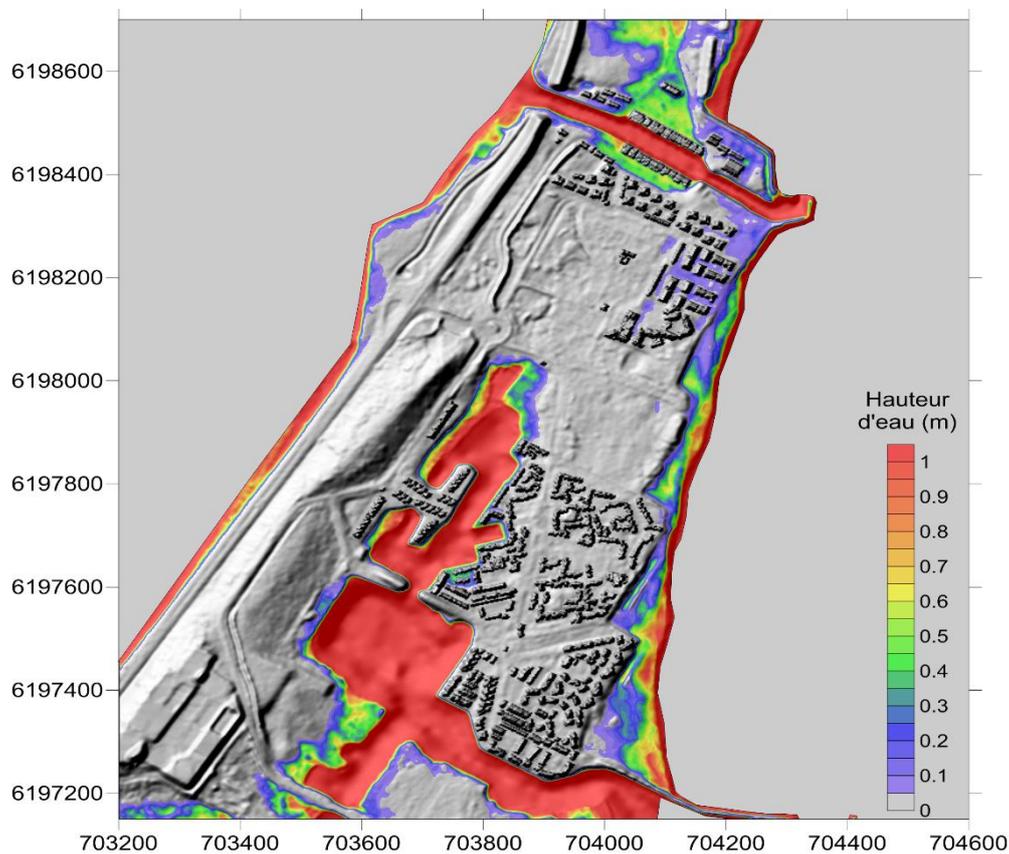


Figure 32 : Hauteur d'eau lors du pic de l'évènement de type centennal pour le secteur du village naturiste (modèle local 1).

Zone des Mourets

La cinématique de la submersion dans la zone du Mouret permet d'illustrer le caractère évolutif des zones affectées durant une tempête, ainsi que d'apprécier l'ampleur des submersions pouvant résulter de phénomènes de franchissements persistants (cf. Figure 33).

En effet, sur ce site 4 « sources » sont à l'origine des submersions qui affectent l'ensemble du secteur :

- 1) des franchissements importants dès le début de l'évènement au sud de l'agglomération de Leucate Plage qui produisent des écoulements importants depuis la zone urbaine vers la zone naturelle, topographiquement plus basse ;
- 2) des franchissements importants et le remplissage d'un fossé artificiel creusé pour évacuer l'eau de la zone 1 vers la zone naturelle ;
- 3) des franchissements importants au sud du secteur au niveau des aménagements du nord de l'entrée du grau des ostréiculteurs ;
- 4) des franchissements lors du pic de la tempête en divers points bas du cordon dunaire (accès plage, points de fragilité du cordon dunaire).

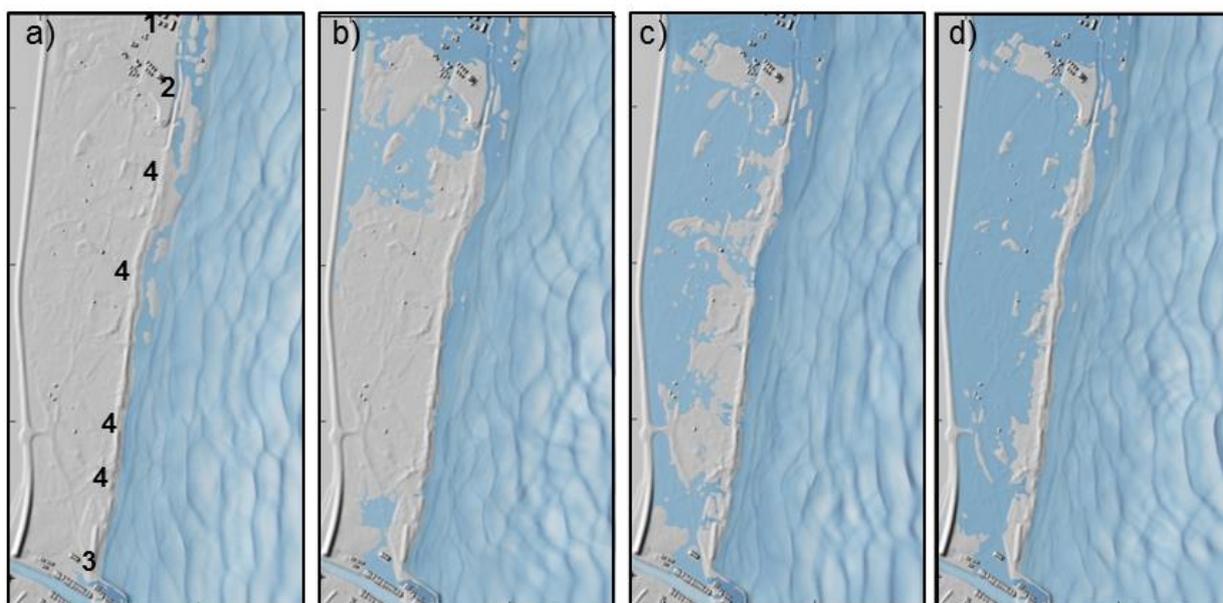


Figure 33 : Simulation des submersions a) lors du début des franchissements ($t_0 + 6 h$), b) 3 h avant le pic de l'évènement ($t_0 + 9 h$), c) au pic de l'évènement ($t_0 + 12 h$), d) 3 h après le pic ($t_0 + 15 h$) les conditions marines associées à chaque situation sont présentées dans le Tableau 4.

Ainsi on peut constater que les franchissements successifs entraînent rapidement des submersions importantes. Dès le début de l'évènement (cf. Figure 12), les franchissements qui débutent au niveau des points 1, 2 et 3 à $t_0 + 6 h$ (cf. Figure 33 a) conduisent au déversement de volumes d'eau importants, environ $5\,000\text{ m}^3$. Trois heures plus tard et à trois heures du pic de l'évènement les volumes à terre sont de l'ordre de $50\,000\text{ m}^3$ (cf. Figure 33 b). Au pic de l'évènement, les franchissements ont lieu sur les points 1, 2, 3 et au niveau des points 4. Les volumes d'eau franchissants sont alors très importants (de l'ordre de $32\,000\text{ m}^3$ en 20 min). Ainsi au pic de l'évènement les volumes d'eau à terre totalisent plus de $125\,000\text{ m}^3$ (cf. Figure 33 c). Enfin, les franchissements se prolongeant de manière conséquente jusqu'à la fin de l'évènement, les volumes totaux à terres sont de plus de

213 000 m³ et affectent la quasi-totalité de la zone des Mourets avec des hauteurs d'eau atteignant presque 1 m localement (cf. Figure 33 d).

	Niveaux (m/NGF)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)
Situation a (début des franchissements)	0.87	5.3	11.2	165
Situation b (3 h avant le pic)	1.06	6.3	11.2	165
Situation c (au pic de l'évènement)	1.14	6.7	11.2	165
Situation d (3 h après le pic)	0.96	6.4	11.2	165

Tableau 4 : Conditions au large associées aux illustrations (Figure 33) lors de l'évènement de type centennal.

6.3. ÉVÈNEMENT TYPE CENTENNAL ET ÉLÉVATION DU NIVEAU DE LA MER

Les méthodes 2 et 3, sont ici mises en place pour un scénario de forçage associant à l'évènement centennal et une élévation du niveau moyen de la mer de 60 cm afin d'appréhender l'impact de l'élévation du niveau de la mer associée au réchauffement climatique.

On observe une évolution importante des submersions caractérisée par un changement de processus à l'origine des inondations. En effet, de manière quasi générale le lido est affecté par des débordements, ayant pour conséquence une extension drastique des secteurs affectés par la submersion. Les franchissements deviennent secondaires. Les volumes d'eau franchissants sont très nettement inférieurs aux volumes d'eau à terre issus des débordements. Certains secteurs peuvent cependant être toujours affectés prioritairement par des franchissements.

Ainsi pour ce scénario (cf. Figure 34) :

- la zone de Leucate plage est affectée par des débordements conduisant à des hauteurs d'eau variables mais pouvant dépasser 1 m ;
- 2) la zone naturelle du Mouret est complètement submergée par plus d'1 m d'eau ;
- 3) la partie interne du village naturiste est fortement affectée et l'eau circule de manière continue entre le grau et les bassins nord de Port Leucate ;
- 4) les zones naturelles au nord et ouest de Port Leucate sont considérablement affectées par plus d'1 m d'eau ;
- 5) l'agglomération de Port Leucate est affectée par des hauteurs d'eau dépassant 1 m au niveau du port et l'ensemble de la ville est affectée par les débordements ;
- 6) le front de mer dont la topographie est supérieure au reste de l'agglomération n'est pas affecté par les débordements ;
- 7) on n'observe pas de submersion par débordement dans ce secteur ;

- 8) sur la partie sud de le Barcarès une zone basse étendue est submergée par les débordements dès lors que la cote des quais serait dépassée. Cette zone comprise entre la route nationale et le front de mer est submergée par des hauteurs d'eau entre 50 et 80 cm. Au-delà d'un seuil topographique, la partie sud de cette zone les hauteurs d'eau est comprise entre 20 et 50 cm ;
- 9) les quartiers bordant le port sont affectés par plusieurs dizaines de centimètres d'eau.

On constate donc que des secteurs précédemment épargnés ou affectés uniquement par des franchissements apparaissent comme affectés par des débordements parfois très importants.

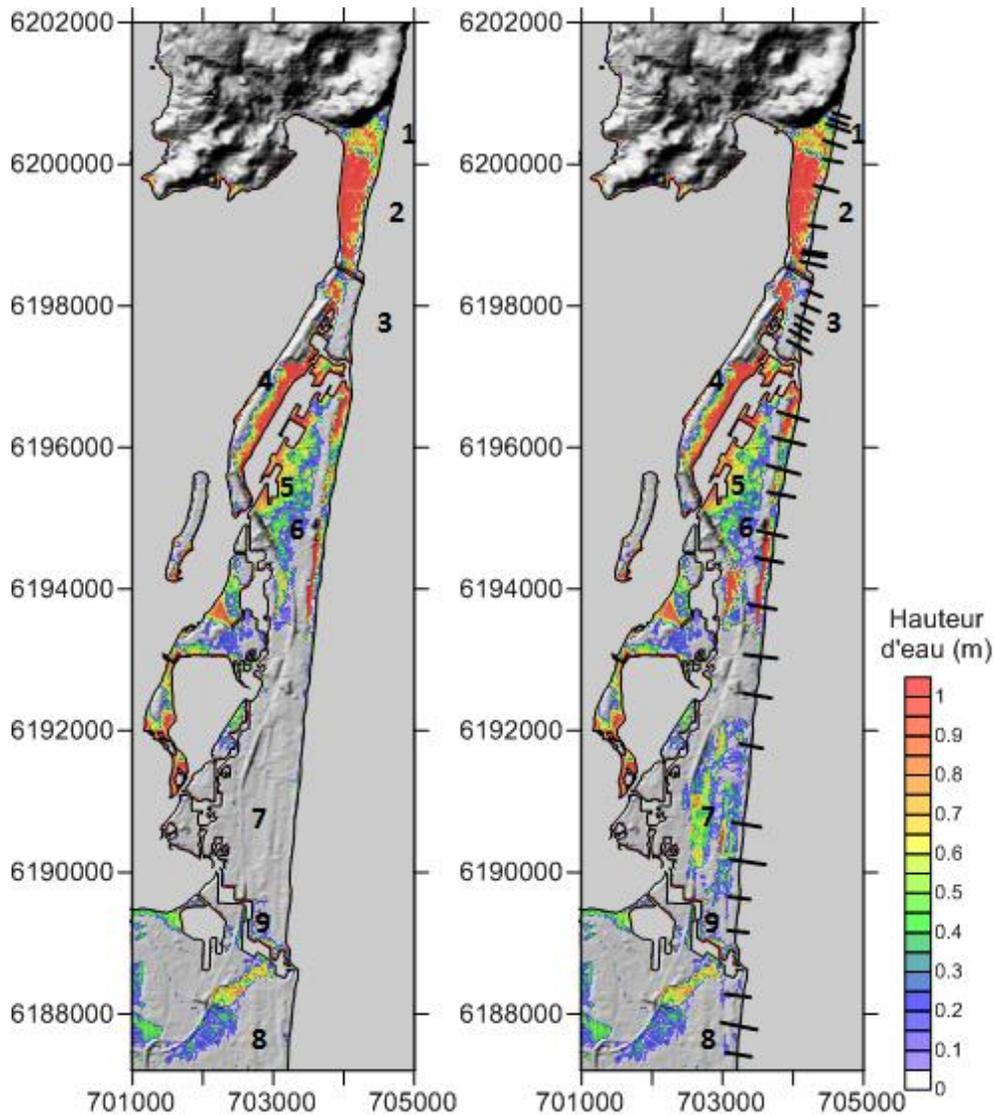


Figure 34 : Cartes issues de la modélisation grande emprise pour l'évènement de type centennal et une élévation du niveau moyen de la mer de 60 cm (hauteur d'eau à terre), à gauche ne tenant compte que des débordements (méthode 2), à droite intégrant débordements et franchissements (méthode 3, les segments noirs indiquent la localisation des profils types).

Comme évoqué la simulation des franchissements pour ce type de scénario présente des impacts relativement secondaires compte tenu de l'extension des zones touchées par les débordements. Toutefois, il subsiste des secteurs où les submersions sont uniquement provoquées par des franchissements, c'est le cas au niveau des repères :

- 3) les franchissements affectent fortement le front de mer ;
- 6) les franchissements se produisant côté mer s'associant au débordement provenant du port et du littoral de la lagune conduisent à une inondation couvrant toute la largeur du lido et affectant notamment la route nationale ;
- 7) les franchissements sont très importants associés des débordements locaux (accès plage). Ils conduisent au remplissage de secteur topographiquement plus bas ;
- 8) le front de mer est modérément affecté.

7. Analyse comparative des approches de modélisation pour l'évènement type centennal

Dans cette partie, nous proposons une analyse des différences de chaque méthode et leur potentielle complémentarité au travers de l'analyse des résultats en termes de hauteurs d'eau et de vitesses d'écoulement, Nous présenterons également les limites associées à chacune des méthodes (cf.§2.3).

7.1. HAUTEUR D'EAU

Une analyse comparative des cartographies associées aux différentes méthodes sur le site du village naturiste permet de confronter la pertinence des résultats et de préciser leurs complémentarités.

La méthode 1 présente une évaluation maximisante des zones inondables hors zones soumises aux franchissements (Figure 35 a). Cette méthode permet de désigner l'ensemble des zones dont la topographie est inférieure à une certaine cote. Ici, les côtes retenues sont 1,14 m (cyan) qui correspond à la valeur du niveau d'eau au large, associée au scénario centennale et 1,50 m (bleu), qui correspond au même niveau au large plus 36 cm d'élévation du niveau moyen de la mer lié à la surcote de vague (wave setup). Cette valeur est le résultat moyen sur le littoral issue de la modélisation grande emprise.

On constate que les terrains en arrière du front de mer au nord du village naturiste sont indiqués comme submergés. Il n'existe toutefois pas de continuité hydraulique permettant l'inondation de cette zone par les bassins du port, si on se réfère aux résultats des méthodes 2 et 4. Cette information qui peut s'avérer comme non réaliste pour un scénario centennal, reste toutefois intéressante car les cotes des bourrelets topographiques qui empêchent la continuité hydraulique sont relativement basses. On peut le constater en se référant à la Figure 34, point 3, qui montre que pour un scénario d'élévation du niveau moyen de la mer de 60 cm, cette zone est globalement inondée par débordement.

L'autre point important qui illustre la complémentarité des méthodes est le secteur urbanisé au nord du village naturiste. Cette zone est sensible aux franchissements, toutefois les méthodes 1 et 2 ne permettent pas d'évaluer ce type de submersion. La méthode 3 et la méthode 4, permettent d'identifier les hauteurs d'eau relatives aux franchissements sur le front de mer. On observe que pour la zone naturiste, les deux méthodes donnent des résultats proches (pour l'évènement centenal). On note cependant que les volumes d'eau pour la méthode 3 sont nettement supérieurs au niveau des bâtiments du nord du quartier, ce qui conduit par ruissellement à une accumulation d'eau en arrière de la zone construite. Comme nous le verrons dans la partie suivante, la méthode 4 apporte en plus de la méthode 3, la possibilité d'identifier les vitesses associées à ces franchissements à fine résolution. Enfin, on constate pour la méthode 3 que les quais sud du grau ne sont pas inondés, alors qu'ils le sont avec la méthode 4. Ce résultat suggère que ces inondations ne sont pas dues uniquement à l'élévation du niveau moyen mais également à une agitation dans la passe provoquée par les vagues. Cette agitation, résultant de la transformation des vagues à l'entrée marine de la passe, peut s'exprimer sous forme d'ondes courtes et d'ondes longues (ondes infragravitaires) et peut entraîner l'élévation temporaire du niveau d'eau sur plusieurs dizaines de centimètres. Ce type de processus ne peut pas être reproduit par la méthode 3. En revanche il l'est avec la méthode 4, et il peut être à l'origine de submersion notable sur les quais.

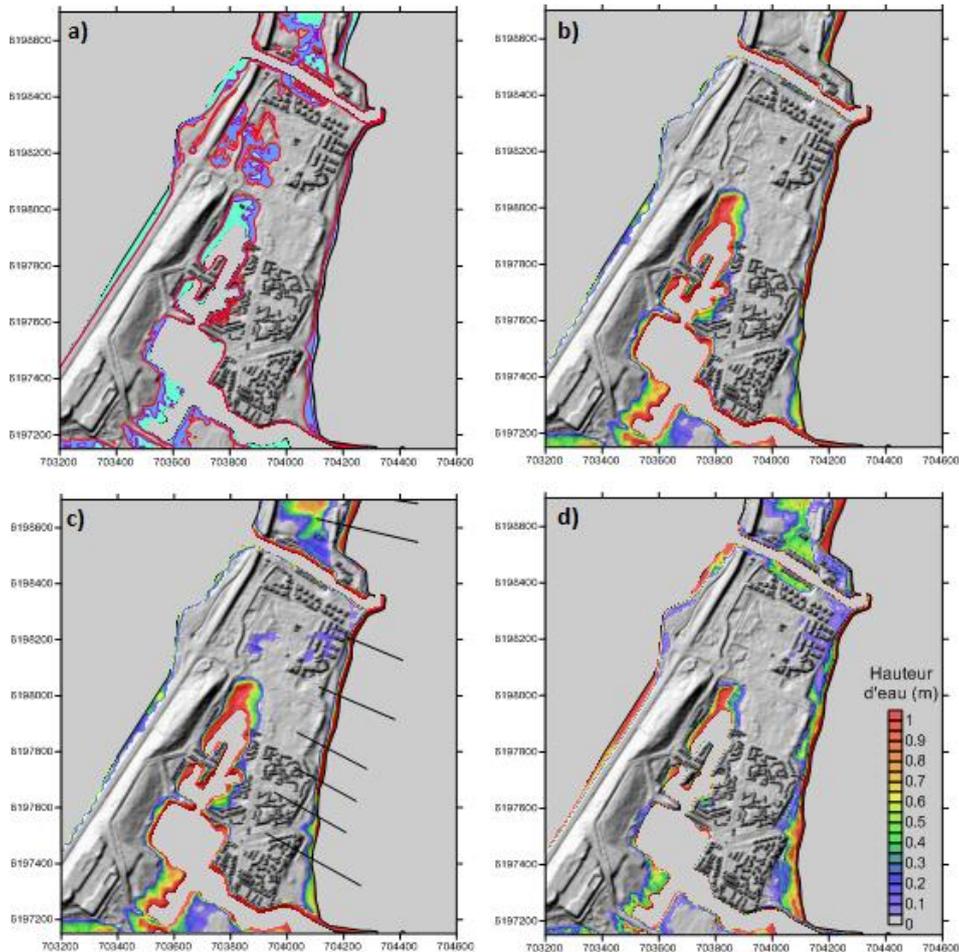


Figure 35 : Cartographie des submersions (scénario type centennal) pour chacune des méthodes implémentées pour secteur du village naturiste, a) méthode 1, cyan = 1,14 m hauteur d'eau au large associée au scénario centennal, bleu = 1,50 m idem + 36 cm d'élévation du niveau moyen de la mer de wave setup, valeur moyenne sur le littoral issue de la modélisation grande emprise, b) méthode 2, c) méthode 3 (les segments noirs indiquent la localisation des profils types), d) méthode 4.

Le même exercice de comparaison est réalisé pour la zone du Mouret (Figure 36). Il ressort comme premier point que la submersion pour un évènement de type centennal est quasi exclusivement causée par des franchissements. La méthode 2 montre que les débordements n'affectent qu'une zone limitée et ne permet pas d'évaluer la submersion marine. On constate que la méthode 1 (mêmes conditions que précédemment : zones dont la topographie est inférieure à la 1,14 m (en cyan) et 1,50 m (en bleu)) permet de délimiter une zone globalement proche de la représentation de l'extension des submersions à partir de la méthode 3 et 4. Ceci s'explique par la très forte sensibilité de la zone étudiée aux processus de franchissement qui comme cela a été évoqué en parties 6.1.2 et 6.2.2 génèrent des volumes très importants sur l'ensemble de la tempête (plusieurs heures de franchissements continus). Ces volumes d'eau franchissants simulés avec les méthodes 3 et 4 sont tels qu'ils conduisent à une inondation généralisée proche de la situation maximale représentée par la méthode 1.

On notera toutefois l'apport des méthodes 3 et 4 dans la partie la plus au nord couverte par le modèle local 2. En effet, localement, la topographie étant légèrement plus haute, la méthode 1 présente des zones inondées discontinues, voire non inondées (secteur du parking et des campings au sud de Leucate-plage) c'est-à-dire une sous-estimation voire l'absence de submersion. Les méthodes 3 et 4 montrent que, bien que ces zones soient légèrement plus hautes topographiquement, elles sont affectées par les franchissements, conduisant à des submersions atteignant dans les conditions du scénario événement de type centennal jusqu'à 50 cm de hauteur.

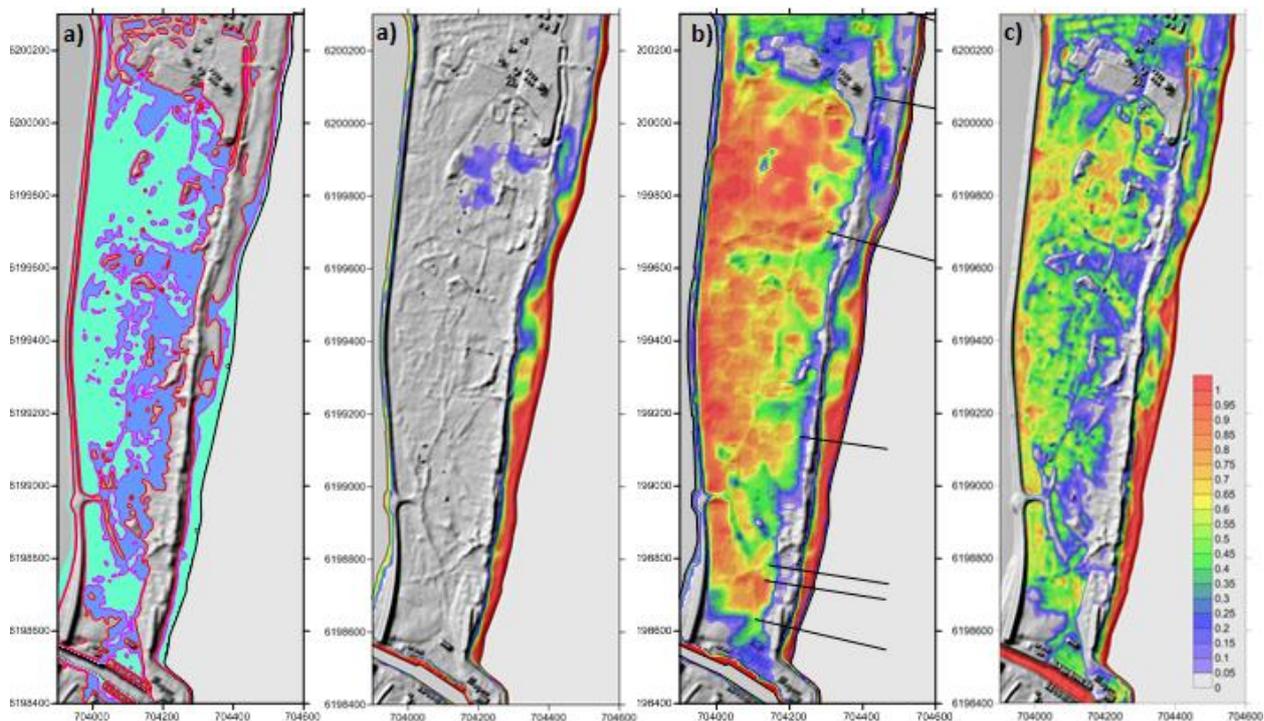


Figure 36 : Cartographie des submersions (scénario type centennal) pour chacune des méthodes implémentées pour le secteur des Mourets, a) méthode 1, cyan = 1,14 m hauteur d'eau au large associée au scénario centennal, bleu = 1,50 m idem + 36 cm d'élévation du niveau moyen de la mer de wave setup, valeur moyenne sur le littoral issue de la modélisation grande emprise, b) méthode 2, c) méthode 3 (les segments noirs indiquent la localisation des profils types), d) méthode 4

La comparaison des deux méthodes 3 et 4, présente des différences importantes en termes de hauteurs d'eau. En effet, la méthode 3 propose une estimation des hauteurs d'eau très nettement supérieure du fait de volumes franchissants plus importants. L'effet de la résolution spatiale sur la représentation de la submersion est également visible ici : la méthode 3 de résolution 10 m ayant tendance à lisser la délimitation des zones inondées, alors que les différentiels de hauteur d'eau sont nettement marqués pour la méthode 4 (résolution spatiale 2m). On pourra retenir de cette comparaison que les résultats de la méthode 3 sont fortement dépendants des profils choisis pour les franchissements et peuvent comparativement à la méthode 4, présenter des secteurs inondés ou des hauteurs d'eau nettement inférieures (Figure 35) ou supérieures (Figure 36) selon les cas.

7.2. VITESSE D'ÉCOULEMENT

La vitesse d'écoulement est une information généralement utilisée afin de caractériser l'intensité de l'aléa de submersion marine au même titre que la hauteur d'eau. Par exemple, la définition classique des seuils de vitesses retenues pour interpréter les vitesses d'écoulement classe les vitesses maximales observables selon les critères suivants (Guide méthodologique, MEDDE, mai 2014) :

- $V > 0,5$ m/s vitesse d'écoulement rapide ;
- $0,2 < V < 0,5$ m/s vitesse d'écoulement moyenne ;
- $0 < V < 0,2$ m/s vitesse d'écoulement faible.

Ces seuils de vitesse ont été déterminés principalement pour caractériser les vitesses d'écoulement à terre pour des submersions par débordement. Il convient d'avoir à l'esprit, que les vitesses associées au déferlement des vagues et aux franchissements peuvent être très nettement supérieures, atteignant souvent localement plusieurs mètres par seconde.

Les différentes méthodes envisagées ne permettent pas toutes d'estimer cette variable. Notamment, la méthode 1 ne permet pas de disposer d'informations sur les vitesses d'écoulements.

La méthode 2, permet de reproduire les vitesses associées à la propagation des écoulements à terre. Ces vitesses dépendent des volumes d'eau débordant à terre, de la topographie et du type de terrain (représentée par un coefficient de rugosité).

La méthode 3, permet le même type de résultats que la méthode 2 en y ajoutant les volumes d'eau issus des franchissements selon les profils retenus. Les vitesses associées à la dynamique de franchissement elle-même ne peuvent cependant pas être reproduites. Par ailleurs, la résolution spatiale inférieure associée à cette méthode ne permet pas de reproduire finement la dynamique des écoulements, en particulier dans les zones urbaines.

Seule la méthode 4 permet à la fois de représenter les vitesses associées à la propagation des eaux à terre et à la dynamique de franchissement. De plus, compte tenu de la résolution de travail (ici, 2 m) et la prise en compte explicite des bâtiments, cette méthode permet d'accéder aux caractéristiques des écoulements (hauteurs et vitesses) en zones urbaines.

On constate dans cet exemple (cf. Figure 37), que sur le front de mer, les accélérations temporaires associées aux franchissements peuvent être très importantes. En revanche, au-delà du front de mer, les volumes d'eau issus des franchissements s'écoulent par contrôle topographique. Les vitesses sont généralement inférieures à 0,2 m/s et les fortes vitesses sont très locales associées à des accidents topographiques ou la présence de fossés (cf. Figures 37 et 38).

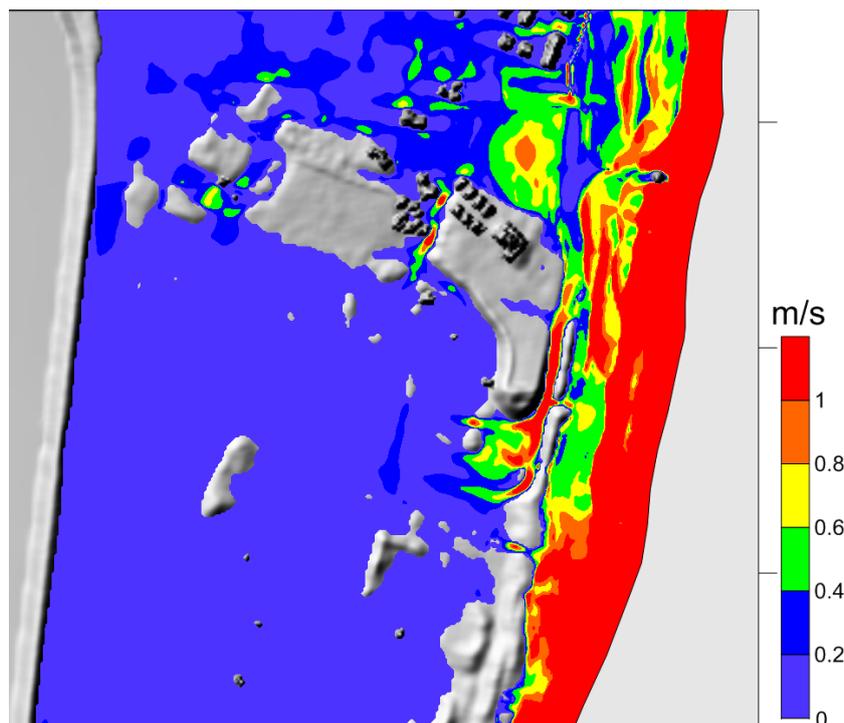


Figure 37 : Cartes des courants au pic de la tempête (vitesses maximales) pour l'évènement de type centennal (méthode 4), secteur nord des Murets.

Les simulations à partir de la méthode 4 permettent d'apporter une information importante sur les secteurs les plus sensibles et sur les vitesses spécifiques associées aux franchissements (contraintes sur les structures ou les cordons dunaires, représentation détaillée des écoulements en ville).

Par ailleurs, deux raisons sont susceptibles de provoquer des différences notables dans la caractérisation des vitesses associées aux franchissements par paquets de mer proposée par les méthodes 3 et 4.

La première est méthodologique, en effet, en intégrant les volumes franchissant issus de simulations sur des profils au sein du modèle de propagation des écoulements (méthode 3), les vitesses spécifiques aux processus de franchissements sur le front de mer ne peuvent pas être convenablement reproduites, comme c'est le cas avec la méthode 4.

La seconde est liée à la résolution spatiale des modèles, qui dans le cas de la méthode 3 est de 10 m et de 2 m pour la méthode 4. Ainsi, les accidents topographiques (gradient de pente, forme...), ne sont pas identiques et peuvent conduire à la chenalisation ou non des écoulements (accélération, emprise des zones affectées), selon les méthodes.

Les différences entre les méthodes peuvent être variables et dépendent de la morphologie du front de mer. Par exemple, sur la Figure 38, les différences sont peu significatives, principalement car le front de mer est relativement uniforme et que la topographie en arrière est peu accidentée. On note un volume d'eau franchissant supérieur pour la méthode 3 mais globalement des vitesses comparables.

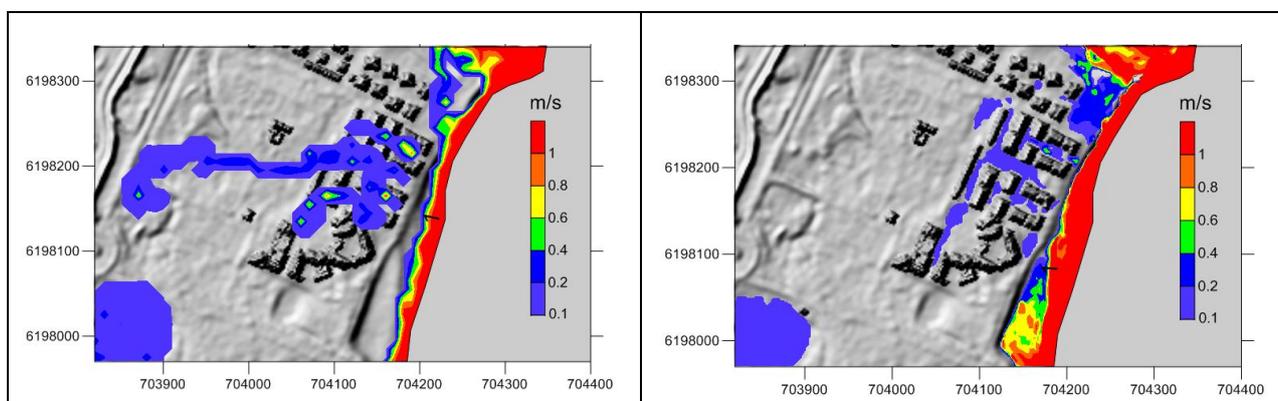


Figure 38 : Illustration des vitesses maximales et de la direction des écoulements pour la zone nord du village naturiste. À gauche, la méthode 3 (résolution 10 m) et à droite la méthode 4 (résolution 2 m). Les vitesses sont représentées sur une image du MNT de résolution 2 m avec bâtiments.

En revanche, la Figure 39, illustre les limites de la méthode 3 à reproduire les vitesses spécifiques aux dynamiques de franchissement sur le front de mer dès lors que la topographie est fortement accidentée.

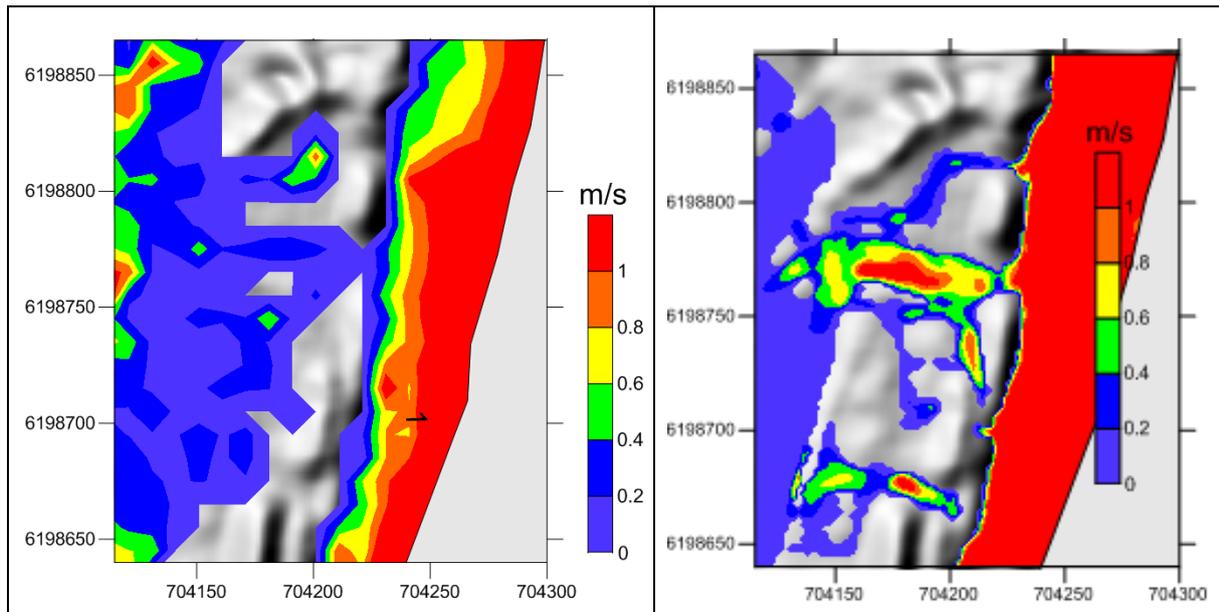


Figure 39 : Illustration des vitesses maximales et de la direction des écoulements pour une zone de franchissement de cordon dunaire. À gauche, la méthode 4 (résolution 2 m), à droite la méthode 3 (résolution 10 m). Les vitesses sont représentées sur une image du MNT de résolution 2 m.

7.3. SYNTHÈSE DES APPORTS ET COMPLÉMENTARITÉ DES MÉTHODES

L'effort relatif à la mise en place de chacune des méthodes est très variable. Le passage de la méthode 1 à la méthode 4 doit être conditionné aux besoins de l'étude : emprise géographique à traiter, précision souhaitée, prise en compte des écoulements en zones urbaines, etc. Déterminer la méthode adaptée et suffisante dépendra également fortement de la configuration morphologique et de l'exposition du site d'étude aux forçages météo-marins.

Dans le cas du site étudié, on peut constater que chacune des approches permet d'apporter un niveau d'information différent et qui s'avère complémentaire dès lors que l'on envisage de comprendre les processus à l'origine des submersions marines, les implications en termes d'exposition du territoire, les possibles évolutions du type de submersion en lien avec le réchauffement climatique ou la description haute résolution des écoulements à l'échelle d'un quartier ou d'un secteur surexposé. En fonction du niveau d'information nécessaire au traitement du risque de submersion, les méthodes 1 à 4 peuvent être mises en place successivement dans une démarche itérative de compréhension et d'avancée des connaissances. Les résultats dépendant de chaque méthode n'ont pas vocation à s'opposer.

Le Tableau 5 est un récapitulatif des efforts en temps, des résolutions de travail et des avantages/inconvénients de chaque méthode.

Méthodes*	Temps d'implémentation	Extension de la zone d'étude	Résolution spatiale	Durée simulée de l'événement	Point fort	Point faible	Maturité de la méthode
Méthode 1	Jours	Non limitée	Équivalente à celle du MNT	pas d'objet	Rapidité	Résultats schématiques, maximisant pour les submersions par débordement et n'intégrant pas les franchissements	Maximale
Méthode 2	Semaines	Dizaines à une centaine de km ²	10 - 20 m	24 h à plusieurs jours	Vision dynamique des zones affectées Permet de déterminer les zones de débordement et les zones qui peuvent être affectées par les franchissements.	N'intègre pas les franchissements	Forte
Méthode 3	Semaines à Mois	Dizaines à une centaine de km ²	10 - 20 m et 1 m	24 h à plusieurs jours	Prise en compte des franchissements sur des domaines d'étude étendus	Hypothèse d'homogénéité des franchissements (analyse d'expert)	Moyenne
Méthode 4	Mois	Quelques km ²	1 - 2 m	6 à 12 h	Analyse fine de l'ensemble de processus hydrodynamiques à l'origine des submersions	Instabilité numérique/faible extension de la zone d'étude	Faible

Tableau 5 : Caractéristiques principales de chacune des méthodes envisagées.

8. Discussion et limites

La modélisation de la submersion marine est nécessairement une entreprise de simplification et conduit à définir des hypothèses de travail pour décrire avec un degré de précision variable les conséquences à terre de conditions de forçage en mer. Comme nous l'avons vu, selon le type de submersion et l'exposition des enjeux, plusieurs méthodes existent et s'avèrent plus ou moins adaptées en fonction des objectifs spécifiques de la cartographie (différents par exemple entre un PPRL et un Plan d'évacuation).

Aujourd'hui, une modélisation réaliste permet de caractériser de manière satisfaisante la submersion marine. Toutefois, un certain nombre de limites existent.

8.1. VALIDATION DES SIMULATIONS DE SUBMERSION

On revient ici sur la question évoquée partie 6.1, à savoir, le manque de disponibilité de données précises de hauteurs d'eau (en mer, sur le littoral, dans les ports ou à terre) des limites maximales d'inondations, des vitesses des écoulements ou de encore la temporalité des inondations lors d'évènements historiques.

À partir d'un travail important de recueil de données et de campagnes de terrain, nous avons pu analyser un nombre conséquent d'informations valorisables afin de procéder à la validation des modèles. Toutefois, ces informations demeurent indirectes et l'analyse de la pertinence des modèles bénéficierait grandement d'informations complémentaires notamment, les niveaux d'eau dans le port pouvant conduire à des débordements. En effet, l'absence de marégraphe ou autre système de mesure permettant d'enregistrer localement les variations du niveau d'eau ne permet de validation directe. Ce type de données est nécessaire pour compléter l'analyse des résultats de modélisation ou améliorer les analyses statistiques.

Par ailleurs, concernant les volumes franchissants et les secteurs inondés par ce type de processus, des informations ont pu être collectées sur les secteurs urbanisés grâce aux témoignages des riverains. En revanche, il existe peu d'informations sur des secteurs plus isolés comme le secteur des Mourets pourtant fortement sensible à ce type de phénomène de submersion.

8.2. FORÇAGES ET SCÉNARIOS

L'élaboration d'un scénario qui est un impératif pour simuler la submersion marine dépend fortement de la longueur et de la qualité des données météo-marines disponibles, des choix méthodologiques envisagés pour l'étude statistique ainsi que des choix en termes de cinétique de tempête.

L'analyse en valeurs extrêmes utilisée pour la définition du scénario, résulte d'un développement méthodologique innovant et exploratoire. Ces développements se basent sur l'utilisation d'une approche bayésienne (méthode HIBEVA) permettant de combiner des sources de données de natures et précisions différentes afin de calculer des lois de probabilité marginales (Hs et niveau d'eau) et d'établir des statistiques conjointes. Cette méthode a également permis de considérer des périodes de retour élevées. Nous avons ici retenu le scénario maximisant (méthode environnemental contours) comme l'a montré l'étude Nicolae Lerma *et al.* (2018).

Il convient de rappeler qu'afin d'établir ce type de scénarios, les séries de données disponibles doivent être suffisamment étendues (de l'ordre de 30 ans de données effectives, issues d'observations ou de base de données modélisées validées). En utilisant uniquement les données observées pour le site, il n'aurait pas été possible d'élaborer ce type de scénario, les incertitudes pesant sur les valeurs de retour estimées devenant beaucoup trop importantes pour des périodes de retour dépassant 30 ans. Ce problème est fréquemment rencontré en méditerranée, la profondeur des bases de données de niveaux d'eau et de vagues étant le plus souvent insuffisante.

Bien entendu, les scénarios statistiques obtenus ne sont valables que localement (pour le site étudié). Par ailleurs, outre les incertitudes associées à la méthode statistique, il convient de rappeler que les données de niveaux d'eau sont issues du marégraphe de Sète. Ce marégraphe peut être considéré comme éloigné du site d'étude (localisé à environ 70 km au nord). Cependant, c'est le seul marégraphe permettant de remplir les conditions nécessaires à notre étude. En effet, c'est le marégraphe le plus proche du site, contenant la date de l'évènement historique et dont la série temporelle est suffisamment longue pour réaliser des statistiques.

8.3. DONNÉES TOPO-BATHYMÉTRIQUES ET MORPHOLOGIE DES PLAGES

Une des limites inhérentes aux méthodes mises en place est l'utilisation d'un modèle topo-bathymétrique à fond fixe. Outre les traitements de préparation de la surface topographique détaillés partie 5.1.2, cette contrainte méthodologique implique deux choses. La première, est que la morphologie de la bande littorale et de la plage n'évolue pas en fonction des conditions hydrodynamiques. La seconde est que la morphologie est telle qu'elle a pu être observée lors de levés. Or, pour des raisons de faisabilité, les levés LIDAR ou bathymétriques sont généralement réalisés par temps calme et rarement en hiver. Cela a pour conséquence de disposer le plus souvent via ces produits, de continuums terre-mer (modèle topo-bathymétrique) représentatifs des caractéristiques morphologiques de la plage et de l'avant plage à un moment donné et plutôt lors de conditions favorables (période estivale).

Afin d'évaluer l'impact de la morphologie sur les volumes pouvant potentiellement franchir le front de mer, des tests de sensibilité de l'influence de la morphologie de la plage sous-marine, de l'estran et du haut de plage ont été réalisés. Pour cela, un profil type caractéristique de la zone du front de mer au nord du village naturiste (secteur affecté par des franchissements lors de la tempête de mars 2013) a été sélectionné (Figure 40).

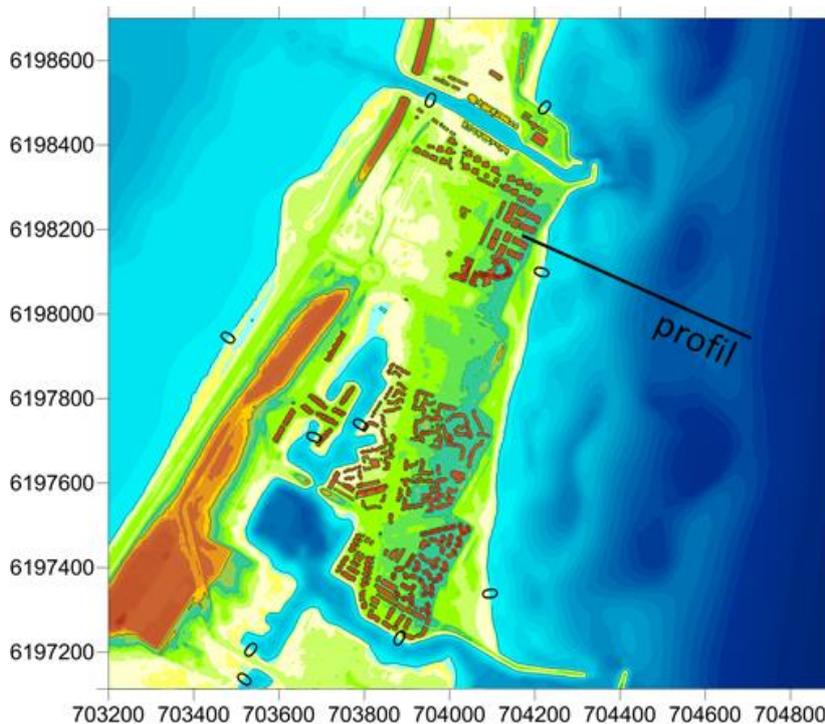


Figure 40 : Localisation du profil type sur le littoral du village naturiste.

Pour conduire ces tests, un profil de référence correspondant au profil noir (Figure 41) est utilisé (répété dans chaque sous-figure de la Figure 41 à des fins de comparaison). Ce profil s'étend sur une distance de 800 m, entre une profondeur de 10 m au large jusqu'au front de mer dont la cote maximale est 3,6 m/NGF. Le système de barre pré-littoral (compris entre -4 et 0 m) présente une barre bien développée proche de la plage. La pente de la plage active (compris entre environ -1 m et 2 m) est homogène et fortement inclinée (10,2 %). Le haut de plage présente une pente douce (2,3 %). Enfin, le front de mer est aménagé et présente un muret d'une hauteur de 40 cm. Cet élément a été ajouté au profil initial afin de conduire de test avec présence ou absence de muret.

On évalue les différences en termes de volumes franchissants avec 4 types de profils :

Type 1 : un profil type « **variabilité longshore** » où la barre d'avant-côte est un peu moins développée et est positionnée plus au large que sur le profil de référence. Cette situation peut correspondre à la variabilité spatiale longshore classique que l'on observe au sein d'un tronçon homogène (méthode de modélisation grande emprise des submersions).

Type 2 : un profil de type « **hivernal** » en opposition au profil de référence plutôt caractéristique de la période printanière ou estivale. La plage a tendance à être amaigrie et plus courte au profit de la barre d'avant-côte. On notera également l'effacement de la berme de haut de plage.

Type 3 : un profil de type « **crise érosive** », il est caractérisé par un recul de la plage de 20 m représentant une plage réduite à son minimum de largeur avec une pente homogène de 10 %. La barre est également peu marquée et positionnée offshore.

Type 4 : Un profil « **sans muret** », le profil est identique au profil de référence mais le muret de front de mer est effacé.

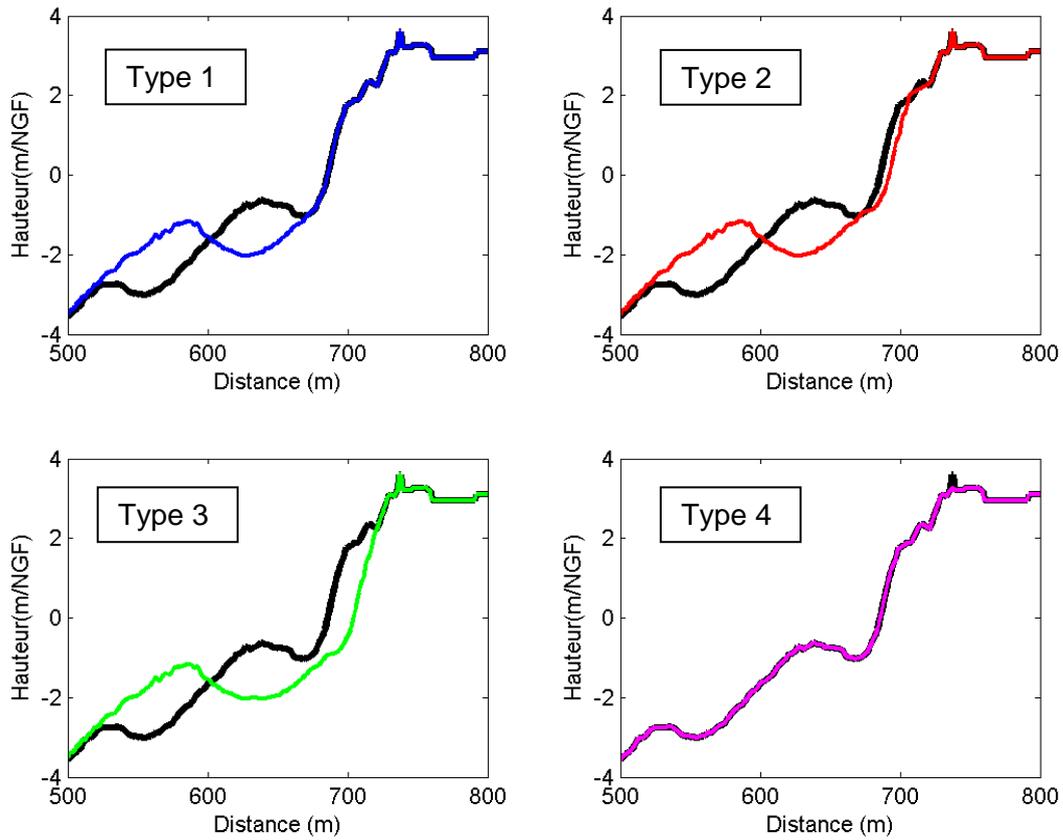


Figure 41 : Profils de plage utilisés pour la réalisation des tests de sensibilité.

Pour ces tests, trois situations de forçages ont été simulées sur une durée de 20 minutes avec le code SWASH (Tableau 6) :

- cas 1 - Conditions de tempête annuelle ;
- cas 2 - Conditions au pic de la tempête de mars 2013 ;
- cas 3 - Conditions d'un événement de probabilité de retour 100 ans.

	Niveau d'eau m/NGF)	Hs (m)	Tp (s)	Étalement (°)
Cas 1	0.8	5	10	20
Cas 2	0.92	6.2	11	20
Cas 3	1.14	6.7	11.2	20

Tableau 6 : Conditions de forçage pour les tests de sensibilité.

Pour le cas 1, les simulations montrent (Figure 42), l'absence de franchissement, excepté dans le cas « sans muret » où le calcul donne par mètre linéaire de front de mer un très faible volume cumulé (0,04m³ pour 20 min).

Pour le cas 2, on observe une variabilité notable selon les profils. Pour les profils de référence, « variabilité longshore » et « hivernal », les volumes franchissant sont du même ordre de grandeur. Ils sont faibles avec un maximum de 0,12 m³ cumulés sur 20 min pour le profil hivernal. Pour ce type de conditions (correspondant à un événement d'une période de retour de l'ordre de 10 ans selon notre étude statistique) les résultats des tests montrent que bien que les franchissements soient en volumes supérieurs pour des conditions morphologiques de type hivernale (type 2), les différences sont peu significatives par rapport aux résultats obtenus sur le profil de référence.

En revanche, les situations de plage très érodée (type 3) et sans muret (type 4) entraînent des franchissements très nettement supérieurs. On obtient respectivement 1,6 et 1,7 m³ pour 20 min par mètre linéaire. Ainsi, on constate que pour ces conditions marines, l'absence de plage liée à une très forte érosion a des conséquences comparables à l'absence de muret de protection.

Le cas 3, correspondant à des conditions de forçages exceptionnelles, présente une situation nettement plus variable. Les franchissements passent de 1,2 m³ pour le cas de référence à 8,8 m³ 20 min sur pour le type 3 « crise érosive ». Dans ce cas, certaines lames d'eau peuvent provoquer sur 1 m de linéaire de front de mer des franchissements de l'ordre de 2,5 m³ en quelques secondes.

On observe que dans cette situation, les valeurs associées au profil type 1 « variabilité longshore » et type 2 « hivernal » sont comparables et très nettement supérieures au profil de référence. On observe dans ces deux situations des volumes franchissants environ trois fois plus importants que pour le profil de référence.

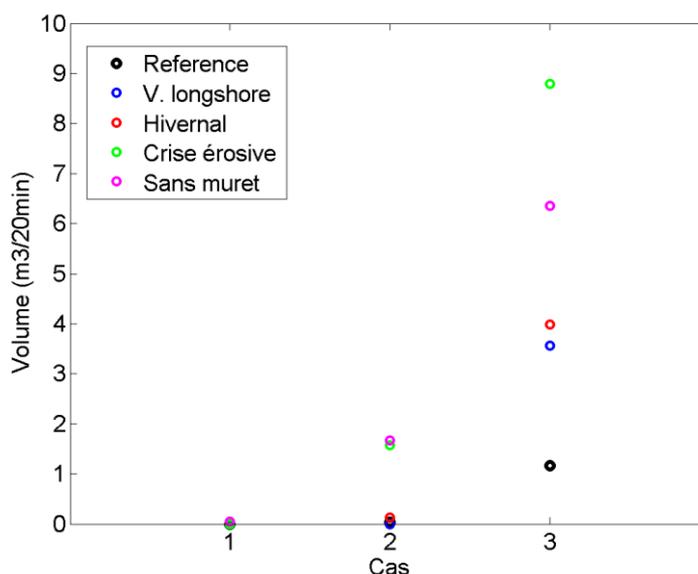


Figure 42 : Résultats de l'analyse de sensibilité sur les volumes franchissants en fonction de la morphologie du profil de plage.

	Profil réf.	Profil type 1	Profil type 2	Profil type 3	Profil type 4
Pic tempête hivernale annuelle (cas 1)	0	0	0	0	0,1
Pic tempête mars 2013 (cas 2)	0,1	0,1	0,1	1,6	1,7
Pic tempête type centennial (cas 3)	1,2	3,6	4	8,8	6,4

Tableau 7 : Volumes franchissants sur 20 minutes (m³/m).

On peut conclure à partir de ces tests que la morphologie du profil joue un rôle important dans les volumes franchissants. Ce rôle apparaît comme croissant en fonction de l'intensité de la tempête. Plus l'évènement est intense plus la morphologie du profil au moment de l'évènement jouera un rôle déterminant.

Ainsi, sur le profil étudié, pour une tempête très intense (période de retour de ~ 10 ans ou type mars 2013) les tests montrent que, seuls des changements très importants ou relatifs à des structures de protections en front de mer auront une incidence notable. En revanche, lors d'évènements exceptionnels (période de retour 100 ans), un changement de morphologie typique entre un profil d'hiver (type 3) et profil d'été (réf. ou type 1) peut provoquer la multiplication par trois des volumes franchissants totaux.

9. Conclusion

Dans cette étude, 4 méthodes de détermination de la submersion marine (3 par modélisation numérique et 1 SIG par extrapolation du niveau d'eau au rivage) ont été mises en œuvre sur le secteur du lido de la lagune de Leucate-Barcarès.

Le développement et les contraintes que soulèvent chacune des méthodes ont été exposés. L'utilisation d'une méthode ou d'une autre trouve sa justification dans les caractéristiques du site d'étude et dans le degré de précision attendu pour répondre aux questions posées par l'aléa. Ainsi, les résultats obtenus par ces méthodes ne s'opposent pas mais s'inscrivent plutôt dans une démarche progressive consistant à affiner à chaque étape les connaissances relatives à la détermination de la submersion marine.

Comme nous avons pu le voir le passage de la méthode 1 (type SIG) à la méthode 2 (modélisation du débordement) permet de passer d'une vision statique dite maximisante (i.e. vision maximale des conséquences possibles en terme d'extension des zones inondées par phénomène de débordement mais pas pour de secteur soumis aux franchissements), à une représentation dynamique de la submersion et de sa propagation (chronologie des événements). Cette méthode permet également de diagnostiquer les secteurs du territoire affectés spécifiquement par des phénomènes de submersion par débordement ou par franchissements.

Le passage de la méthode 2 à la méthode 3 (modélisation du débordement et du franchissement selon des profils) permet la prise en compte des phénomènes de franchissement qui sont aujourd'hui en plusieurs secteurs sur le site d'étude, les processus principaux à l'origine des submersions lors des tempêtes. La méthode 3 permet également de conduire une analyse sur plusieurs kilomètres voire plusieurs dizaines de kilomètres de côte. Cependant, la sélection de profils représentatifs d'un tronçon de linéaire côtier constitue un point essentiel dans la qualité des résultats obtenus qui peut, selon les cas, entraîner une sous-évaluation ou une surestimation des volumes franchissants. Ainsi, il est recommandé de réaliser des tests de sensibilité pour s'assurer du choix d'un profil adapté en fonction de l'exposition de chaque tronçon. Les tests réalisés ici montrent que pour des forçages équivalents, les volumes franchissant le front de mer peuvent être notablement différents en fonction de la morphologie du profil. Par exemple, au regard des tests réalisés, pour des conditions exceptionnelles (période de retour 100 ans), une différence de morphologie typique entre un profil d'été et profil d'hiver peut provoquer la multiplication par trois des volumes franchissant totaux.

Enfin le passage de la méthode 3 à 4, permet d'affiner la connaissance à l'échelle locale. La méthode 4, permet de décrire l'ensemble des types de submersions avec la contribution intégrée de l'ensemble de processus à l'origine des submersions (marée, surcote atmosphériques, contribution des vagues : ondes infra gravitaires et franchissements). La cartographie issue de cette méthode permet de décrire précisément les processus associés aux franchissements, les points de fragilité, ou le comportement et les vitesses des écoulements en milieu urbain.

Ainsi, dans le cas de sites fortement exposés à la submersion marine par débordement, ou la topographie est généralement basse et où il existe peu des seuils topographiques. L'utilisation des méthodes 1 et 2 apparaissent comme suffisantes pour délimiter les zones inondables. Dans certain cas comme pour le site des Mourets (fortement soumis aux franchissements et généralement bas en arrière du cordon dunaire de front de mer) l'extension des zones soumises à la submersion résultant de la méthode SIG (méthode 1) et des méthodes 3 et 4 sont également proches. Dans ce cas l'utilisation de méthodes 4, apportent des informations supplémentaires sur les secteurs souvent de topographie plus haute où les paquets de mer sont susceptibles de franchir le front de mer.

Lorsque les phénomènes de franchissement sont susceptibles d'être la source principale des submersions, lorsque l'on souhaite disposer de la cinétique des submersions ou des vitesses associées à la circulation des écoulements, alors on privilégiera les méthodes 3 ou 4. Toutefois, bien que la méthode 3 offre une certaine souplesse technique permettant de traiter les franchissements sur des linéaires côtiers de plusieurs kilomètres, le choix de la localisation des profils et leur représentativité sont déterminants. En effet, selon les sites les résultats finaux peuvent fortement dépendre du choix des profils utilisés. La méthode 3 est ainsi a priori plus adaptée lorsque le front de mer a des caractéristiques morphologiques relativement homogènes. Pour des sites où le front de mer présente des expositions très variables, que les enjeux sont importants et qu'une vision détaillée à haute résolution des submersions est souhaitée, alors la méthode 4 est recommandée.

10. Bibliographie

Anselme, B., Durand, P., Thomas, Y.-F., Nicolae Lerma, A. (2011) - Storm extreme levels and coastal flood hazards: a parametric approach on the French coast of Languedoc (district of Leucate). *Comptes Rendus Geoscience* 343, 677–690.

Balouin Y. et Belon R. (2012) - Évaluation des submersions marines lors des tempêtes en Languedoc-Roussillon – Atlas Cartographique. Rapport BRGM/RP-61306-FR, 126 p.

Bulteau, T., Idier, D., Lambert, J., Garcin, M. (2015) - How historical information can improve estimation and prediction of extreme coastal water levels: application to the Xynthia event at La Rochelle (France). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 1135–1147.

Bulteau T., Nicolae Lerma A., Elineau S., Paris F., Pedreros R. (2017) - Framing 100-year marine submersion hazard resulting from the propagation of 100-year joint hydrodynamic conditions, Third international conference on Advances in Extreme Value Analysis and Application to Natural Hazard (EVAN), 5 to 7 September 2017, Southampton, UK.

Bunya, S., Dietrich, J.C., Westerink, J.J., Ebersole, B.A., Smith, J.M., J. H. Atkinson, Jensen, Resio, D.T., Luettich, R.A., Dawson, C., Cardone, V.J., Cox, A.T., Powell, M.D., Westerink, H. J., Roberts, H. J. (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. *Mon. Wea. Rev.* 138, 345–377. doi:10.1175/2009MWR2906.1.

CETMEF (2013) - Analyse des surcotes extrêmes le long des côtes métropolitaines. 128 p.

Elineau S., Nicolae Lerma A., Paris F., Pedreros R. (2016) - Importance de la représentation spatiale des surcotes marines lors des tempêtes en contexte microtidal. 2èmes éditions des Journées REFMAR du 2 au 4 février 2016, Paris.

Gouldby, B., Méndez, F.J., Guanche, Y., Rueda, A., Mínguez, R. (2014) - A methodology for deriving extreme nearshore sea conditions for structural design and flood risk analysis. *Coastal Engineering*, 88, 15-26.

Huseby, A.B., Vanem, E., Natvig, B. (2013) - A new approach to environmental contours for ocean engineering applications based on direct Monte Carlo simulations. *Ocean Engineering*, 60, 124-135.

Huseby, A.B., Vanem, E., Natvig, B. (2015) - Alternative environmental contours for structural reliability analysis. *Structural Safety*, 54, 32-45.

IFREMER (2003) - Réseau de suivi lagunaire du Languedoc-Roussillon. Bilan des résultats 2002. Rapport de la Direction de l'Environnement et de l'Aménagement littoral, laboratoire de Sète, 234 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, 233–250.

Mazas, F., & Hamm, L. (2011) - A multi-distribution approach to POT methods for determining extreme wave heights. *Coastal Engineering*, 58(5), 385-394.

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

Nicolae Lerma, A., Bulteau, T., Elineau, S., Paris, F., Durand, P., Anselme, B., & Pedreros, R. (2018) - High-resolution marine flood modelling coupling overflow and overtopping processes: framing the hazard based on historical and statistical approaches. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(1), 207.

Pedreros R. (2016) - État des connaissances sur la dynamique et la cinétique de la submersion marine et des méthodologies d'évaluation. Rapport final. BRGM/RP-66197-FR, 62 p., 34 fig., 10 ann.

Stépanian A., Lecacheux S., Nicolae-Lerma A., Pedreros R. (2014) - Évaluation des Risques Naturels Littoraux sur le territoire du SCoT Provence Méditerranée – Caractérisation de l'aléa submersion marine. Rapport final. BRGM/RP-63949-FR, 119 p., 65 ill., 5 ann., 1 CD.

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

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

Annexe 1

Descriptif synthétique des codes de calcul utilisés pour la plateforme modélisation

- **MARS-2DH-flood : Modèle hydrodynamique de niveaux et courants adapté pour la propagation des écoulements à terre**

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 variables météorologiques (vents, pression atmosphérique). 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 à partir de :

- 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) ;
- du frottement spatialisé sur le fond et les sols (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.

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 la surcote liée aux vagues (setup) locale) 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.

- **SWASH : Modèle non-hydrostatique à résolution de phase (Non Linear Shallow Water)**

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 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 des 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 allant de la propagation des vagues, la zone de levée, le déferlement et la submersion.



Centre scientifique et technique	Direction Régionale Occitanie
3, avenue Claude-Guillemin	1039 rue de Pinville
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France	34000 – Montpellier - France
Tél. : 02 38 64 34 34	Tél. : 04 67 15 79 80