HAL
open science

L'aléa submersion marine sur la rive interne du Bassin d'Arcachon : exposition actuelle, cartographie prévisionnelle et capacité d'atténuation par la restauration des marais salés

Frédéric Bertrand, Lydie Goeldner-Gianella, Brice Anselme, Paul Durand, Yves-François Thomas, Aldo Sottolichio, Nadia Sénéchal

To cite this version:

Frédéric Bertrand, Lydie Goeldner-Gianella, Brice Anselme, Paul Durand, Yves-François Thomas, et al.. L'aléa submersion marine sur la rive interne du Bassin d'Arcachon : exposition actuelle, cartographie prévisionnelle et capacité d'atténuation par la restauration des marais salés. Connaissances et compréhension des risques côtiers : aléas, enjeux, représentations, gestion, Jul 2014, Brest, France. p. 124-134. hal-01178154

HAL Id: hal-01178154

https://hal.science/hal-01178154

Submitted on 17 Jul 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'aléa submersion marine sur la rive interne du Bassin d'Arcachon : exposition actuelle, cartographie prévisionnelle et capacité d'atténuation par la restauration des marais salés

Frédéric Bertrand[1], Lydie Goeldner-Gianella[2], Brice Anselme[2], Paul Durand[2], Yves-François Thomas[3], Aldo Sottolichio[4], Nadia Sénéchal[4]

1. Géographie, UMR 8586 PRODIG, Université Panthéon-Sorbonne (Paris 4). 191 rue Saint-Jacques 75005 PARIS frederic.bertrand@paris-sorbonne.fr
2. Géographie, UMR 8586 PRODIG, Université Paris1-Panthéon-Sorbonne. 191 rue Saint-Jacques 75005 PARIS Lydie.Goeldner@univ-paris1.fr, Brice.Anselme@univ-paris1.fr, Paul.Durand@univ-paris1.fr
3. Géographie, UMR CNRS 8591 LGP, 1 place Aristide Briand 92195 MEUDON CEDEX- France thomas.yves-francois@wanadoo.fr
4. Océanographie, UMR CNRS 5805 EPOC, Université Bordeaux I. Avenue des Facultés - 33405 TALENCE CEDEX – France a.sottolichio@epoc.u-bordeaux1.fr, n.senechal@epoc.u-bordeaux1.fr

ABSTRACT.
The BARCASUB research programme dealt with coastal flooding risk in the Arcachon Basin (France) and with the possible management of this risk through a soft defense preventive measure: "de-polderisation". The article doesn't describe the whole aspects of the programme. It only presents the assessment method used the following steps that we have followed: (1) characterization of water levels during Klaus and Xynthia storm events, (2) evaluation of extremely high water levels in front of seewall based on different storm and sea level rise scenarios, (3) modelling extreme sea level ashore, (4) analysis of sediment accretion and vegetation dynamics in "depolderized" areas.

RESUME.
Le programme BARCASUB a porté sur le risque de submersion marine à l'intérieur du bassin d'Arcachon (France) et sur la gestion potentielle de ce risque par une mesure souple de défense : la "dépoldérisation". La communication détaille les méthodes suivies et les résultats obtenus aux différentes étapes de la méthode d'évaluation de la submersibilité: (1) détermination de la hauteur du plan d'eau lors des épisodes tempétueux Klaus et Xynthia, (2) évaluation des niveaux d'eau extrêmes au front des digues de mer en fonction de plusieurs scénarios de tempête et d'élévation du niveau marin, (3) modélisation des niveaux extrêmes « à terre », (4) suivi de l'accrétion sédimentaire et de la dynamique végétale dans les zones dépoldérisées.

KEYWORDS : coastal flooding, de-polderisation

Mots-clés : submersion, aléa, modélisation, accrétion sédimentaire, végétation, atténuation.

1. Introduction

Le fond du Bassin d'Arcachon désigne la partie interne de cette lagune méso-tidale correspondant *grosso modo* à l'aire d'extension du delta de la Leyre liée au comblement lagunaire régressif de la vallée de la Leyre depuis 2.500 B.P. (Bertrand, 2013). Le programme de recherches BARCASUB (2010-13) a porté sur le risque de submersion marine des rives endiguées de ce secteur et sur la gestion potentielle de ce risque par la technique de la "dépoldérisation" (Bertrand & Goeldner-Gianella, 2013). Le projet a associé cinq équipes - les UMR PRODIG, LGP, EPOC, le BRGM et l'EA PRISM - et quatre gestionnaires locaux dont le Conservatoire du Littoral autour d'un diagnostic de vulnérabilité dont les deux premiers volets portaient sur la submersibilité et sur la capacité d'adaptation des marais aux changements hydromorphologiques.

Le premier volet du diagnostic a consisté à caractériser le phénomène générateur de danger depuis la formation de la surcote marine à l'entrée de la lagune jusqu'au déclenchement de la submersion au fond du bassin en tentant de préciser la contribution des différents facteurs aux surcotes extrêmes (pression, vent, vagues, jet de rive). Etant entendu que la houle ne rentre pas dans le bassin mais que le volume d'eau qu'elle déplace s'y propage (Sénéchal *et al.*, 2013), une des questions centrales est de savoir de quelle manière s'effectue cette propagation en fonction des configurations bathymétriques et morphologiques de la lagune. Pour tenter de répondre à cette question, plusieurs simulations, d'abord rétrospectives pour les tempêtes Klaus (24/1/2009) et Xynthia (27-28/2/2010) puis prospectives, ont été effectuées en étudiant les variations du plan d'eau et les caractéristiques des vagues (Fig.2), le long d'un profil transversal dont l'extrémité distale est située devant la digue frontale du domaine de Certes (Fig.1).

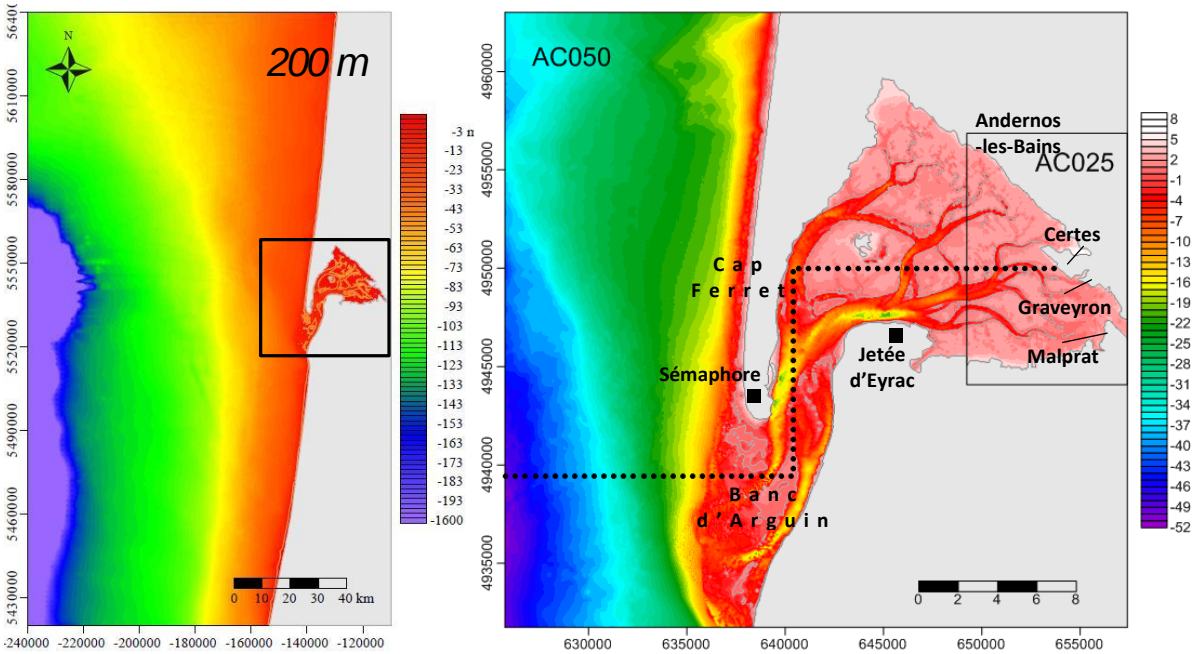


Fig. 1 : Emprises des MNT emboités élaborés pour la modélisation des surcotes au fond du Bassin d'Arcachon. En pointillé, tracé du profil de variation du plan d'eau et des caractéristiques des vagues depuis le large jusqu'au pied de la digue frontale du domaine de Certes.

Le second volet du diagnostic de vulnérabilité visait à évaluer le potentiel de préservation des marais maritimes face à l'évolution du niveau moyen de la mer afin d'étudier le rôle des facteurs morpho-sédimentaires dans l'occurrence des submersions. Les besoins de connaissances sur la dynamique des marais ont conduit à développer deux approches complémentaires : des suivis stationnels de l'accrétion sédimentaire et de la biodiversité et une cartographie sectorielle détaillée des habitats, de façon à évaluer dans quelle proportion et selon quelles modalités la perte de marais salés en front de domaine endigué - consécutive à un renforcement de l'érosion - pouvait être compensée par la reconquête du schorre dans les marais dépoldérisés et régulièrement submergés.

2. Simulation rétrospective des niveaux d'eaux extrêmes au droit des domaines endigués

2.1. Les données utilisées

Un gros travail d'harmonisation des données existantes et d'amélioration de la précision des modèles bathymétriques existants grâce à l'intégration de données récentes LIDAR haute résolution (2005) a permis l'élaboration de 3 modèles bathymétriques emboîtés les uns dans les autres. Le premier MNT, de résolution 200 m, couvre le golfe de Gascogne jusqu'à environ 80 km au large (Fig.1). Le second, de résolution 50 m, englobe le bassin d'Arcachon. Le troisième, de résolution 25 m, recouvre la zone expérimentale du fond de la lagune. Ces MNT ont permis de procéder à une modélisation emboîtée de la propagation des houles depuis la première grille de résolution grossière jusqu'à la dernière de résolution la plus fine.

Pour les deux évènements simulés, le modèle a été forcé avec les conditions de houle – hauteur significative, période et direction – issues du modèle Wavewatch III (WW-3) de la NOAA. Le vent appliqué sur l'ensemble des grilles est celui des modèles CFRS pour Klaus et GFS pour Xynthia, qui produisent des données selon un pas de temps de 3 heures et une résolution spatiale de 0,5°. Par rapport à un traitement statistique qui ne tiendrait compte que du vent maximal quotidien, le traitement d'une longue série (168.300 mesures allant du 1/1/1949 au 28/2/2010) tri-horaire de vent (direction et force) et de pression atmosphérique apporte une précision importante sur la fréquence et la durée des phénomènes combinés susceptibles de provoquer des submersions.

2.2. Modélisation des niveaux d'eau liés aux forçages océaniques lors des tempêtes passées

Le forçage océanique des niveaux d'eau a été calculé par l'utilisation du modèle SWAN et ses résultats discutés à la lumière d'une analyse des surcotes enregistrées par le marémètre d'Eyrac. Les résultats (Fig.2) montrent que la surélévation due aux vagues océaniques à l'entrée du bassin a été deux fois supérieure pour la tempête Klaus (0,58 m) que pour Xynthia (0,17 m), ce qui est logique compte tenu de la hauteur des houles modélisée (12 m *vs* 6 m) et en cohérence avec les hauteurs enregistrées au large du Cap Ferret, dans la zone couverte par la modélisation (H1/3 maximales de 11,3 m pour Klaus et de 5,05 m pour Xynthia). L'analyse des données marégraphiques montre que des surcotes allant jusqu'à 50 cm ne sont pas rares et reviennent tous les ans. Les surcotes d'au moins 80 cm sont moins fréquentes sans être exceptionnelles : une surcote de cet ordre survient en moyenne une année sur deux. On compte une surcote de plus d'1 m en 2008 et une autre en 2009. La corrélation très forte entre les pics de surcote horaire observés (1,79 m le 24/1/2009 à 08h00 et 0,86 m lors de Xynthia) et les valeurs de set-up simulées à Eyrac montre l'importance de ce

paramètre dans la détermination des niveaux extrêmes à l'entrée du bassin ainsi qu'au fond du bassin où les valeurs de *wave set-up* océanique simulées à Eyrac, respectivement 0,58 et 0,17 m ont été extrapolées[13].

Pour déterminer les niveaux maxima atteints au fond du bassin nous avons additionné aux niveaux modélisés à l'entrée de la lagune, la différence entre les niveaux d'eau simulés par le code MARS entre Eyrac et Andernos, plus au nord du secteur étudié, soit 0.38 m (Mugica *et al*., *op.cit.*). Cette valeur qui correspond à la surélévation due à la propagation de la marée météorologique (set-up barométrique + set-up du vent) a permis de déterminer, au droit des domaines de Certes et Graveyron, des niveaux d'eau extrêmes de 3,47 m et de 3,22 m NGF liés à des dépassements anormaux de niveaux d'eau de 1,72 m et 0,72 m lors des tempêtes Klaus et Xynthia. Ces niveaux d'eaux simulés apparaissent sensiblement plus bas que les niveaux d'eaux observés à proximité du domaine de Certes au cours des deux événements, l'altitude des laisses de mer (3.70 m NGF) déposées lors de Xynthia sur la digue de ceinture de Certes (Bertrand *et al*., 2013) et de l'arase du muret (comprise 4.3 m et 3.94 m NGF) qui protège le quartier du Mauret à Andernos-les-Bains et n'a pas empêché sa submersion lors de Klaus (Mallet *et al*., 2009). La surcote liée au vagues océaniques ne suffit donc pas à rendre compte des dépassements anormaux de niveau d'eau et des risques de submersion associés dans le fond du bassin.

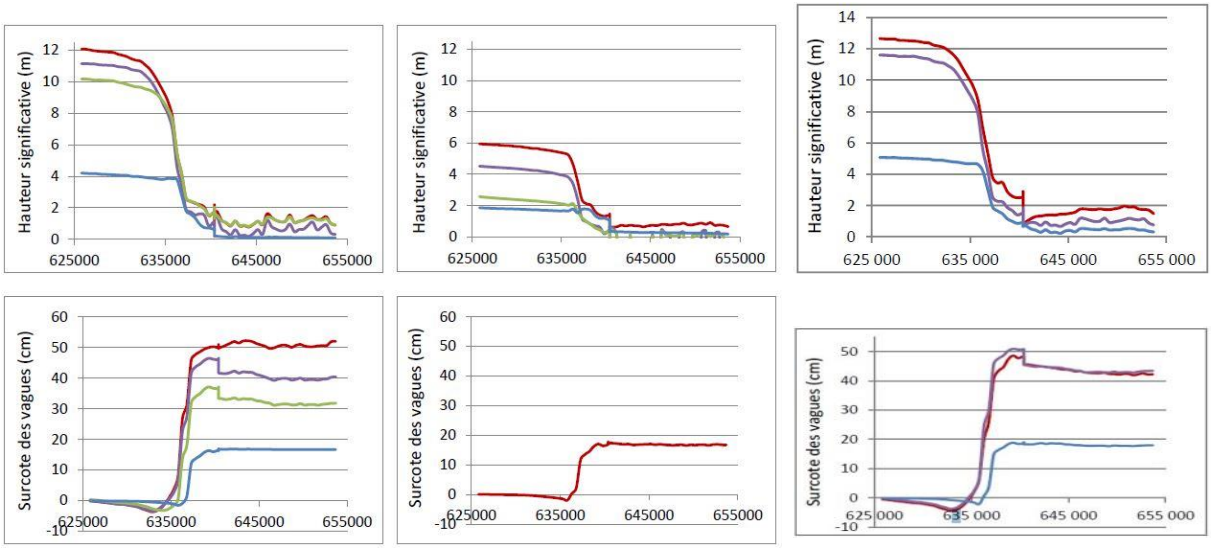


Fig. 2 : Variations des caractéristiques des vagues et de la surcote associée le long du profil transversal de la lagune (cf. Fig.1) lors des tempêtes Klaus (à gauche), Xynthia (au centre) et Horribilis pour une ENM de 25 cm (à droite). Les courbes rouges correspondent au pic des tempêtes, les violettes 3 heures avant le pic, les vertes 6 heures avant le pic et les bleues 9 heures avant le pic.

Afin de s'affranchir de l'influence des forçages océaniques, les conditions d'agitation du plan d'eau lors des tempêtes Klaus et Xynthia ont été reproduites en fermant artificiellement la lagune et

[13] Le modèle SWAN n'étant pas conçu pour calculer le set-up des vagues en milieu semi-fermé, il a été considéré que le set-up modélisé à l'entrée du bassin restait le même dans toute la lagune, même si sa valeur devrait logiquement diminuer en raison de l'augmentation du rayon hydraulique liée à l'élargissement du bassin.

en n'utilisant qu'une seule grille, de résolution moyenne (50 mètres), limitée à l'Ouest par la flèche du cap Ferret et couvrant le bassin d'Arcachon. Le modèle a été forcé en entrée avec les mesures issues du sémaphore du Cap enregistrées aux pics des tempêtes, les hauteurs d'eau entrées étant celles enregistrées au marémètre d'Eyrac. Le modèle implanté a été validé par comparaison des données simulées aux mesures de vagues réalisées *in situ,* en décembre 2006 (Parisot *et al*., 2008). La simulation du clapot lors des deux événements Klaus et Xynthia fait ressortir logiquement l'influence du niveau de marée sur le fetch et donc sur la formation des vagues. Pour autant, la morphologie de la lagune semble encore imposer sa marque sur la formation et la propagation du clapot à marée haute car l'analyse fait apparaître un axe préférentiel de formation de clapot orienté ouest-est, présent aussi bien au moment de la pleine mer de la tempête Klaus que deux heures avant celle de la tempête Xynthia, contraint dans les deux cas par la bathymétrie.

3. Modélisation prospective des niveaux d'eau extrêmes en fonction de scénarios catastrophes

3.1. Paramètres retenus pour la simulation des tempêtes horribilis

L'analyse statistique des données tri-horaires de vent n'ayant montré aucune tendance de variation significative depuis 1949, conformément aux analyses antérieures sur la façade atlantique de la France (Feuillet *et al*., 2012), les paramètres de vents retenus (vitesse et direction) pour la simulation de la tempête horribilis (forçage océanique et clapot) sont ceux de la tempête Klaus au sémaphore du Cap-Ferret. Les paramètres retenus ont été les conditions météo-marines de la tempête Klaus au pic de tempête combinées avec les conditions de vive-eau similaires à celles survenues lors de la tempête Xynthia (coefficient de 102) ou légèrement inférieures (coefficient de 95) mais, en tout état de cause, propices à des niveaux de marée plus élevés que lors de la tempête Klaus (coefficient 58).

L'analyse des données marégraphiques sur la période 1967-2011 a montré une tendance à l'accroissement des niveaux maximaux annuels (+1,26±0,26 cm/an) ainsi que du niveau moyen de la mer (+0,35±0,21 cm/an). Toutefois, ces résultats n'étant pas significatifs en raison du caractère très lacunaire des enregistrements marégraphiques, ils n'ont pas été utilisés pour l'élaboration des scénarii de tempête horribilis pour lesquels ont été reprises in fine les valeurs recommandées de l'ONERC pour la prise en compte du changement climatique suivant les hypothèses pessimistes mais non extrêmes aux échéances de 2030 et 2050, soit respectivement + 0,14 m et + 0,25 m.

3.2. Analyse des forçages océaniques simulés lors d'une tempête horribilis à l'horizon 2050

Le profil utilisé est le même que celui ayant servi à décrire les tempêtes Klaus et Xynthia. Les courbes de variations de hauteur significative le long de ce profil présentent une évolution semblable aux tempêtes précédentes avec une augmentation jusqu'au pic de tempête (Fig.2). En revanche, contrairement au déroulement de Klaus, la surcote des vagues n'augmente pas progressivement, et survient entre une et trois heures avant le pic. Il ressort que l'élévation due à la houle est maximale au niveau des passes où les trains déferlent sur les bancs en avant du goulet, entraînant une surcote

de 0,45-0,50 m immédiatement en arrière des bancs, avant de se propager dans tout le bassin en diminuant légèrement de hauteur jusqu'au fond de la lagune où la surcote avoisine les 40 cm[14].

A l'extrémité du profil, au niveau de la digue ouest du domaine de Certes, l'élévation due aux vagues, dans ce scénario catastrophe représente 20% de la surcote totale. Selon les scénarios envisagés, les niveaux extrêmes culmineraient entre 4,66m (Horribilis coef.95 + 0,14 m) et 4,87 m (Horribilis coef.102 + 0,25 m) au droit des polders. La hauteur des digues entourant les polders de la zone expérimentale ne dépassant pas 4,44 m NGF, les niveaux atteints au pic de la tempête horribilis, pour un scénario pessimiste mais non extrême d'élévation de la mer de 25 cm d'ici 2050, seraient suffisamment hauts pour inonder les polders par simple débordement des digues. Dans le prolongement de la course des vagues, les parties surélevées des domaines endigués (bosses, digues dormantes) seraient exposées au clapot et à son jet de rive, pourrait provoquer des submersions par franchissement et/ou ouverture de brèche. Ce phénomène s'est déjà produit le long des digues-arrières des pointes de Graveyron et de Malprat comme le montre de nombreuses encoches d'érosion récentes.

Finalement, les valeurs de niveaux d'eau retenues pour modéliser la propagation des submersion « terre », c'est-à-dire au-delà des digues frontales, sont celles qui parmi les scénarios modélisés se rapprochent le plus des conditions de submersion spécifiques au fond du bassin (hauteur maximale des digues frontales 4,44m) tout en présentant une probabilité d'occurrence relativement élevée (marée de coefficient 102), soit les valeurs 4,44 m et 4,69 m NGF.

3.3. Analyse du clapot associé à une tempête horribilis simulée

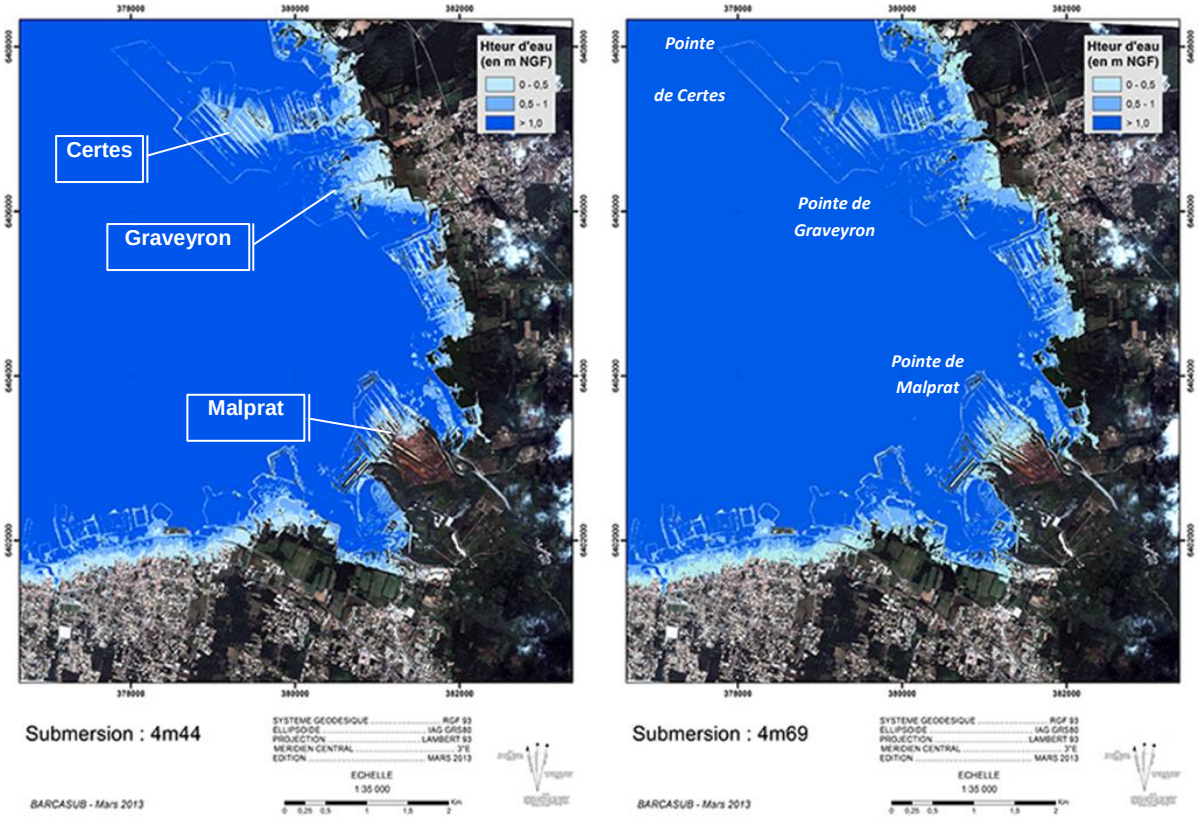
Les conditions d'agitation du plan d'eau ont été reproduites, comme pour les tempêtes Klaus et Xynthia, en fermant artificiellement la lagune et en n'utilisant qu'une seule grille, de résolution moyenne (50m). L'image résultante montre un renforcement et une homogénéisation du clapot avec des valeurs comprises entre 1,50 et 2,00 m quand bien même la direction des agitations n'est pas encore totalement uniforme. Celle-ci l'est beaucoup plus dans la simulation par modèles emboîtés (bassin ouvert) intégrant le forçage océanique où les vagues adoptent très nettement l'orientation de son vent générateur, qui souffle alors du NW. La confrontation des deux simulations– en situation de fermeture ou d'ouverture du bassin - suggère que l'élévation du niveau marin aura pour effet de libérer le clapot des contraintes de la bathymétrie lors de la conjonction de fortes tempêtes et de marées de vives eaux et donc de faciliter sa propagation en direction du fond du bassin.

3.4. Modélisation des niveaux extrêmes à terre

Ceux-ci ont dans un premier temps été estimés en faisant l'hypothèse d'un volume d'eau infini, ce qui revient à calculer le volume total sous le niveau de submersion modélisé, par simple soustraction au MNT. Les volumes obtenus ont ensuite été calés sur les enquêtes et relevés terrain effectués par le BRGM, juste après la tempête Xynthia. Pour les deux scénarios modélisés 4,44 m et 4,69 m, les volumes sont donc respectivement 11,25 millions de m^3 et 13 millions de m^3.

[14] Dans l'étude précédemment menée sur le bassin d'Arcachon par le BRGM (Mugica *et al.*, op.cit.), la modélisation d'un même événement extrême combinant la houle et le vent de Klaus avec la marée de Xynthia ont simulé une surcote liée aux vague augmentant de 40 cm de l'entrée au fond du bassin.

Afin de propager l'eau à terre, le laboratoire PRODIG a développé un algorithme de propagation qui repose sur le principe des automates cellulaires, chaque cellule correspondant aux points Lidar. L'initialisation du programme est effectuée en spécifiant la hauteur d'eau issue des simulations du Labo. de géographie physique de Meudon que l'on souhaite propager à terre. Tant que le volume d'eau global calculé précédemment n'est pas nul, l'eau va se propager de proche en proche depuis la ligne de rivage, en fonction d'une règle qui prend en compte les différences de hauteur (altimétrie et hauteur d'eau) entre cellules voisines. La cartographie établie à partir de cet algorithme (Fig.3) présente une extension de la submersion marine à terre sur 935 ha dans le cas du scénario actuel et sur 1017 ha pour le scénario prospectif.



Scenario 1 actuel : tempête horribilis, coef. 95 sans ENM - Niveau d'eau = 4,44 m

Scenario 2 futur : tempête horribilis, coef.95 + ENM de 0,25m (scenario pessimiste de l'ONERC à l'horizon 2050) - Niveau d'eau = 4,69 m

Fig. 3 : Cartes de submersion des rives fond du bassin obtenues par l'algorithme de propagation. Localisation des domaines endigués et de leurs pointes associées

Les résultats obtenus pour les deux scénarios actuel et prospectif par l'algoritme de propagation permet également d'observer une amplitude plus grande des hauteurs d'eau entre la périphérie et le centre des domaines de Certes et Graveyron notamment (Fig.3). L'explication tient au fait que l'eau se propage progressivement depuis la ligne de rivage vers l'intérieur des terres, en fonction

d'héritages morphologiques conservés au centre des domaines endigués et dont témoignent les cartes anciennes. A l'échelle de la zone d'étude, l'élévation du niveau de la mer renforce la vulnérabilité de zones déjà exposées davantage qu'elle ne l'étend vers l'intérieur des terres.

4. Evaluation de la capacité d'adaptation des marais aux changements de régime de submersion

4.1. Suivis stationnels de l'accrétion sédimentaire et de la dynamique végétale des schorres

L'approche stationnelle a consisté à suivre avec une répétitivité pluri-mensuelle, une sélection d'habitats pertinents du point de vue des fonctions bio-écologiques de base (support et entretien de la fonctionnalité) et des fonctions de régulation (atténuation de l'énergie des vagues) de l'écosystème marais salé. Les données ont été acquises sur un total de 24 stations, reparties en 10 transects perpendiculaires ou légèrement obliques par rapport au trait de côte, selon un protocole de mesure adapté (système des plaques enfouies). Le traitement des données a permis de mesurer le rythme moyen annuel d'exhaussement ou d'abaissement de la surface des marais soumis à un changement de régime de submersion depuis l'ouverture accidentelle des digues des pointes de Graveyron (1996) et de Malprat (1999). A Graveyron, ces données complètent une série de mesures altimétriques effectuées lors d'une première étude en 2003 (Anselme *et al*., 2008) en permettant de déterminer l'évolution à moyen terme du marais.

L'accrétion sédimentaire mesurée aux différents niveaux des schorres externes de Graveyron et de Malprat montre une même évolution contrastée entre, d'une part, les parties inférieures du schorre soumises à un abaissement rapide de la surface et, d'autre part, les parties internes enregistrant un rehaussement vertical accompagné d'une remontée des Spartines et d'espèces caractéristiques d'associations végétales du bas et moyen schorre (*Triglochin maritima* et *Aster tripolium*). Si l'évolution est plus irrégulière à Malprat qu'à Graveyron, en liaison avec des contraintes hydrodynamiques plus fortes, elle participe dans les deux cas à un phénomène de rétrogradation des marais frangeants limitant leur régression sous l'effet érosif du clapot.

Les taux d'accrétion sédimentaires mesurées à Malprat dans l'espace rendu disponible à la sédimentation, montre une sédimentation vaseuse beaucoup plus rapide et généralisée, accompagnée de transformations profondes du couvert végétal. Les valeurs atteignent en plusieurs stations 3,5 cm/an, dépassant ainsi, la remontée régionale du niveau moyen de la mer (3,5 ± 2,1 mm/an) tandis que les Roselières à *Phragmites australis* se développent très rapidement, en direction des parties plus basses soumises, pour leur part, à un processus de colonisation primaire. La progradation rapide du schorre interne, amorcée à partir du déstockage des vasières et marais externes et de la submersion désormais régulière du secteur, favorise davantage qu'à Graveyron, l'atténuation du clapot se propageant à l'intérieur de la zone dépoldérisée lors des tempêtes.

4.2. Analyse diachronique de l'évolution des schorres par télédétection

La donnée image utilisée comme référentiel pour la cartographie des habitats côtiers est l'orthophotographie numérique issue de la mission réalisée en septembre 2009 dont la très haute résolution (0,2 x 0,2 m) offre à une échelle de visualisation allant jusqu'au 1 : 500 une excellente appréciation de la couverture du sol. La très haute résolution des données images a conduit à adopter une approche de classification orientée-objet, employant pour unité de base non plus le

pixel, mais la « région » représentant un ensemble particulier de pixels spatialement contigus, défini par son contour et une combinaison d'attributs spectraux et morphologiques choisie par l'opérateur.

L'ensemble des procédures d'extraction des groupements végétaux ont été effectuées sous le logiciel de Système d'Information Géographique GEOMEDIA d'Intergraph et son extension d'extraction « Analyste d'entité 4.1 » puis validées sur le terrain sur la base du référentiel typologique de la végétation des prés salés défini pour la côte sud du bassin d'Arcachon, à partir de la typologie européenne des habitats élémentaires (Le Nindre *et al*., 2006). La restitution d'un MNT à partir des données LIDAR de 2005, à une échelle adaptée à la cartographie détaillée des unités biomorphosédimentaires (haute slikke, bas-moyen schorre, haut-schorre, zone adlittorale) a permis de préciser l'étagement réel de la végétation du fond bassin par rapport à l'étagement théorique défini pour l'ensemble du bassin.

L'analyse rétrospective de l'évolution des schorres de Graveyron à partir de la comparaison des orthophotographies de 2009 et de 2000 (Fig.4) montre que les espaces correspondant à la haute slikke en 2000 ont largement évolué vers un schorre à l'intérieur de la zone dépoldérisée et que, le long de la frange externe, les surfaces du schorre perdues par érosion frontale ont été compensées en partie par celles gagnées sur la végétation terrestre de la zone adlittorale. Au total, l'ensemble du secteur de la Pointe, intérieur et extérieur confondus, a gagné 2,82 ha de schorre, perdu 0,25 ha de végétation adlittorale et 0,17 ha de végétations de haute slikke, totalisant un gain net de 2,4 de surface végétalisée entre 2000 et 2009.

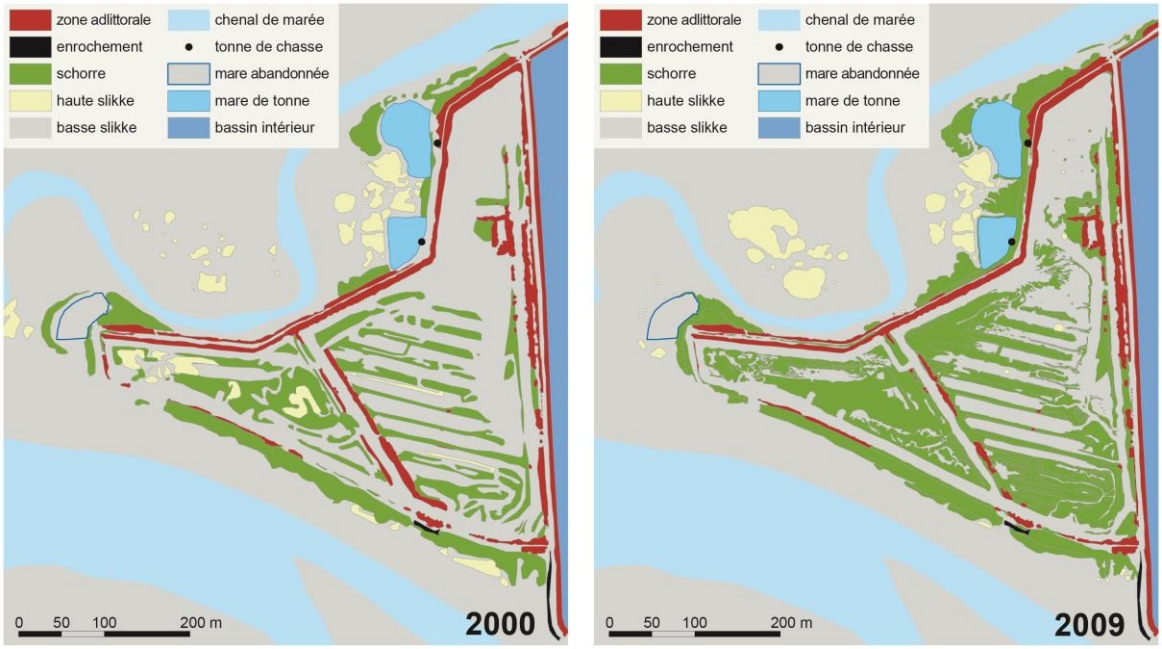


Fig. 4 : Changements dans la répartition des grandes unités bionomiques de la Pointe de Graveyron entre 2000 et 2009

L'analyse statistique de l'évolution altimétrique de 9 profils d'estran levés au DGPS en 2003 puis 2008 montre que les deux modes d'évolution du marais – par progradation dans la partie interne et par rétrogradation dans la partie externe – s'inscrivent, dans une même tendance générale à l'abaissement des surfaces du marais (0,25 m entre 2003 et 2011, soit -3,12 cm/an, à l'intérieur du secteur, 0,22 m entre 2010 et 2011 à l'extérieur). Ainsi et contrairement à Malprat, les processus d'extension horizontale de la végétation sur la slikke nue et de rehaussement de l'ensemble du marais ne semblent pas s'être encore relayés, entraînant un retard dans la restauration des services de régulation du clapot offerts par le marais. L'absence prolongée d'une végétation conquérante susceptible de s'interposer efficacement à la propagation des ondes de tempêtes devrait conduire à valoriser les infrastructures anthropiques existantes (digues dormantes, anciennes bosses) ainsi que les végétations arborescentes (*Tamaris*) encore présentes à l'étage adlittoral quand même certaines d'entre elles (*Baccharis)* peuvent paraître indésirables en raison de leur statut d'espèce invasive.

5. Conclusion

Les approches modélisatrices et expérimentales du fonctionnement du système littoral développées par le programme BARCASUB apportent des éclairages complémentaires dans l'analyse des composantes du risque de submersion marine. La question de l'exposition à l'aléa des rives du fond du bassin est loin d'être résolue compte tenu des incertitudes sur les hauteurs d'eaux « à terre », calculées à partir de données de houles issues elles-mêmes de simulations, et du chaînage de trois modèles hydrodynamiques rendu nécessaire par la complexité hydrologique d'un environnement lagunaire semi-fermé anthropisé. On retiendra toutefois que si la surcote liées aux vagues océaniques (*wave setup*) est un paramètre important à prendre en compte pour la prévision des surcotes au fond du bassin, elle ne joue pas toujours le rôle principal dans la formation de la surcote totale et le déclenchement des submersions au droit des polders. En effet, les résultats de la modélisation du clapot confirment qu'en fonction de l'étendue du plan d'eau lagunaire à marée haute, les vagues de vent sont en mesure de déclencher des submersions par franchissement ou intrusion des jets de rive (*wave uprush)* lors de marées de coefficients relativement faibles. Un phénomène d'amortissement du clapot n'est pas à exclure à l'heure actuelle en raison de l'extension des faibles profondeurs loin en en avant des domaines poldérisés. Ceci conduit à souligner qu'une part non négligeable de la surcote totale au fond du bassin relève des effets liés à la contrainte exercée par le vent à la surface du plan d'eau (*wind set up*). Néanmoins, les simulations montrent que l'élévation du niveau marin aura vite fait de libérer le clapot des contraintes de la bathymétrie et donc de faciliter sa propagation en direction du fond du bassin.

Dans ces conditions, les possibilités d'atténuation des ondes de tempête par la restauration des marais salé paraissent étroitement subordonnée au maintien de l'équilibre bio-sédimentaire des estrans sablo-vaseux du fond du bassin. L'étude BARASUB a confirmé le potentiel de restauration des marais au moyen d'une reconnexion des polders à la mer et validé l'hypothèse d'une atténuation des effets érosifs du clapot si la vitesse d'élévation de la surface des marais l'emporte sur celle du niveau moyen de la mer (Malprat). Le mode d'exposition à l'hydrodynamisme joue un rôle important dans la migration vers les terres du système bio-sédimentaire, les marais frangeants faisant office de «fournisseurs» de sédiments pour les zones dépoldérisées, à partir d'un stock sédimentaire jusqu'alors fixé par la végétation. Toutefois, à Graveyron comme à Malprat, l'exhaussement des marais est loin d'avoir atteint le niveau le plus élevé de la mer de telle sorte que si la restauration des fonctions écologiques essentielles du marais (fonctionnement, auto-entretien) et d'une large gamme

d'habitats naturels semble assurée, la réhabilitation des fonctions de régulation des submersions de tempête n'est pas aussi avancée et demande à être assistée par la conservation de la végétation arbustive existante au pied des digues dormantes remaritimisées.

Remerciements

L'équipe BARCASUB remercie les partenaires qui l'ont soutenue financièrement - MEDDE (Liteau), Conseil Général de Gironde, Conseil Régional d'Aquitaine -, de même que le Conservatoire du littoral.

Bibliographie

Anselme B., Durand P., Goeldner-Gianella L., Bertrand F., 2008. « Impacts de l'élévation du niveau marin sur l'évolution future d'un marais maritime endigué : le domaine de Graveyron, bassin d'Arcachon (France) », VertigO - La revue en sciences de l'environnement, vol. 8, n°1, 9 p.

Bertrand F. (2013). The Arcachon Bay estuary: a "collage" of landscapes. In M. Fort and M.-F. André (eds.), *Landscapes and Landforms of France, World Geomorphological Landscapes*, p. 71-80.

Bertrand F., Goelnder-Gianella L. (2013). BARCASUB : « La SUBmersion marine et ses impacts environnementaux et sociaux dans le Bassin d'ARCAchon (France) : est-il possible, acceptable et avantageux de gérer ce risque par la dépoldérisation ? », rapport final. Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie (MEDDE), 178 p. + annexes.

Feuillet T., Chauveau E., Pourinet L. (2012). Xynthia est-elle exceptionnelle ? Réflexions sur l'évolution et les temps de retour des tempêtes, des marées de tempête et des risques de surcote associés sur la façade atlantique française. Norois, n°222, p.27-44.

Le Nindre Y.-M., Bodéré G., Izac J.-L., Putot E., Levasseur J. (2006). Etude pour le maintien de l'équilibre biosédimentaire des estrans de la côte sud du Bassin d'Arcachon. Rapport BRGM/RP 54814-FR., 129p., 24 tab., 93 fig., 4 annexes.

Mallet C., Idier D., Thiébot J., Le Nindre Y.M., Mugica J., Roche A. (2009). Submersions marines à Andernos-les-Bains (Gironde) et aménagement de protection. BRGM/RP-57462. Rapport final, 52p.

Mugica J., Delvallée E., Pedreros R. (2010). Application de modèles numériques pour l'estimation de l'altitude du plan d'eau à Andernos-les-Bains. Rapport BRGM/RP-58723-FR. 92 p.

Parisot J.-P., Diet-Davancens J., Sottolichio A., Crosland E., Drillon C. Verney, R. (2008) Modélisation des agitations dans le Bassin d'Arcachon, Xèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, 14-16 octobre 2008, Sophia Antipolis, p.435-444.

Sénéchal N., Sottolichio A., Bertrand F., Goeldner-Gianella L., Garlan T. (2013). Observations of waves' impact on currents in a mixed-energy tidal inlet: Arcachon on the southern French Atlantic coast. In: Conley, D.C., Masselink, G., Russell, P.E. and O'Hare, T. J. (eds.), Proceedings 12th Int. Coastal Symp. ICS (Plymouth, England), *Journal of Coastal Research*, Sp. Issue 65, p. 2053-2058.