



Modélisation de l'aléa submersion marine sur le littoral de l'Aude

**Nicolas PROUST¹, François CARNUS¹, Etienne BALUFIN²,
Frédéric BOUCHETTE³**

1. BRL ingénierie, 1105 Avenue Pierre Mendès-France, 30000 Nîmes, France.
2. SMMAR, Allée Raymond Courrière, 11000 Carcassonne, France.
3. Consultant, Apt 209, bat C2, 389 rue de l'Espinouse, 34090 Montpellier, France.

Résumé :

Le Syndicat Mixte du Delta de l'Aude (SMDA), appuyé du Syndicat Mixte des Milieux Aquatiques et des Rivières (SMMAR), dans le cadre de l'exercice de la compétence GEMAPI, a engagé une étude des structures littorales, anthropiques ou naturelles, jouant un rôle vis-à-vis des aléas littoraux que sont l'érosion du trait de côte et la submersion marine.

Le périmètre de cette opération s'étend à l'ensemble de la façade maritime des bassins versants de l'Aude, de la Berre et des Corbières Maritimes, allant de Vendres à Leucate. Il comprend également l'ensemble des communes limitrophes des étangs et lagunes présents sur la Narbonnaise. L'étude a pour objectif d'apporter une vision technique sur les risques littoraux (érosion et submersion marine) pesant sur ce territoire ainsi que sur la stratégie et les solutions à mettre en œuvre pour s'en protéger ou pour les gérer. Cette présentation fait un focus sur les modélisations de submersion marine réalisées dans le cadre de cette étude.

Le territoire de l'Aude a été peu étudié vis-à-vis des submersions marines et seulement par des méthodes simples de type projection de niveau d'eau. Ceci s'explique peut-être par l'absence de tempête récente majeure en termes de risque, les tempêtes contemporaines les plus notables étant décembre 1997 et novembre 1982 (tempêtes de période de retour pluri décennale). Cependant, au vu de la complexité du territoire, avec de nombreuses structures anthropiques (digues, merlons, murets) ou naturelles (cordons dunaires) et des systèmes lagunaires très étendus reliés par divers chenaux et canaux, seule une modélisation fine des phénomènes peut permettre de décrire et de comprendre la dynamique des submersions marines et les risques associés.

Ainsi, BRLi a mis en place une modélisation Telemac2D pour étudier l'aléa submersion marine sur ce territoire. Le modèle est composé de deux parties : une partie Sud qui englobe la zone autour de l'étang de Salses Leucate et une partie Nord qui comprend le complexe lagunaire de la Palme, les étangs autour de Bages-Sigean, les étangs grissanais et toute la zone basse de part et d'autre du fleuve Aude. Ces modèles de grande ampleur couvrent à eux deux plus de 360 km², avec des mailles allant de quelques mètres à la centaine de mètres pour un total de 1.3 millions de nœuds.

Thème 7 – Risques côtiers

Les résultats des modélisations, parfois inattendus, ont permis d'apporter des éléments de réponses à de nombreuses questions : Quels sont les enjeux soumis à l'aléa submersion marine sur le territoire ? Quelle est l'influence des divers ouvrages de protection du littoral sur les phénomènes de submersion marine ? Dans quelle mesure les étangs jouent un rôle d'atténuation des submersions marines dans la zone rétro littorale ? Quelles sont les entités physiques structurantes à l'échelle du territoire ?

La méthodologie employée pour la mise en place et l'utilisation des modèles (construction / calage / forçage) ainsi que le détail des résultats des modélisations seront présentées lors du colloque.

Mots-clés :

Submersion marine, Modélisation numérique, Telemac2D, Stratégie littorale, Aléa, enjeux, Etangs, Tempête marine.

1. Introduction

Le Syndicat Mixte du Delta de l'Aude (SMDA), appuyé du Syndicat Mixte des Milieux Aquatiques et des Rivières (SMMAR), dans le cadre de l'exercice de la compétence GEMAPI, a engagé une étude des structures littorales, anthropiques ou naturelles, jouant un rôle vis-à-vis des aléas littoraux que sont l'érosion du trait de côte et la submersion marine.

Le périmètre de cette opération s'étend à l'ensemble de la façade maritime des bassins versants de l'Aude, de la Berre et des Corbières Maritimes, allant de Vendres à Leucate. Il comprend également l'ensemble des communes limitrophes des étangs et lagunes présents sur la Narbonnaise. L'étude a pour objectifs d'apporter une vision technique sur les risques littoraux (érosion et submersion marine) pesant sur ce territoire ainsi que sur la stratégie et les solutions à mettre en œuvre pour s'en protéger ou pour les gérer.

Le territoire de l'Aude a été peu étudié vis-à-vis des submersions marines et seulement par des méthodes simples de type projection de niveau d'eau. Le présent article décrit les modélisations numériques Telemac2D réalisées dans le cadre de cette étude pour améliorer la qualification de l'aléa submersion marine et notamment répondre à des questions clés : Quels sont les enjeux soumis à l'aléa submersion marine sur le territoire ? Quelle est l'influence des divers ouvrages de protection du littoral sur les phénomènes de submersion marine ? Dans quelle mesure les étangs jouent un rôle d'atténuation des submersions marines dans la zone rétro littorale ? Quelles sont les entités physiques structurantes à l'échelle du territoire ?

2. Construction du modèle

Les submersions marines sont liées aux tempêtes marines, qui peuvent être caractérisées par une houle et un niveau d'eau élevés. Le niveau d'eau marin est régi par quatre contributions principales : la marée astronomique ; le vent (il peut avoir une incidence en

« inclinant » le plan d'eau) ; la houle (une forte houle a tendance à augmenter les niveaux marins à la côte par déferlement bathymétrique) ; la pression atmosphérique (les dépressions peuvent générer une surcote barométrique).

Afin de modéliser les conséquences des tempêtes sur le littoral et notamment dans les zones de faible altimétrie, le modèle s'étend depuis le littoral vers les zones basses, et s'arrête quand l'altimétrie devient plus importante. Quatre grandes zones sont ainsi couvertes du Nord au Sud : les abords du fleuve Aude, le complexe lagunaire de Bages Sigean, l'étang de la Palme et l'étang de Salses Leucate tel qu'illustré sur la figure 1 à suivre. La zone couverte dépasse 36 000 ha.

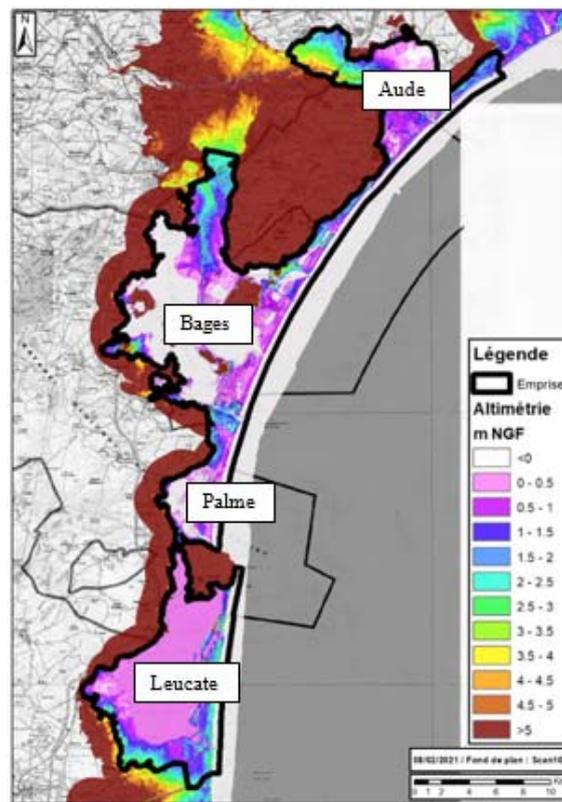


Figure 1. Emprise de la modélisation.

Le modèle est forcé au niveau du trait de côte par un signal prenant en compte toutes les composantes des niveaux d'eau de tempête comme expliqué précédemment.

La résolution du maillage retenue est variable dans l'espace, avec un compromis entre finesse (3-5m au plus fin) pour bien représenter la physique des phénomènes et taille suffisamment grande pour avoir un temps de calcul raisonnable (100-200m au plus grossier). Des lignes de structures sont placées sur les géométries clés de la zone d'étude, à savoir : remblais (route, voie ferrée, etc...), ouvrages (merlon, enrochement, muret, cordon dunaire) et écoulements linéaires (fleuves, chenaux, fossés, etc...). Le modèle (en deux parties pour des raisons pratiques) compte au total plus de 1.3 millions de nœuds.

Thème 7 – Risques côtiers

Un assemblage topographique et bathymétrique regroupant une vingtaine de données (lidar, profils en travers, nuage de points, etc.) a été utilisé pour renseigner l'altimétrie du maillage. Les coefficients de rugosité du maillage (coefficients de Strickler) ont été renseignés avec des valeurs usuelles pour ce genre de modélisation. Enfin, à noter qu'un certain nombre d'ouvrages ponctuels ont été pris en compte, avec un traitement distinguant les ouvrages dit « à surface libre » (modification topographique) et les ouvrages « en charge » (utilisation d'un module Telemac spécifique).

3. Calage et tests de sensibilité

L'objectif du calage du modèle était double. Il s'agissait d'une part de vérifier si la propagation d'un signal de forçage unique avec le marégraphe de Port-la Nouvelle comme « référence » était judicieux et d'autre part de vérifier que le modèle permettait de bien propager les niveaux d'eau à l'arrière du trait de côte dans un vaste système lagunaire.

Le calage sur une tempête de 2018, avec des données mises à disposition par le Parc Naturel Régional de la narbonnaise, a permis de vérifier le premier point et le calage sur une tempête de 1996, avec des données mises à disposition par le CEREMA (CETE, 2007), le second. Le choix des tempêtes de calage, sélectionnées préalablement grâce à la base de données du réseau tempête (DE LA TORRE & BALOUIN, 2012), a été dicté par la disponibilité de données concomitantes de niveau d'eau historique près du trait de côte et dans les zones basses arrière.

La sensibilité du modèle a été vérifiée pour trois paramètres, à savoir le pas de temps, les conditions initiales et le coefficient de Strickler. La sensibilité au pas de temps est quasi nulle. La sensibilité aux conditions initiales est très faible : si suffisamment de temps est laissé au système (au modèle) avant la tempête, il se rééquilibre. L'influence peut néanmoins se faire sentir sur des petites zones où l'eau ne pénètre pas ou peu. La sensibilité au coefficient de Strickler est visible, de l'ordre de 5% de variation du niveau d'eau pour une variation de coefficient de Strickler de 20%.

4. Scénarii modélisés

Après étude des données de surcotes disponibles dans le Golfe du Lion (GERVAIS, 2012 ; ULLMANN, 2008), plusieurs scénarii de modélisation ont été définis spécifiquement sur le secteur d'étude de manière à prendre en compte les composantes principales inhérentes aux phénomènes de submersion marine, à balayer plusieurs occurrences de tempêtes, à intégrer l'influence de brèches ou de l'érosion côtière. Ce travail s'est fait de façon itérative, d'abord en balayant les niveaux d'eau puis en prenant en compte les brèches et l'érosion côtière.

Plusieurs paramètres sont pris en compte : le niveau d'eau, calculé de façon statistique, variable dans le temps et imposé à la frontière du modèle ; le vent, calculé de façon statistique, variable dans le temps et imposé sur tout le modèle ; des brèches dans les

ouvrages en dur (enrochement, muret, merlon) en lien avec l'état de celui-ci, prises en compte dès le début de la simulation, en modifiant la topographie du modèle ; un trait de côte prospectif avec une érosion entraînant des brèches dans les cordons dunaires également intégré dès le début de la simulation.

Le tableau 1 suivant récapitule les hypothèses qui ont été choisies pour définir les sept scénarii modélisés.

Tableau 1. Récapitulatif des scénarii.

<i>Scénario</i>	<i>Période de retour (ans)</i>	<i>Niveau d'eau et surcote</i>		<i>Brèche</i>	<i>Trait de côte</i>
		<i>Niveau d'eau total (m NGF)</i>	<i>Dont changement climatique (cm)</i>		
<i>1</i>	<i>10</i>	<i>1.84</i>	<i>20</i>	<i>Non</i>	<i>Actuel</i>
<i>2</i>	<i>50</i>	<i>2.07</i>	<i>20</i>	<i>Non</i>	<i>Actuel</i>
<i>3</i>	<i>100</i>	<i>2.46</i>	<i>20</i>	<i>Non</i>	<i>Actuel</i>
<i>4</i>	<i>100</i>	<i>2.86</i>	<i>60</i>	<i>Non</i>	<i>Actuel</i>
<i>5</i>	<i>1000</i>	<i>4.07</i>	<i>100</i>	<i>Non</i>	<i>Actuel</i>
<i>3B</i>	<i>100</i>	<i>2.46</i>	<i>20</i>	<i>Oui</i>	<i>2045</i>
<i>4B</i>	<i>100</i>	<i>2.86</i>	<i>60</i>	<i>Oui</i>	<i>2100</i>

5. Résultats des modélisations

5.1 Aléa submersion marine / Enjeux

Le scénario 5 n'a pu être exploité car il dépassait les capacités du modèle.

Concernant les scénarii 1 à 4, les emprises des zones inondées et les niveaux atteints sont classés en fonction de la période de retour du scénario. Le scénario « de bascule » qui entraîne des inondations conséquentes dans des zones habitées est le scénario 2 (période de retour 50 ans) ou le scénario 3 (période de retour 100 ans) suivant les endroits (analyse qualitative).

En termes d'enjeux inondés, une analyse quantitative a été faite en les classifiant tel que présenté dans le tableau 2 suivant.

Tableau 2. Enjeux inondés (surface et proportion).

<i>Classes d'enjeux / Scénario</i>		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>3B</i>	<i>4</i>	<i>4B</i>
<i>Enjeux faibles</i>	<i>Surface (Ha)</i>	<i>15 900</i>	<i>16 200</i>	<i>16 600</i>	<i>16 600</i>	<i>16 800</i>	<i>16 900</i>
	<i>Proportion</i>	<i>89.5%</i>	<i>86.0%</i>	<i>79.6%</i>	<i>79.3%</i>	<i>75.8%</i>	<i>75.8%</i>
<i>Enjeux moyens</i>	<i>Surface (Ha)</i>	<i>600</i>	<i>900</i>	<i>1 400</i>	<i>1 400</i>	<i>1 600</i>	<i>1 600</i>
	<i>Proportion</i>	<i>3.3%</i>	<i>4.9%</i>	<i>6.5%</i>	<i>6.7%</i>	<i>7.3%</i>	<i>7.3%</i>
<i>Enjeux forts</i>	<i>Surface (Ha)</i>	<i>1 300</i>	<i>1 700</i>	<i>2 900</i>	<i>2 900</i>	<i>3 700</i>	<i>3 800</i>
	<i>Proportion</i>	<i>7.2%</i>	<i>9.1%</i>	<i>13.8%</i>	<i>14.0%</i>	<i>16.9%</i>	<i>16.9%</i>
<i>Total</i>	<i>Surface (Ha)</i>	<i>17 800</i>	<i>18 900</i>	<i>20 800</i>	<i>21 000</i>	<i>22 200</i>	<i>22 300</i>

Thème 7 – Risques côtiers

De façon tout à fait logique, plus le scénario est défavorable, plus il y a d'enjeux en zone inondée. L'influence des brèches et des traits de côte prospectifs sont très faibles : le scénario 3B est quasi identique au 3 et le scénario 4B est quasi identique au 4. Plus le scénario est défavorable, plus les enjeux classés comme « importants » (moyens ou forts) sont touchés en proportion. Quand le scénario devient de plus en plus défavorable, la surface totale inondée croît peu mais la proportion d'enjeux « importants » (moyens ou forts) touchés augmente nettement.

5.2 Influence des ouvrages

L'influence des brèches et de l'érosion (scénarii 3B et 4B) reste assez faible et locale. En effet, les zones inondées par les brèches ou l'érosion sont déjà inondées par ailleurs. Néanmoins, une influence des brèches à Leucate Plage (zone à enjeux) se ressent.

Des ouvrages de protection contre les submersions sont présents sur plusieurs secteurs de la zone d'étude mais, lors de submersions importantes, ils sont souvent contournés avant d'être éventuellement surversés. Le muret de front de mer de Narbonne Plage (MU5 - MU6) est un parfait exemple comme illustré sur la figure 2 à suivre : l'eau inonde par le port et les Exals sans passer par-dessus le muret.



Figure 2. Hauteur d'eau à Narbonne Plage (tempête cinquantennale).

5.3 Influence des étangs

La dynamique des submersions est assez complexe avec la présence de nombreux étangs et de connexions hydrauliques, notamment sur le secteur de l'étang de Bages Sigean et à Leucate.

Les étangs peuvent jouer un rôle « tampon », mais celui-ci dépend grandement de l'alimentation à la mer (taille du grau) et de la surface de l'étang. L'étang de Salse Leucate et l'étang de la Palme sont ceux qui amortissent le mieux les submersions. Au contraire, l'étang de l'Ayrolle ou les étangs de Gruissan laissent entrer l'eau très facilement. L'étang de Bages Sigean est un « intermédiaire », il possède un rôle d'atténuation pour les petites occurrences (scénarii 1 et 2) mais pas pour les tempêtes plus fortes. Le tableau 3 à suivre illustre ces propos.

Tableau 3. Niveau d'eau maximum sur le littoral et dans les différents étangs (en m NGF).

Point d'extraction / scénario	1	2	3	3B	4	4B
<i>Littoral</i>	1.84	2.07	2.46	2.46	2.86	2.86
<i>Etang de Vendres</i>	1.4	1.8	2.5	2.6	3	3
<i>Etang de Pissevaches</i>	1.8	2	2.5	2.5	2.9	2.9
<i>Etang de Gruissan</i>	1.8	2.1	2.5	2.5	2.9	2.9
<i>Etang de l'Ayrolle</i>	1.9	2.1	2.5	2.6	3	3
<i>Etang de Bages Sigean</i>	1.2	1.5	2.4	2.4	3.1	3.1
<i>Etang de la Palme</i>	1.1	1.2	1.4	1.4	2	2
<i>Etang de Salses Leucate</i>	1	1.1	1.4	1.6	2	2.4

5.4 Entités physiques structurantes

La voie ferrée ainsi que les remblais du canal de la Robine, qui séparent l'étang de Bages Sigean de l'étang de l'Ayrolle sont des éléments structurants vis-à-vis des submersions. Ils forment une barrière qui coupe en deux (Est-Ouest) les submersions pour les événements de période de retour faible (10 ans - scénario 1 et 50 ans - scénario 2). La différence de niveau d'eau (60cm-70cm) de part et d'autre de cet ouvrage est marquée pour ces scénarii, tel qu'illustré sur la figure 3 à suivre.

Thème 7 – Risques côtiers

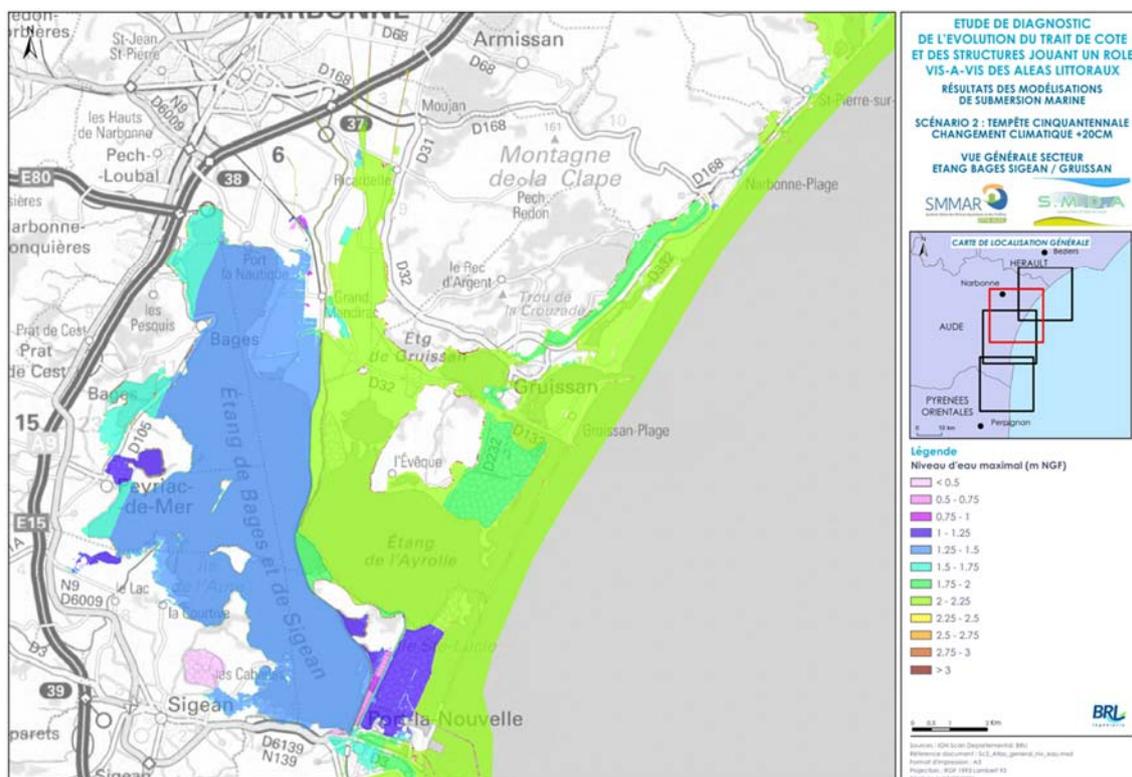


Figure 3. Niveau d'eau dans les étangs du narbonnais (tempête cinquantennale).

5.5 Comparaison avec des études existantes

Le littoral audois a peu été étudié du point de vue des submersions marines et uniquement par des méthodes simples de type projection de niveau. Les résultats de la présente étude sont comparés ici avec ceux du Plan de Prévention des Risques Inondation (PPRI) sur deux scénarii « similaires ». Le tableau 4 suivant présente les hypothèses de niveau d'eau retenues dans l'étude BRLi en comparaison avec le PPRI.

Tableau 4. Comparaison des hypothèses de l'étude avec des scénarii PPRI.

Scénario	Période de retour (ans)	Niveau d'eau étude (m NGF)	Niveau d'eau PPRI (m NGF)	Dont changement climatique (cm)
3	100	2.46	2	20
4	100	2.86	2.4	60

A noter que le niveau d'eau est variable dans le temps pour les modélisations BRLi et que le maximum du signal de niveau d'eau est indiqué dans le tableau 4. En termes de résultats, la figure 4 à suivre présente une planche du scénario 3 à comparer avec un niveau d'eau constant à 2 m NGF pour le PPRI.

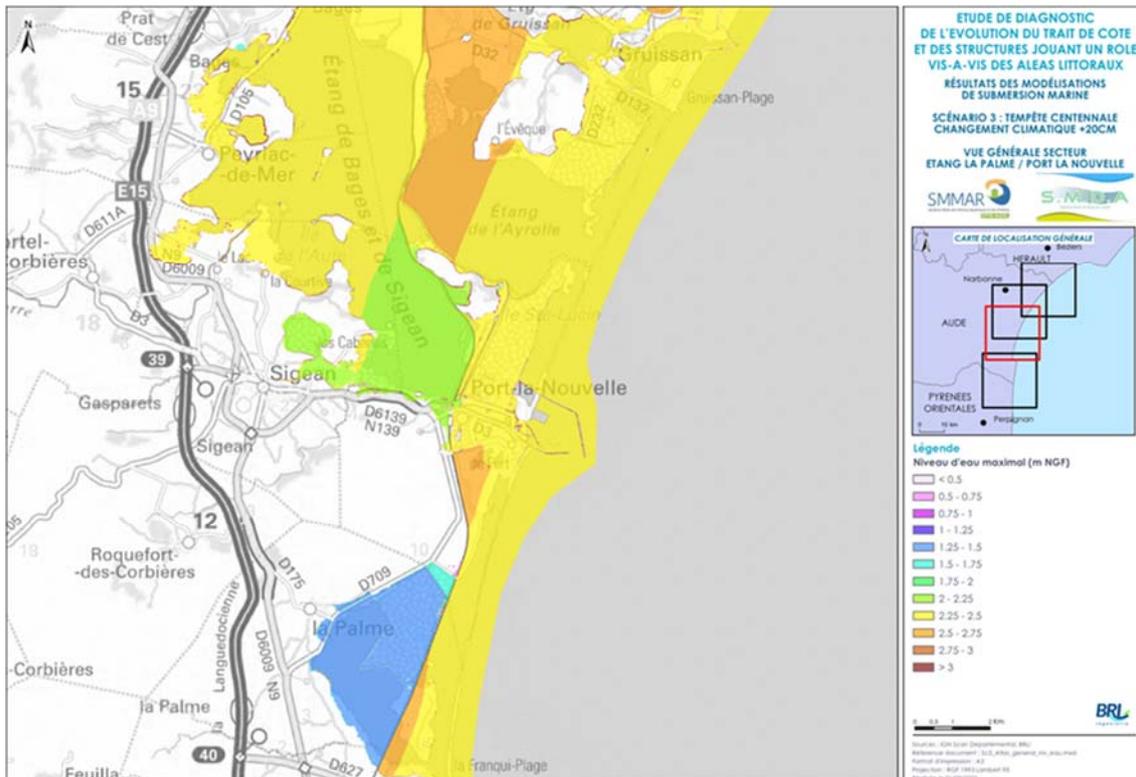


Figure 4. Niveau d'eau dans le Sud du Narbonnais (tempête centennale).

Le niveau d'eau maximum imposé à la frontière dans les modélisations est supérieur aux hypothèses du PPRI. Globalement cette différence se traduit dans les résultats de l'étude BRLi avec des niveaux d'eau plus élevés, notamment dans une grande partie Nord. Cette différence s'accroît souvent à l'arrière des zones inondées du fait de l'influence du vent. On peut remarquer également que les niveaux d'eau modélisés dans l'étang de la Palme comme illustré ci avant mais aussi dans l'étang de Salses Leucate (cf. chapitre sur l'influence des étangs), à savoir de l'ordre de 1.4 m NGF, sont bien plus faibles que 2 m NGF dans le PPRI. Tout ceci montre les nuances que peuvent apporter l'utilisation d'un signal variable dans le temps avec un modèle hydraulique comparé à une projection de niveau dans des secteurs où les écoulements sont complexes.

5.6 Limites du modèle

Le modèle proposé possède un certain nombre de limites. Les forçages sont calculés en un point du modèle, à Port-La-Nouvelle. Même si ce point est représentatif de la zone, comme vérifié lors du calage, il se peut qu'il y ait quelques variations locales sur le secteur d'étude de l'ordre d'une dizaine de centimètres.

Thème 7 – Risques côtiers

Le vent est pris en compte avec une direction unique et défavorable dans l'ensemble (à savoir perpendiculairement au trait de côte). Les modélisations montrent que le plan d'eau s'incline dans les étangs. Un changement de direction du vent, même faible, modifierait les résultats en arrière des étangs.

Pour représenter de façon artificielle les bâtiments, un coefficient de Strickler équivalent est pris en compte. Cette technique, très efficace pour les hauteurs d'eau et les niveaux d'eau, sous-estime en revanche grandement les vitesses. Au vu de l'échelle de l'étude, des modélisations « à la rue », avec prise en compte des écoulements entre les bâtiments n'étaient néanmoins pas possibles.

6. Conclusion

Dans le cadre d'une étude pour le compte du SMDA appuyé par le SMMAR, BRLi a mis en place un modèle numérique Telemac2D afin d'affiner les connaissances concernant l'aléa submersion marine sur le territoire de l'Aude.

D'un point de vue hydraulique, le scénario « de bascule » qui entraîne des inondations conséquentes dans des zones habitées est le scénario 2 (période de retour 50 ans) ou le scénario 3 (période de retour 100 ans) suivant les endroits. Les ouvrages de protection du littoral sont souvent contournés avant d'être surversés lors des épisodes de submersion. Le rôle tampon des étangs est assez limité sur le secteur, seuls les étangs de Salses Leucate, la Palme et Bages Sigean dans une moindre mesure, jouent ce rôle. La voie ferrée ainsi que les remblais du canal de la Robine sont des éléments structurants vis-à-vis des submersions marines de période de retour faible (10 ans – scénario 1) à moyenne (50 ans – scénario 2).

Ces informations seront utilisées dans la suite de l'étude pour la phase stratégie et le plan d'action.

7. Références bibliographiques

CETE (2007). *Digitalisation de signaux marins ou d'étangs du Golfe du Lion. Marégraphes gérés par le SMNLR, la CSME, le PAM et la SNPN-RNC*. 182p.

https://www.cerema.fr/system/files/documents/2017/10/Exemple%20d%27utilisation_0.pdf

DE LA TORRE Y., BALOUIN Y. (2012). Mise en œuvre opérationnelle du « Réseau Tempête » sur le littoral du Languedoc-Roussillon. Rapport BRGM/RP-60694-FR ; 97 p., 15 ill., 5 ann.

GERVAIS M. (2012). *Impacts morphologiques des surcotes et vagues de tempêtes sur le littoral méditerranéen*, Thèse de doctorat, Université de Perpignan Via Domitia, 401p.

ULLMANN A. (2008). *Surcotes dans le Golfe du Lion et conditions atmosphériques : variabilité contemporaine et future (1905-2100)*. Thèse de doctorat, Université de Provence - Aix-Marseille I 334p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00305449>