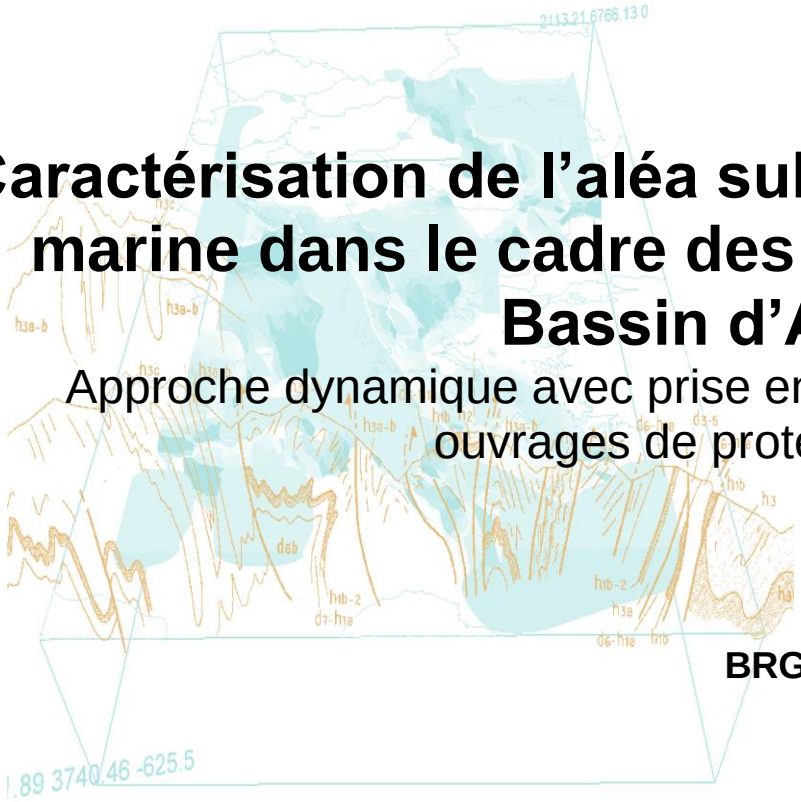
Document à accès différé



Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre des PPRL du Bassin d'Arcachon

Approche dynamique avec prise en compte des ouvrages de protection côtière

Rapport final

BRGM/RP-64807-FR
Avril 2016

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

PRÉFET
DE LA GIRONDE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document à accès différé

Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre des PPRL du Bassin d'Arcachon

Approche dynamique avec prise en compte des ouvrages de protection côtière

Rapport final

BRGM/RP-64807-FR
Avril 2016

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM PSP14AQI27

Mugica J., Paris F., Nicolae Lerma A., Pedreros R., Ayache B., Garcin M., Bulteau T., Hoareau A.

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : C. OLIVEROS	Nom : N. PEDRON
Fonction : Directeur de l'Unité Risques côtiers et changement climatique	Fonction : Directeur du BRGM Aquitaine
Date : 26/04/2016	Date : 30/04/2016
Signature :	Signature :

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

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
PRÉFET
DE LA GIRONDE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Avertissement

Le tirage initial de ce rapport, en nombre fixé par convention, est diffusé à son commanditaire. Sa communicabilité ultérieure à des tiers est liée à la prise d'une décision administrative formelle à laquelle il concourt, conformément à la loi n°78-753 du 17 juillet 1978. Passé ce délai, ce rapport devient communicable à tout tiers extérieur qui en ferait la demande ; le BRGM ne peut plus être tenu comme responsable de l'usage qui pourrait en être fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Mots-clés : Bassin d'Arcachon, submersion, évènement de référence, modélisation numérique, cartographie, PPRL, aléa

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

Mugica J., Paris F., Nicolae Lerma A., Pedreros R., Ayache B., Garcin M., Bulteau T., Hoareau A. (2016) – Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre des PPRL du Bassin d'Arcachon – Approche dynamique avec prise en compte des ouvrages de protection côtière. Rapport final. BRGM/RP-64807-FR, 122 p., 117 fig., 10 tab., 8 ann., 1 CD.

© BRGM, 2016, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Comme suite à la prescription des Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) submersion marine sur le Bassin d'Arcachon en novembre 2010 le BRGM a été chargé par la DDTM de la Gironde de caractériser l'aléa submersion marine sur les 10 communes du pourtour du Bassin : Andernos-Les-Bains, Arcachon, Arès, Audenge, Biganos, Gujan-Mestras, Lanton, La-Teste-de-Buch, Lège – Cap Ferret, Le Teich. Ce travail qui a démarré fin 2011 et qui devrait s'achever courant de l'année 2016 a fait l'objet de 2 phases encadrées par 3 conventions entre le BRGM et la DDTM de la Gironde :

- **La phase 1** (Convention du 14 novembre 2011) concerne une « approche statique » de la caractérisation de l'aléa submersion marine, réalisée à titre informatif, en considérant inexistants les structures de protection côtière ainsi que le bâti. Cette première phase a permis de réaliser une première estimation à l'échelle globale du Bassin d'Arcachon de l'emprise maximale d'une submersion marine pour un évènement de référence centennal. Elle fait l'objet de la production de 2 rapports et de la production de cartes d'aléa (1/25 000) :
    - ***Rapport intermédiaire BRGM/RP-61408-FR*** pour la détermination de l'évènement naturel de référence ;
    - ***Rapport final de la phase 1 BRGM/RP-62187-FR*** pour la caractérisation de l'aléa et la production des cartes d'aléa dites « statiques ».

- **La phase 2** (Conventions du 07 août 2013 et du 14 mai 2014) a été mise en œuvre grâce à l'expertise des résultats de la phase 1, la précision des consignes ministérielles (publication du guide méthodologique du MEDDE en mai 2014) et la mise en place de la concertation au sein d'un groupe de travail incluant le BRGM, la DDTM de la Gironde et le SIBA. Cette 2nd phase repose sur une approche plus fine à vocation réglementaire (restitution au 1/10 000). Cette approche dite « dynamique » est basée sur l'utilisation de modèles numériques afin de représenter la dynamique de la propagation de la submersion à terre. Elle permet de tenir compte de l'occupation du sol (urbanisation plus ou moins dense, type de végétation, etc.) et du comportement des structures de protection côtière (ruine ou brèche des digues par exemple).

Ce présent rapport a donc pour objectif de rappeler les résultats de la phase 1 exploités dans cette 2nd phase puis de détailler la méthode et les résultats finaux de cette 2nd phase pour l'élaboration des cartes d'aléa du PPRL du Bassin d'Arcachon.

Les cartes d'aléa, hauteur d'eau et vitesse d'écoulement ont ainsi été produites à l'échelle 1/10 000 mais ne peuvent être exploitées à une échelle inférieure sous peine de fausser les résultats.

Pour rappel, la méthode de détermination de l'évènement naturel de référence a spécifiquement été développée pour l'élaboration des PPRL en Aquitaine (Bulteau et al., 2012) et est recommandée dans le guide méthodologique du MEDDE (mai 2014).

Les modèles numériques ont été mis en œuvre à une échelle adaptée à la configuration géomorphologique du Bassin d'Arcachon. Ils ont été calibrés et validés grâce à des mesures de terrain et des études antérieures.

La représentation du terrain (topographie, bathymétrie, occupation du sol, structure de protection côtière et connexions hydrauliques) a notamment été déterminée avec l'appui technique du SIBA et en concertation avec la DDTM de la Gironde. De même, les hypothèses de défaillance des structures de protection côtière et des connexions hydrauliques ont été définies en concertation avec la DDTM de la Gironde et le SIBA.

Ainsi le scénario de référence retenu pour représenter l'aléa de référence combine 1/ une hypothèse de ruine généralisée des digues d'Arès, de Lanton, de Gujan-Mestras et du camping des Viviers à Lège – Cap Ferret ainsi que des 2 rangs de murets à Andernos-Les-Bains et du cordon dunaire du Mimbeau à Lège – Cap Ferret ; **2/ des hypothèses de défaillances ponctuelles** des digues de La-Teste-de-Buch et du cordon dunaire de La Pointe à Lège – Cap Ferret.

Conformément aux consignes ministérielles, **l'aléa à échéance 100 ans** a également été caractérisé à partir de la même méthodologie que celle de l'aléa de référence, avec les mêmes hypothèses du comportement des structures de protection côtière mais avec l'ajout d'une élévation de 60 cm au niveau moyen de la mer de l'évènement naturel centennal pour la prise en compte du changement climatique (dont 20 cm sont déjà ajoutés au niveau marin de l'événement naturel de référence).

Outre la caractérisation de l'aléa, c'est-à-dire la transcription spatiale à terre des impacts d'un évènement naturel météo-marin, l'élaboration d'un PPRL requiert la caractérisation des enjeux, c'est-à-dire des usages, du bâti, des personnes, etc., susceptibles d'être exposés à l'aléa. Le croisement de l'aléa et des enjeux permet ensuite de définir le risque sur lequel est basée la réglementation du PPRL. **Dans le cadre des PPRL du Bassin d'Arcachon, le BRGM a été chargé par l'État de caractériser l'aléa. Les étapes de caractérisation des enjeux, de détermination du risque puis de conception du règlement sont réalisées par l'État, la DDTM de la Gironde en l'occurrence.**

Sommaire

1. Introduction 15

1.1. CONTEXTE GENERAL 15

1.2. CADRE REGLEMENTAIRE 17

1.3. RAPPELS THEORIQUES 17

2. Description du Bassin d'Arcachon – fonctionnement du littoral 21

2.1. CADRE GEOGRAPHIQUE 21

2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET MORPHOSEDIMENTAIRE 24

2.3. CONTEXTE HYDROLOGIQUE 26

2.4. CONTEXTE METEOROLOGIQUE 29

2.5. CONTEXTE OCEANOGRAPHIQUE 31

2.6. CONNAISSANCES HISTORIQUES 37

2.7. CONCLUSION SUR LES PHENOMENES NATURELS A L'ORIGINE DES SUBMERSIONS 43

3. Evènement naturel de référence 45

3.1. RAPPEL DES CONCLUSIONS DES PRECEDENTES ETUDES ET NOUVELLES CONSIDERATIONS 45

3.2. RAPPEL METHODE DE CALCUL DE L'EVENEMENT NATUREL CENTENNAL 47

3.2.1. Principe 47

3.2.2. Caractéristiques de l'évènement naturel centennal au large 48

3.2.3. Prise en compte du changement climatique et des incertitudes de la méthode 49

3.2.4. Références altimétriques 50

3.3. COMPARAISON AVEC LES EVENEMENTS HISTORIQUES ET NIVEAUX CENTENNAUX DU SHOM-CETMEF 2012 A ARCACHON-EYRAC 50

4. Données utilisées et connaissance terrain 53

4.1. DONNEES TOPOGRAPHIQUES DISPONIBLES 53

4.2. DONNEES D'OCCUPATION DU SOL 57

4.3. IDENTIFICATION DES STRUCTURES DE PROTECTION 59

4.3.1. Types de structures de protection prises en compte 59

4.3.2. Identification des structures de protection contre la submersion marine sur le Bassin d'Arcachon 61

4.4. CONNEXIONS HYDRAULIQUES 62

4.5. REMBLAIS 64

5. Scénarios étudiés : prise en compte des structures de protection 67

5.1. SCENARIO DE RUINE GENERALISEE DES STRUCTURES DE PROTECTION COTIERES 67

5.2. SCENARIO DES STRUCTURES DE PROTECTION FONCTIONNELLES 67

5.3. SCENARIO DE DEFAILLANCES PONCTUELLES DES STRUCTURES DE PROTECTION COTIERES 67

5.4. CHOIX DU SCENARIO DE REFERENCE 68

6. Propagation de la submersion marine - modélisation numérique 71

6.1. STRATEGIE DE MODELISATION 71

6.2. PRESENTATION DES LOGICIELS DE MODELISATION NUMERIQUE 72

6.3. CONFIGURATION DES MODELES NUMERIQUES 74

6.3.1. Emprise, bathymétrie et résolution 74

6.3.2. Forçages et conditions aux limites marines 75

6.3.3. Prise en compte du changement climatique dans le niveau marin 76

6.4. REPRESENTATION DU TERRAIN 76

6.4.1. Modèles Numériques de Terrain à 12 m et retouches des éléments structurants 76

6.4.2. Rectification des Modèles Numériques de Terrain pour la représentation des ruines des structures de protection côtière 79

6.4.3. Rugosité et frottement sur le fond pour la propagation de la submersion 81

6.4.4. Prise en compte des connexions hydrauliques 84

6.4.5. Représentation des défaillances ponctuelles (brèches) des structures de protection côtière 85

6.5. FRANCHISSEMENT DE PAQUETS DE MER 85

6.6. VALIDATION DE LA MODELISATION NUMERIQUE 87

6.6.1. Validation des conditions de marée et des surcotes de tempêtes 87

6.6.2. Validation des niveaux centennaux à l'intérieur du Bassin d'Arcachon 88

6.7. EXEMPLES DE RESULTATS DE SIMULATIONS NUMERIQUES 89

6.7.1. Agitation du plan d'eau 89

6.7.2. Dynamique de submersion 90

7. Méthodes de qualification et de restitution de l'aléa 93

7.1. PRINCIPES GENERAUX 93

7.2. BANDE DE SECURITE LIEE AUX CHOCS MECANIQUES DES VAGUES 94

7.3. BANDE DE PRECAUTION LIEE AUX STRUCTURES DE PROTECTION COTIERE 96

7.4. ANALYSE D'EXPERT 99

7.4.1. Analyse basée sur la connaissance historique 99

7.4.2. Franchissements de paquets de mer sur le front de mer 100

7.4.3. Cas des seuils topographiques 101

7.4.4. Cas de la Pointe du Cap Ferret 103

7.4.5. Traitement pour pallier les incohérences ponctuelles (résultats bruts) liées de résolution de la modélisation 105

7.5. PRODUCTION DU SIG 107

8. Analyse des résultats 109

8.1. EMBOUCHURE – RIVE DE LA-TESTE-DE-BUCH 109

8.2. SECTEURS SUD – D'ARCACHON AU TEICH 109

8.3. AMONT DE LA LAGUNE - DELTA DE L'EYRE – DU TEICH A LANTON 111

8.4. AMONT DE LA LAGUNE - DELTA D'ARES – DE LANTON A CLAOUEY 114

8.5. FAÇADE INTERNE DE LA FLECHE DU CAP FERRET 115

9. Conclusion 117

10. Bibliographie 119

Liste des figures

Figure 1 : Communes du Bassin d'Arcachon concernées par un PPRL submersion marine 16

Figure 2 : Schéma des différentes contributions au niveau du plan d'eau lors d'une tempête (surcotes) jusqu'au rivage. 19

Figure 3 : Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer / dégradation des ouvrages / débordement, ©BRGM). 20

Figure 4 : Cadre géographique du Bassin d'Arcachon. 22

Figure 5 : Les différents types de milieux naturels caractéristiques du Bassin d'Arcachon (photographies aériennes Michel Le Collen 2013 et ULM Sud Bassin 2014). 23

Figure 6 : Les différents types de milieux influencés par l'action de l'humain caractéristiques du Bassin d'Arcachon (photographies aériennes Michel Le Collen 2013 et ULM Sud Bassin 2014). 23

Figure 7 : Carte géologique et structurale simplifiée de la région du Bassin d'Arcachon (dans Allard, 2008). 24

Figure 8 : Evolution Flandrienne de l'estuaire de L'Eyre pour aboutir à la configuration actuelle du Bassin d'Arcachon (d'après Bouchet, 1974). 25

Figure 9 : A) Cycle des Passes du Bassin d'Arcachon, déduit des cartes marines depuis 1826 (d'après Gassiat, 1989) ; B) modèle conceptuel de Michel et Howa (1996). 26

Figure 10 : Carte du contexte hydrologique du Bassin d'Arcachon. 27

Figure 11 : Rose des vents au sémaphore du Cap-Ferret (Données Meteofrance, période 2004-2009). 30

Figure 12 : Répartition des hauteurs significatives des vagues en fonction des directions de propagation des vagues, Mesures du 28/08/2001 au 01/06/2015 à la bouée CANDHIS Cap Ferret (CEREMA, SHOM, Université de Bordeaux, Fiche des états de mer, 2015). 32

Figure 13 : Illustrations de l'effet des vagues sur le front de mer lors de la dernière tempête du 11/01/2016 (La Dépeche du Bassin, n°1026). A gauche : Lège – Cap Ferret (photo de Martial Hoffmann) ; A droite : La-Teste-de-Buch (photo de Ghislaine Lafon). 33

Figure 14 : Illustrations de l'effet des vagues sur le secteur de Pyla-sur-Mer lors des grandes marées de février 2011 (source web inconnue). 33

Figure 15 : Illustrations de l'effet des vagues en amont de la lagune. 33

Figure 16 : Illustrations de l'effet des vagues à Arcachon. 34

Figure 17 : Traces d'érosion marine générée par l'effet des vagues. 34

Figure 18 : Traces d'érosion marine générée par l'effet des vagues. 34

Figure 19 : Propagation de la surcote liée à la houle à l'intérieur du Bassin d'Arcachon lors des tempêtes Klaus (à gauche) et Xynthia (à droite). 36

Figure 20 : Recensement des zones inondées lors d'évènements de tempête passés 1882 - 2008. 38

Figure 21 : Hauteurs d'eau mesurées à partir des laisses de mer et des traces sur les murs (Xynthia 28/02/2010). 39

Figure 22 : Zones encore inondées 2 jours après la tempête Xynthia (28/02/2010), Claouey à gauche, Gujan-Mestras à droite en exemple. 39

Figure 23 : Dépôts de sables et de vase 39

Figure 24 : Carte de localisation des différents types d'observations post-tempêtes effectuées sur le Bassin d'Arcachon entre le 7 et le 9 janvier 2014 (issue du Rapport BRGM/FR-63182-FR). 40

Figure 25 : Exemples de submersions locales lors de l'hiver 2013-2014 (BRGM) 41

Figure 26 : Exemple de dégâts sur la façade interne de la flèche du Cap Ferret lors des tempêtes de l'hiver 2013-2014, (©SudOuest) 41

Figure 27 : Déplacement de blocs au niveau de l'enrochement de la Pointe du Cap Ferret à Hortense (Lège-Cap-Ferret, 09/01/2014, BRGM). 41

Figure 28 : Impacts des tempêtes de l'hiver 2013-2014 sur la flèche sableuse du Mimbeau : surverse au sud et érosion du pied de dune au nord, 6 brèches, 11 entailles d'érosion marine (commune Lège – Cap Ferret, Rapport BRGM/RP-63182-FR). 42

Figure 29 : Graphe bivarié représentant les directions de vent en fonction des hauteurs significatives de vagues après sélection des évènements indépendants (cf. rapport BRGM/RP-61408-FR)[en haut] et fréquence normalisée des directions de vent par tranche de Hs (la valeur de Dir la plus observée par tranche de Hs est la case la plus colorée)[en bas] 47

Figure 30 : Emprise géographique des données LIDAR de 2005 du SIBA. 55

Figure 31 : Emprise schématique des différentes sources de données topographiques et bathymétriques. 55
Figure 32 : Données DGPS disponibles. 56
Figure 33 :Données DGPS utilisées pour construire le MNT. 56
Figure 34 : Carte d'occupation du sol du Bassin d'Arcachon en 2009. 58
Figure 35 : Exemples de digues, structures de protection contre la submersion marine, sur la commune de La-Teste-de-Buch à gauche et au centre et sur la commune d'Audenge à droite, ©Observatoire de la Côte Aquitaine. 59
Figure 36 : Exemple de couronnement ou muret rehaussant un perré sur la commune d'Andernos-Les-Bains, ©Observatoire de la Côte Aquitaine. 60
Figure 37 : Exemples de perrés, structure de protection contre l'érosion marine, au Pyla-sur-Mer à gauche (commune La-Teste-de-Buch) et à l'Herbe à droite (commune de Lège-Cap Ferret), ©Observatoire de la Côte Aquitaine. 60
Figure 38 : Exemples d'enrochements, structure de protection contre l'érosion marine (commune de Lège-Cap Ferret, ©Observatoire de la Côte Aquitaine). 60
Figure 39 : Exemple d'épis à l'Herbe (commune de Lège-Cap Ferret, ©Observatoire de la Côte Aquitaine). 61
Figure 40 : Exemples de cordons naturels, ici dunaires, à la Pointe à gauche, au Mimbeau à droite (commune de Lège-Cap Ferret, ©Observatoire de la Côte Aquitaine). 61
Figure 41 : Localisation des structures de protection côtières prises en compte dans la présente étude. 62
Figure 42 : Exemple de buse avec clapet anti-retour à gauche, exemple de fossé à droite. 63
Figure 43 : Exemple de Pont cadre à gauche,exemple d'écluse à droite. 63
Figure 44 : Localisation des différents types de connexions hydrauliques. 64
Figure 45 : Remblais présentant des connexions hydrauliques sur les secteurs de l'Aiguillon à Arcachon, de la zone commerciale de La-Teste-de-Buch, de la Hume (commune de Gujan-Mestras). 65
Figure 46 : Remblais présentant des connexions hydrauliques sur le secteur du Canal des Etangs et de l'Anse du Sangla (commune de Lège-Cap-Ferret). 65
Figure 47 : Remblais présentant des connexions hydrauliques. 66
Figure 48 : Remblais présentant des connexions hydrauliques. 66
Figure 49 : Démarche simplifiée de prise en compte des ouvrages (guide méthodologique du MEDDE, mai 2014). 69
Figure 50 : Modalités de prise en compte des structures de protection pour le scénario de référence. 70
Figure 51 : Stratégie de modélisation 72
Figure 52 : Schéma de principe de la méthodologie employée pour la propagation de la submersion marine. Le niveau marin de référence (bleu continu) n'est pas simplement projeté sur la topographie (bleu pointillé) mais bien propagé suivant une dynamique de submersion (vert). 72
Figure 53 : Emprises géographiques des grilles de calculs sur le Bassin d'Arcachon. Grille R0 (résolution 50 m en jaune) et les 3 grilles R1 (résolution 12 m) des secteurs Sud (en rouge), Nord (en vert) et Ouest (en bleu) du Bassin. 75
Figure 54 : Marégramme type utilisé pour l'élaboration des condtions aux limites du modèle MARS2DH. 76

Figure 55 : Illustration en coupe de la correction du modele numérique de terrain 12 m (ici exemple pour trois rangs de digues). 77

Figure 56 : Illustration en plan de la correction de l'altitude des ouvrages (lignes rouges) et des élements structurants à terre : chemin de fer (en vert), route remblayée (en jaune). 78

Figure 57 : Méthode de reconstruction des sommets des ouvrages de front de mer sur le littoral d'Andernos-les-Bains. Le relèvement des valeurs du MNT initial est réalisé en deux étapes. 79

Figure 58 : Representation schématique en coupe de l'arasement d'un ouvrage. 80

Figure 59 : Exemple en plan d'arasement des digues de premier rang à La-Teste-de-Buch. 80

Figure 60 : Flèche du Mimbeau, sans retouche (à gauche), après arasement (à droite). 81

Figure 61 : Carte de la typologie simplifiée pour l'établissement de la carte de rugosité. 82

Figure 62 : Exemple de la correspondance entre la typologie simplifiée d'occupation du sol et les coefficients de Strickler ($m^{1/3}s^{-1}$). 83

Figure 63 : Illustration des types d'ouvrages hydrauliques (écluses) pris en compte dans le modèle. 84

Figure 64 : Exemple de différentes conditions d'écoulement pris en compte dans la modèlisation. 85

Figure 65 : Particularité des aménagements de front de mer sur le littoral d'Andernos-Les-Bains, constitués d'une double rangée de murets. 86

Figure 66 : Tronçons de morphologie et d'exposition homogènes et profils associés pour la modélisation des volumes franchissants. 86

Figure 67 : Instantannée de la propagation des vagues et estimation des volumes franchissant les ouvrages de front de mer à Andernos-Les-Bains. 87

Figure 68 : Cartes des hauteurs significative des vagues (en haut) et des surcotes liées au déferlement des vagues (en bas) à l'échelle du Bassin d'Arcachon à **marée-haute**..... 90

Figure 69 : Illustration de la dynamique de la submersion pour l'évènement naturel actuel avec le scénario de défaillances sur Arcachon et La-Teste-de-Buch. Les cartes présentent les hauteurs d'eau (m). 92

Figure 70 : Hauteur significative et période pic des vagues à l'intérieur du Bassin d'Arcachon pour l'évènement de référence. 95

Figure 71 : Carte de localisation des bandes de sécurité (chocs mécaniques des vagues). 96

Figure 72 : Principe de détermination de la bande de précaution en arrière des structures de protection contre la submersion marine (modifié d'après le guide méthodologique, MEDDE, 2014). 97

Figure 73 : Carte de localisation des bandes de précaution en arrière des structures de protection côtière. 98

Figure 74 : Illustration de l'analyse historique sur le site du Mimbeau (Lège – Cap Ferret). 100

Figure 75 : Illustration de l'analyse d'expert pour les franchissements de paquets de mer à Arcachon, ... 101

Figure 76 : Seuils topographiques de La Pointe, La Vigne, l'Herbe et Piraillan (commune de Lège-Cap-Ferret). 102

Figure 77 : Exemple de seuil topographique à la Pointe avec une zone basse en arrière sur le secteur des 44 hectares (commune de Lège-Cap-Ferret). 102

Figure 78 : Photos de la brèche du cordon dunaire sur la propriété de M. Bartherotte lors des tempêtes de l'hiver 2013-2014 (mars 2014). 103

Figure 79 : Cartes des zones basses et 104

Figure 80 : Entrée d'eau dans la rue du Tram lors des forts coefficients de marée (113) d'octobre 2015 (©Sophie Juby). 105

Figure 81 : Illustration de l'analyse critique de la méthodologie mise en œuvre sur le secteur du Port d'Arcachon. A gauche : résultats bruts du modèle, à droite : résultats bruts complétés par l'analyse critique. 105

Figure 82 : Extraits de cartes d'aléa localisant les comblements des 10 irrégularités des résultats de modélisation. 106

Figure 83 : Comparaison de l'aléa de l'évènement naturel actuel pour les scénarios de ruine généralisée et d'état fonctionnel des structures de protection côtière sur la commune de La-Teste-de-Buch. 110

Figure 84 : Comparaison de l'aléa de l'évènement actuel pour les scénarios de ruine généralisée et d'état fonctionnel des structures de protection côtière sur les communes de Gujan-Mestras et de Le Teich. 111

Figure 85 : Illustration de l'aléa de référence et orthophotographie 2009 de l'IGN sur le secteur L'Eyre (communes de Le Teich et de Biganos). 112

Figure 86 : Illustration des entrées d'eau préférentielles dans le secteur amont sud du Bassin d'Arcachon 113

Figure 87 : Emprise du programme BARCASUB et cartes des usages (Rapport final BARCASUB, Goeldner-Gianella et al., juillet 2013). 114

Figure 88 : A gauche : ajustement statistique d'une loi GPD aux données de surcote marine issues des mesures du marégraphe d'Arcachon-Eyrac ; à droite : loi de probabilité sur les niveaux totaux issue de la convolution surcote-marée. 133

Figure 89 : Digue Johnston (©Observatoire de la Côte Aquitaine). 137

Figure 90 : Digues des Prés Salés Est (Olivier Chaldebas, ULM Sud Bassin, 2014). 137

Figure 91 : Digues des Prés Salés de la Hume et digue Safran (Olivier Chaldebas, ULM Sud Bassin, 2014). 137

Figure 92 : Hypothèses de défaillances pour le scénario de référence (étoiles rouge : localisation des brèches). 138

Figure 93 : Digue de La Hume à Meyran (Olivier Chaldebas, ULM Sud Bassin, 2014). 138

Figure 94 : Digue des malines de l'Ascol et d'Ostrea Edulis à gauche (orthophotographie 2009, IGN), digue du Lycée de la Mer à droite (Olivier Chaldebas, ULM Sud Bassin, 2014)...139

Figure 95 : Digue du camping du Roumingue et Bassins endigués (Olivier Chaldebas, ULM Sud Bassin, 2014). 139

Figure 96 : Deux rangs de murets sur la promenade du quartier du Mauret (©BRGM, octobre 2013). ...140

Figure 97 : Scénario de défaillances ponctuelles réalisé à titre informatif. 140

Figure 98 : Digue du CCAS (Olivier Chaldebas, ULM Sud Bassin, 2014). 140

Figure 99 : Digue du camping des Viviers et cordon dunaire du Mimbeau (©Observatoire de la Côte Aquitaine, février 2015, Olivier Chaldebas, ULM Sud Bassin, 2014). 141

Figure 100 : Modalités d'arasement du cordon dunaire du Mimbeau. 142

Figure 101 : Cordon dunaire de la Pointe (Olivier Chaldebas, ULM Sud Bassin, 2014). 142

Figure 102 : Hypothèses de brèches pour le scénario de défaillances ponctuelles sur le cordon dunaire du Mimbeau réalisé à titre informatif. 143

Figure 103 : Cartes des hauteurs significative des vagues (haut) et des surcotes liées au déferlement des vagues (bas) à l'échelle du Bassin d'Arcachon à **marée-basse**. 151

Figure 104 : Cartes des hauteurs significative des vagues (en haut) et des surcotes liées au déferlement des vagues (en bas) à l'échelle du Bassin d'Arcachon à **mi-marée**. 152
Figure 105 : Exemple du tracé de la bande de précaution pour la digue Johnston (La-Teste-de-Buch). 156
Figure 106 : Exemple du tracé de la bande de précaution pour la digue des Près Salés (La-Teste-de-Buch). 157
Figure 107 : Illustration des bandes de précaution sur différents secteurs (encadré rouge). 157
Figure 108 : Illustration des bandes de précaution des différents rangs de digues des Près Salés à La-Teste-de-Buch. 158
Figure 109 : Bandes de précaution des ouvrages d'Andernos-Les-Bains. 159
Figure 110 : Localisation du seuil topographique de Piraillan 164
Figure 111 : Analyse topographique du seuil de Piraillan. 164
Figure 112 : Localisation du seuil topographique de l'Herbe. 165
Figure 113 : Analyse topographique du seuil de l'Herbe. 165
Figure 114 : Localisation du seuil topographique de La Vigne. 167
Figure 115 : Analyse topographique du seuil de La Vigne. 167
Figure 116 : Localisation des seuils topographiques de La Pointe du Cap Ferret. 168
Figure 117 : Analyse topographique des seuils de La Pointe du Cap Ferret. 168

Liste des tableaux

Tableau 1 : Niveaux extrêmes de pleines mers (en m/NGF) à Arcachon-Eyrac (SHOM - CETMEF, 2012). 35
Tableau 2 : Combinaisons centennales de hauteur de vagues et de niveaux marins (sans prise en compte de l'incertitude) au large avec paramètres associés. 48
Tableau 3 : Surcote liée au déferlement des vagues à l'embouchure du Bassin. 49
Tableau 4 : Données topo-bathymétriques collectées sur le Bassin d'Arcachon. 54
Tableau 5 : Coefficients de Strickler attribués en fonction de la typologie simplifiée d'occupation du sol. 83
Tableau 6 : Comparaison des niveaux d'eau centennaux à Arcachon-Eyrac pour l'aléa de référence. ... 88
Tableau 7 : Classes d'aléa basées sur le croisement des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement (guide méthodologique, MEDDE, 2014). 93
Tableau 9 : Différences en surface selon les scénarios, par rapport aux conditions de l'évènement de référence. 129
Tableau 10 : Comparaison des niveaux marins de différentes périodes de retour issus des méthodes de calcul du SHOM et du BRGM appliquées aux mesures du marégraphe d'Arcachon-Eyrac. 133

Liste des annexes

Annexe 1 : Fiche de synthèse de la station de mesure de débits de L'Eyre à Salles 123

Annexe 2 : Tests de sensibilité au vent.....127

Annexe 3 : Comparaison des niveaux de période de retour centennale à Arcachon-Eyrac (SHOM vs BRGM) 131

Annexe 4 : Identification des structures de protection côtière et modalités de leur prise en compte dans le PPRL du Bassin d'Arcachon 135

Annexe 5 : Description et paramétrisation des codes de modélisation NUMERIQUE 145

Annexe 6 : Resultats de modélisation à l'échelle du Bassin d'Arcachon.....149

Annexe 7 : Modalités de détermination des bandes de précaution en arrière des structures de protection côtière 153

Annexe 8 : Prise en compte des seuils topographiques 161

1. Introduction

1.1. CONTEXTE GENERAL

Comme suite à la prescription des Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) submersion marine sur le Bassin d'Arcachon en novembre 2010 le BRGM a été chargé par la DDTM de la Gironde, en association avec la DREAL Aquitaine (convention du 19 octobre 2011), de caractériser l'aléa submersion marine. Les 10 communes concernées par ce PPRL submersion marine sont les suivantes (Figure 1) : Andernos-Les-Bains, Arcachon, Arès, Audenge, Biganos, Gujan-Mestras, Lanton, La-Teste-de-Buch, Lège – Cap Ferret, Le Teich. Pour la commune de Mios, initialement concernée, le PPRL a été « déprescrit » à l'issue de la première phase de la caractérisation de l'aléa submersion marine, dite « approche statique ».

Ce travail qui a démarré fin 2011 et qui s'est achevé en 2016 a fait l'objet de 3 conventions entre le BRGM et la DDTM de la Gironde :

- **Convention du 14 novembre 2011** concernant une « approche statique[1] » de la caractérisation de l'aléa submersion marine, réalisée à titre informatif, en considérant inexistants les ouvrages de protection côtière. Cette première phase a permis de réaliser une première estimation à l'échelle globale du Bassin d'Arcachon (1/25 000) de l'emprise maximale d'une submersion marine pour un évènement de référence centennal. Elle fait l'objet de la production de 2 rapports et de cartes d'aléa :
    - ***Rapport intermédiaire BRGM/RP-61408-FR*** pour la détermination de l'évènement naturel de référence ;
    - ***Rapport final de la phase 1 BRGM/RP-62187-FR*** pour la caractérisation de l'aléa et la production des cartes d'aléa dites « statiques ».

C'est à partir de l'expertise de ces premiers résultats qu'une approche plus fine à vocation réglementaire (restitution au 1/10 000) a pu être mise en œuvre. Elle fait l'objet des 2 conventions suivantes :

- **Convention du 07 août 2013** concernant une « approche dynamique » pour la caractérisation de l'aléa submersion marine sur les secteurs sud du Bassin d'Arcachon : communes d'Arcachon, La-Teste-de-Buch, Gujan-Mestras, Le Teich, Biganos, Audenge et Lanton. Cette approche repose sur la mise en œuvre d'une modélisation numérique permettant le calcul de la dynamique de la submersion (hauteurs d'eau, vitesses d'écoulement et de remplissage, durée de la submersion, etc.) avec la prise en compte des ouvrages de protection côtière (digues par exemple), des connexions hydrauliques (fossés, écluses, etc.) ainsi que l'occupation du sol (urbanisations, forêts, bassins endigués, etc.) ;

- **Convention du 14 mai 2014** concernant la même « approche dynamique » pour la caractérisation de l'aléa submersion marine sur les secteurs nord du Bassin d'Arcachon : communes d'Andernos-Les-Bains, Arès et Lège – Cap Ferret.

[1] Cette approche dite « statique » consiste à projeter les niveaux d'eau ou les volumes d'eau sur la topographie. Cette approche permet d'estimer les hauteurs d'eau mais pas la dynamique de propagation (vitesse d'écoulement, durée de submersion notamment)

Ce rapport présente la méthodologie et les résultats de l'« approche dynamique » sur les secteurs sud et nord du Bassin d'Arcachon pour la caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre des PPRL. ***Le travail a été réalisé dans l'état des connaissances actuelles et avec les outils opérationnels et données disponibles.***

Il a fait l'objet d'un suivi technique et de plusieurs phases de concertation, qui seront détaillés dans ce rapport, au sein d'un groupe de travail réunissant le BRGM, la DDTM de la Gironde ainsi que le SIBA.

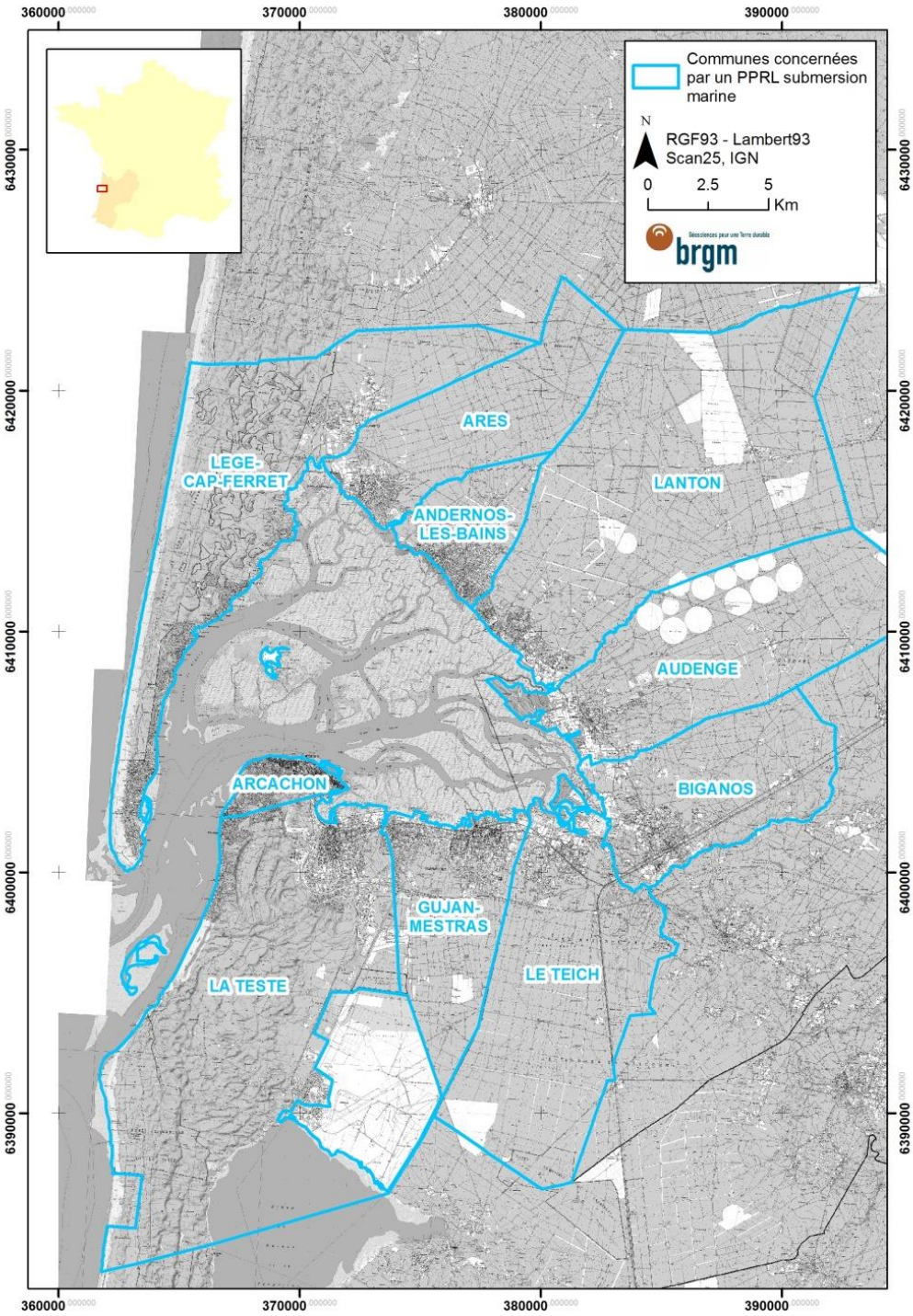


Figure 1 : Communes du Bassin d'Arcachon concernées par un PPRL submersion marine

1.2. CADRE REGLEMENTAIRE

La méthodologie mise en œuvre dans le cadre de cette présente étude s'appuie sur les documents de référence diffusés par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, et de l'Energie (MEDDE) :

- la **« Circulaire du 27 juillet 2011 »** relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux (NOR : DEVP1119962C) ;

- le **« Guide méthodologique : Plans de Prévention des Risques Littoraux »** version de mai 2014 qui correspond à la révision du guide méthodologique pour l'élaboration des PPRL datant de 1997 (Garry et *al.*, 1997).

Les principales nouveautés de ces documents par rapport au guide méthodologique de 1997 (Garry et *al.*, 1997) concernent les modalités de définition de l'évènement naturel de référence à retenir pour caractériser l'aléa de référence. Sur un secteur homogène, il doit correspondre à *« un évènement centennal ou à un évènement historique si celui-ci est supérieur »* (Guide méthodologique, MEDDE, mai 2014).

La notion de bassin d'étude des aléas impliquant la sélection de *« plusieurs évènements naturels de référence »* pour caractériser l'aléa de référence est introduite (Guide méthodologique, MEDDE, mai 2014).

Les documents précités précisent les modalités de la prise en compte :

- de plusieurs processus pour décrire les différents phénomènes météo-marins (niveau marin, hauteur de houle, intensité du vent, etc.) : l'évènement naturel de référence *« est caractérisé par deux paramètres au minimum, le niveau d'eau et la hauteur significative des vagues »* (Guide méthodologique, MEDDE, mai 2014) ;

- du rôle des structures de protection côtière sur les phénomènes naturels : *« le PPRL doit prendre en compte l'ouvrage :*
    - *en tant qu'objet de danger potentiel …,*
    - *en tant qu'objet de protection ….*

Aucun ouvrage ne peut être considéré comme infaillible quelles que soient ses caractéristiques et sa résistance présumée ». (Guide méthodologique, MEDDE, mai 2014) ;

- du changement climatique qui se manifeste par une élévation du niveau marin (sur la base des estimations du GIEC) : *« Les évènements retenus pour la détermination de l'aléa de référence, aléa à court terme, intègrent au niveau moyen de la mer une marge d'élévation du niveau de la mer de 20 cm. Pour la détermination de l'aléa à échéance 100 ans, l'hypothèse retenue est celle d'une augmentation du niveau moyen de la mer égale à 60 cm dont 20 cm sont déjà intégrés au niveau d'eau de l'évènement de référence »* (Guide méthodologique, MEDDE, mai 2014).

1.3. RAPPELS THEORIQUES

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

le plus souvent associées à des surélévations temporaires du niveau de la mer lors de tempêtes ou de cyclones, voire de tsunamis.

En dehors des tsunamis, les surcotes marines sont contrôlées par deux processus principaux Figure 2) :

- **La surcote atmosphérique** : le passage d'un important système dépressionnaire (cyclone, tempête) est caractérisé par des variations du niveau marin selon deux mécanismes :

    - La chute de pression atmosphérique entraîne une surélévation du niveau du plan d'eau. C'est le phénomène de *baromètre inverse* : une diminution d'1 hPa équivaut à une élévation d'1 cm du plan d'eau (valeurs pour une situation théorique d'un plan d'eau infini et d'une pression atmosphérique uniforme).
    - A cela s'ajoute l'effet du vent, qui en fonction de son intensité et de sa direction est susceptible de provoquer des accumulations d'eau sur la bande littorale.

  La surélévation du plan d'eau provoquée par la chute de pression et l'action du vent correspond à la surcote atmosphérique (ou météorologique). La combinaison de la marée et de cette surcote atmosphérique génère le niveau de la mer « au repos » (Figure 2).

- **La surcote liée aux vagues (wave Setup)** : à l'approche de la côte, les vagues générées au large déferlent en transférant leur énergie sur la colonne d'eau, dont une partie provoque une surélévation du niveau moyen du plan d'eau (le « *wave Setup* » ou surcote liée aux vagues) qui peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres.

Le **niveau moyen du plan d'eau** (ou niveau statique) lors d'une tempête ou d'un cyclone résulte de la contribution de la surcote atmosphérique, de la surcote des vagues et de la marée (Figure 2). La marée est de type semi-diurne en France métropolitaine (2 cycles de pleine mer et basse mer par jour). La différence de hauteur entre une pleine mer et une basse mer, appelée le marnage, peut atteindre plusieurs mètres. On distingue alors les côtes macrotidales (marnage supérieur à 4 m), mésotidales (2 à 4 m de marnage) et microtidales (marnage inférieur à 2 m). La côte Aquitaine et le Bassin d'Arcachon en particulier sont exposés à un contexte mésotidal, le marnage étant de l'ordre de 3,8 m.

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

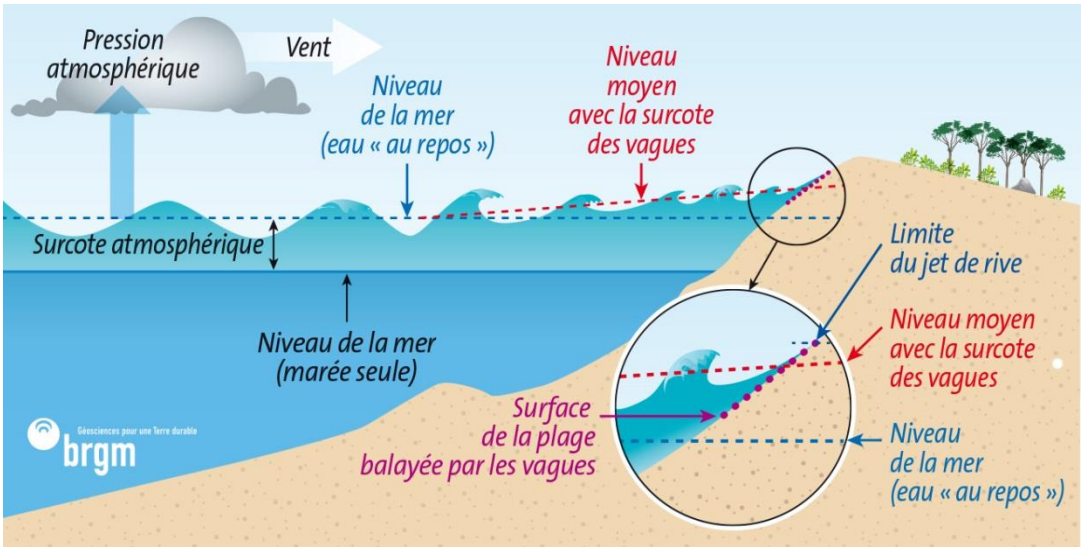


Figure 2 : Schéma des différentes contributions au niveau du plan d'eau lors d'une tempête (surcotes) jusqu'au rivage.

La submersion peut se manifester sous trois formes différentes (Figure 3) :

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

Un épisode de submersion peut résulter de la succession de ces différents processus, voire de leur occurrence simultanée, en des endroits différents. Lors de tempêtes, on assiste généralement à une montée progressive du niveau statique et à un renforcement de l'intensité des vagues (temps 1). Au-delà d'une certaine intensité, il peut y avoir franchissements par paquets de mer, la submersion associée restant en général limitée (temps 2). Si le niveau statique continue à s'élever et dépasse la cote maximale des défenses côtières, la submersion passe alors en régime de débordement (temps 3A). Lorsque le niveau statique diminue du fait de la marée et/ou de la baisse de la surcote, on peut observer, suivant la configuration, une « vidange » partielle de l'eau accumulée à terre vers la mer ou de nouveaux franchissements jusqu'à ce que les conditions de mer diminuent (temps 3B). En cas de rupture d'un ouvrage de protection, il peut y avoir submersion par débordement alors que le niveau statique ne dépasse pas la cote maximale de l'ouvrage avant rupture (temps 3C).

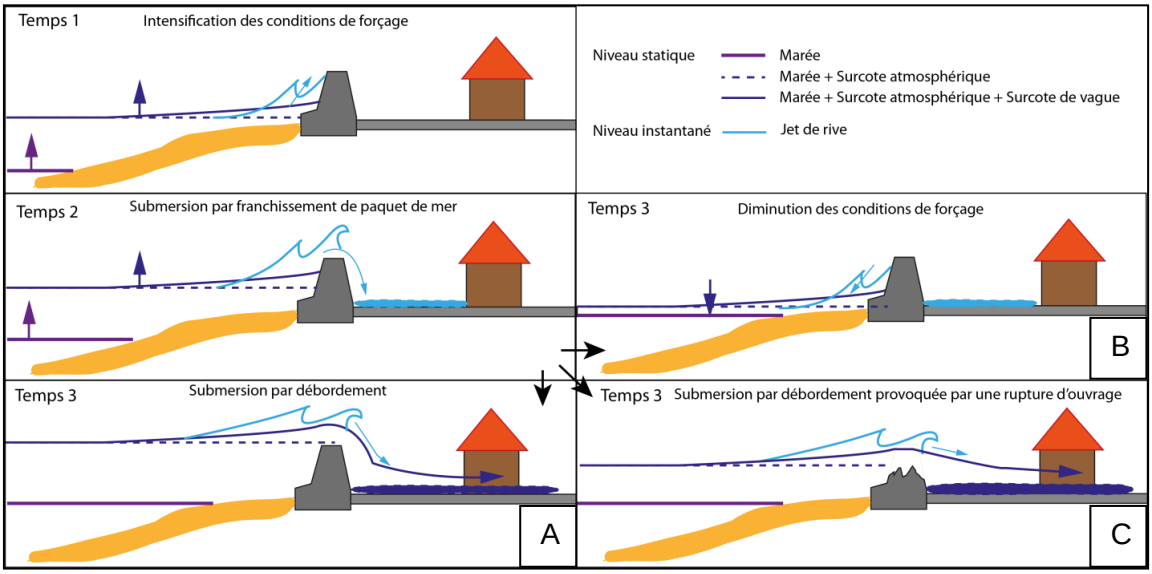


Figure 3 : Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer / dégradation des ouvrages / débordement, ©BRGM).

2. Description du Bassin d'Arcachon – fonctionnement du littoral

Actuellement, l'étude de référence qui présente le cadre général du Bassin d'Arcachon sur les plans géographique, géologique, morpho-sédimentaire, météorologique et océanographique demeure l'Etude intégrée du Bassin d'Arcachon de l'Ifremer (Bouchet et al. 1997).

Depuis 1997, certains points ont pu être précisés (évolution morphosédimentaire par exemple) et certaines statistiques actualisées (météorologiques et océanographiques par exemple). Ce chapitre s'appuie donc sur cette étude de Bouchet et al. (1997) complétée par quelques études plus récentes pour proposer une synthèse du fonctionnement du littoral du Bassin d'Arcachon.

Cette analyse bibliographique n'a pas pour objectif de traiter de manière exhaustive l'ensemble des références traitant du Bassin d'Arcachon mais de mettre en évidence les principales caractéristiques du Bassin et ainsi les éléments nécessaires à l'élaboration du PPRL submersion marine.

2.1. CADRE GEOGRAPHIQUE

Le Bassin d'Arcachon se situe sur la Côte Aquitaine bordant le Golfe de Gascogne dans l'Atlantique Nord, au sud-ouest du département de la Gironde et en bordure nord du département des Landes. Il s'agit d'une lagune semi-fermée, de forme triangulaire qui interrompt les 230 km du cordon dunaire littoral aquitain (Figure 4).

Sa configuration semi-fermée par la flèche sableuse du Cap Ferret confère à cette lagune une zone d'embouchure vers l'océan Atlantique et une zone d'estuaire intérieur : l'estuaire de L'Eyre. Sa superficie oscille entre 174 km^2 à marée haute et 60 km^2 à marée basse, découvrant de larges estrans (prés salés, platiers vaseux, bancs de sable) et un vaste réseau de chenaux.

Hormis L'Eyre, le Bassin est alimenté par plusieurs cours d'eau d'importance variée : Canal des Etangs au nord (Lège – Cap Ferret), Ruisseau du Bourg (Gujan-Mestras), Canal des Landes (La-Teste-de-Buch), Berle de Cassy (Lanton), Ruisseau Le Massurat (Andernos-Les-Bains), Craste de Nezer (La-Teste-de-Buch), etc. Le Bassin d'Arcachon constitue une zone de transition entre les eaux superficielles, les eaux souterraines (plio-quaternaire du triangle landais) et les eaux océaniques du Golfe de Gascogne dans l'océan Atlantique.

Par sa configuration géographique, le Bassin d'Arcachon représente l'un des rares abris de la Côte Aquitaine offrant ainsi un intérêt pour la navigation (pêche et plaisance) malgré des conditions d'entrée périlleuses via les Passes. De plus, ses caractéristiques lagunaires ont permis le développement de la conchyliculture et l'accueil d'une faune et d'une flore typiques. De ce fait, les intérêts économique, touristique et naturaliste qu'il offre, induisent une pression anthropique croissante sur cet environnement historiquement occupé par des pêcheurs et des marins puis par quelques bergers.

En effet, le Bassin est longtemps demeuré à l'écart du développement économique, le phare du Cap Ferret n'ayant été construit qu'en 1840. L'urbanisation occupant au début du XIXème siècle que le Sud du Bassin (La-Teste-de-Buch, Gujan) a remplacé aujourd'hui la majorité des marais, landes et dunes de sable sur tout le pourtour du Bassin. Les anciens villages (La Teste, Gujan, Mestras, Le Teich, Biganos, Audenge, Lanton, Andernos, Arès et Lège) sont aujourd'hui tous reliés par un réseau routier et par l'urbanisation.

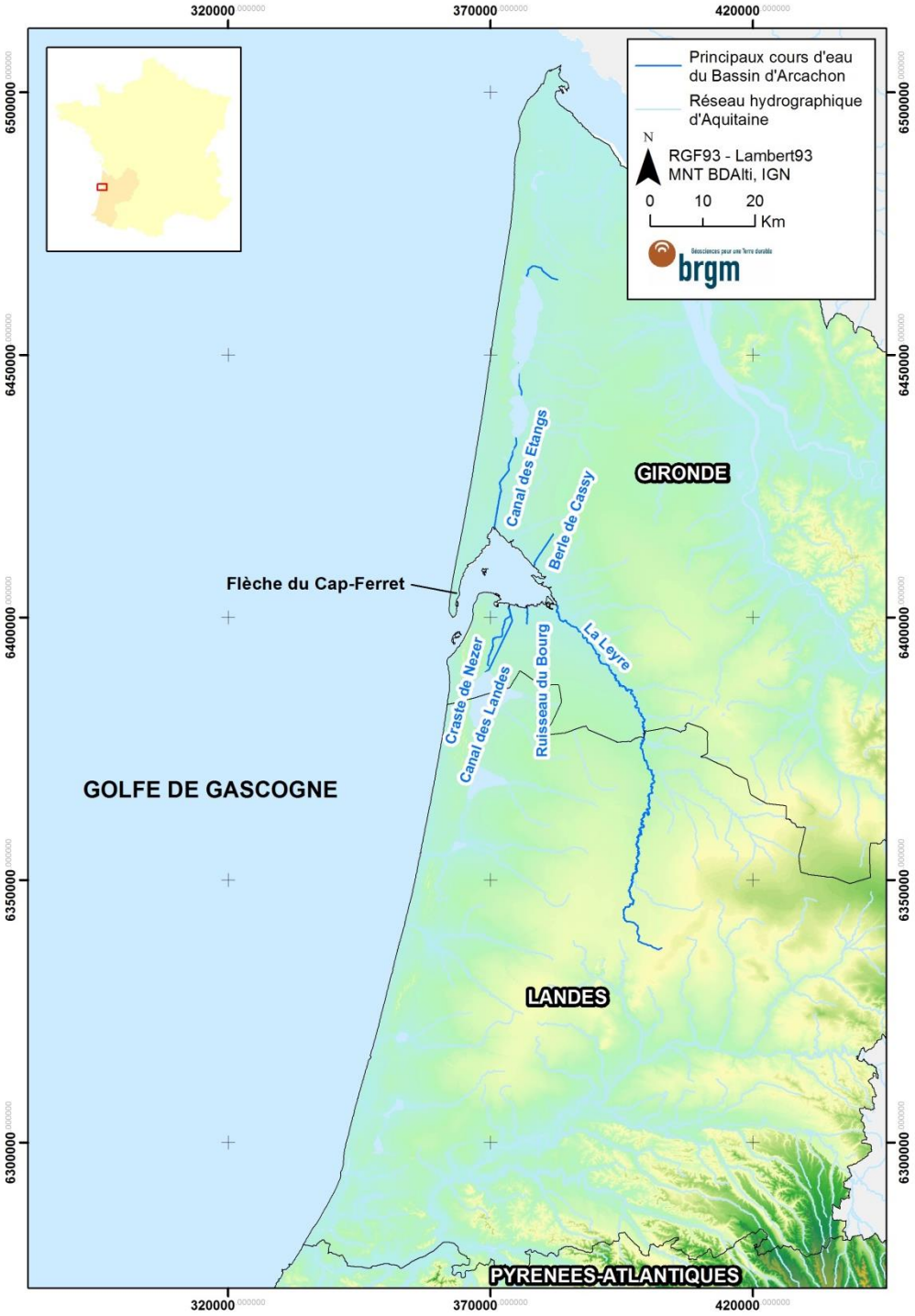


Figure 4 : Cadre géographique du Bassin d'Arcachon.

Les principaux types de milieux naturels liés à la configuration lagunaire du Bassin d'Arcachon, illustrés sur la Figure 5, sont typiques des zones humides côtières : les estrans sableux (A/), les estrans sablo-vaseux (la slikke, B/), les prés salés (le schorre, C/), le réseau de chenaux et esteys (D/).

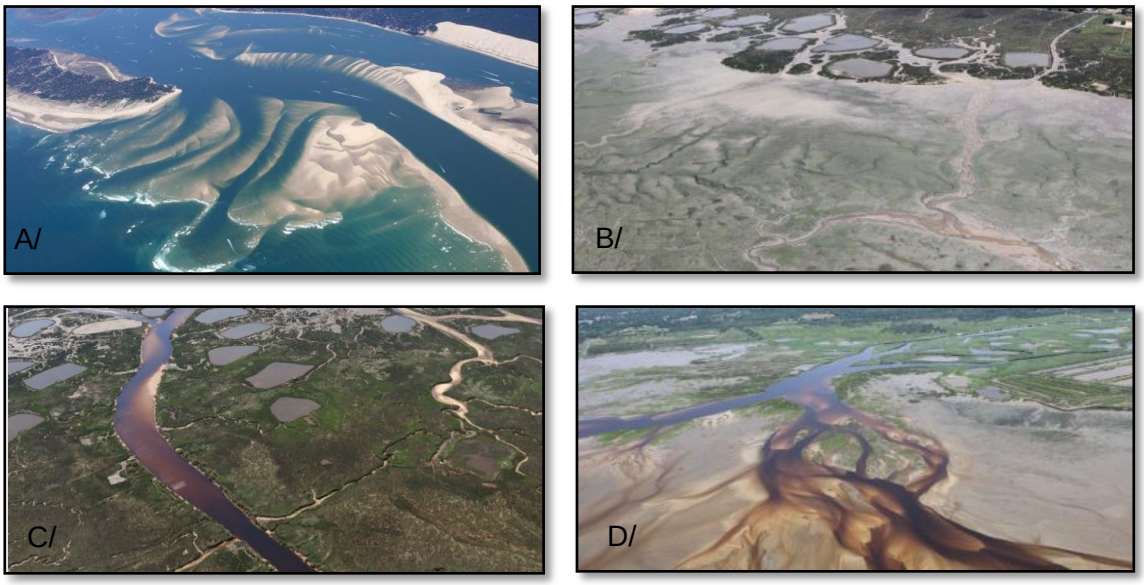


Figure 5 : Les différents types de milieux naturels caractéristiques du Bassin d'Arcachon (photographies aériennes Michel Le Collen 2013 et ULM Sud Bassin 2014).

Des milieux plus directement liés à l'action humaine sont les polders et les plages (Figure 6) : bassins endigués, (A/), les parcelles ostréicoles (B/), les lacs de tonne aménagés au sein du schorre (C/) et les plages sableuses (D/).

Figure 6 : Les différents types de milieux influencés par l'action de l'humain caractéristiques du Bassin d'Arcachon (photographies aériennes Michel Le Collen 2013 et ULM Sud Bassin 2014).

Par sa configuration lagunaire (zones basses) et ses nombreux enjeux (usages et urbanisation), le Bassin d'Arcachon représente un site particulièrement exposé aux risques littoraux en Aquitaine, ce qui a notamment conduit l'État à prescrire et élaborer un PPRL submersion marine.

2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET MORPHOSEDIMENTAIRE

Le contexte géologique du Bassin d'Arcachon a notamment été décrit dans les travaux de Mauroux et al., (2007), Klingebiel et Platel (2001), Dubreuilh et al., (1995). Le Bassin d'Arcachon doit sa formation à la présence d'une faille NW-SE résultant d'un accident structural au Trias (flexure celtaquitaine), qui a influencé l'orientation du réseau hydrographique de L'Eyre et de son estuaire. C'est au Quaternaire que les variations du niveau de la mer ont permis l'incision par L'Eyre des couches tertiaires de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur (de l'ordre de 600 m) dont 100 m environ ont été déposés au Miocène (d'après le modèle géologique MONA V4 développé par le BRGM, Saltel et al., 2014). L'estuaire de L'Eyre dont la migration vers le Sud a conduit à la formation du Bassin d'Arcachon s'insère dans le Bassin des Landes de Gascogne caractérisé par une couverture sableuse superficielle (50 à 100 m d'épaisseur, Saltel et al., 2014) quasiment uniforme datée Plio-Quaternaire (Figure 7).

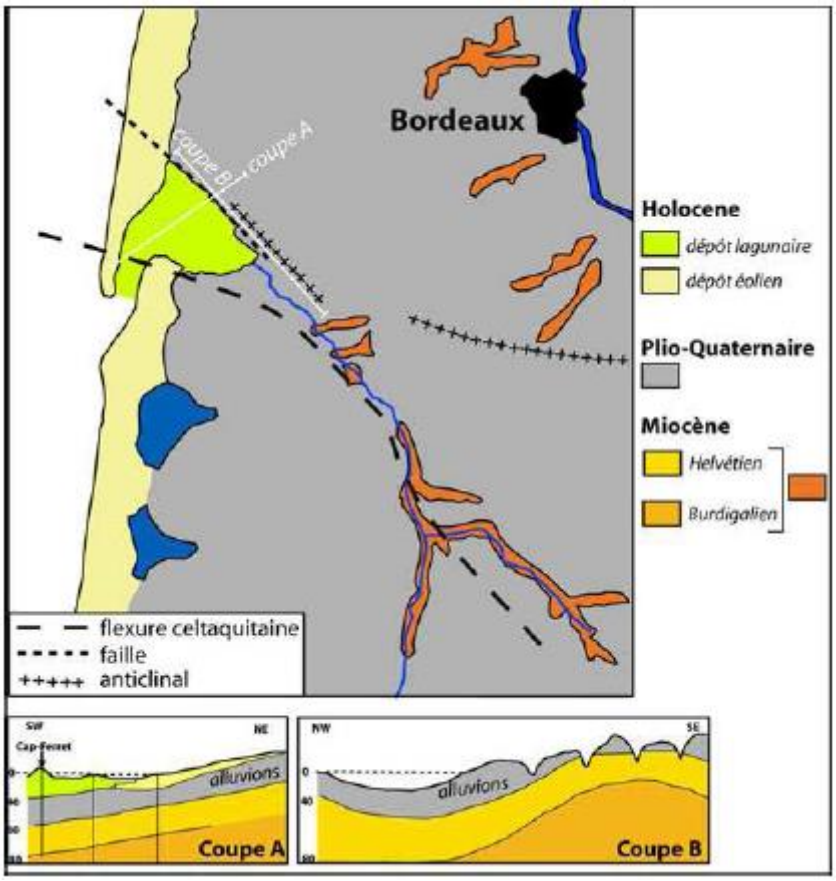


Figure 7 : Carte géologique et structurale simplifiée de la région du Bassin d'Arcachon (dans Allard, 2008).

La forme actuelle du Bassin d'Arcachon résulte donc de la migration progressive de l'estuaire de L'Eyre vers le sud lors de la transgression Flandrienne[2]. Conjointement avec la formation du cordon dunaire aquitain (dépôts éoliens Holocène, Figure 7), l'allongement progressif de la flèche sableuse du Cap Ferret a accompagné la migration de l'estuaire vers le Sud en donnant cette forme triangulaire caractéristique au Bassin d'Arcachon (Bouchet, 1974, Figure 8).

[2] Transgression Flandrienne (-14 000 à -5 000 ans BP) : remontée du niveau de la mer qui se trouvait 130 m plus bas lors de la dernière glaciation achevée il y a 18 000 ans

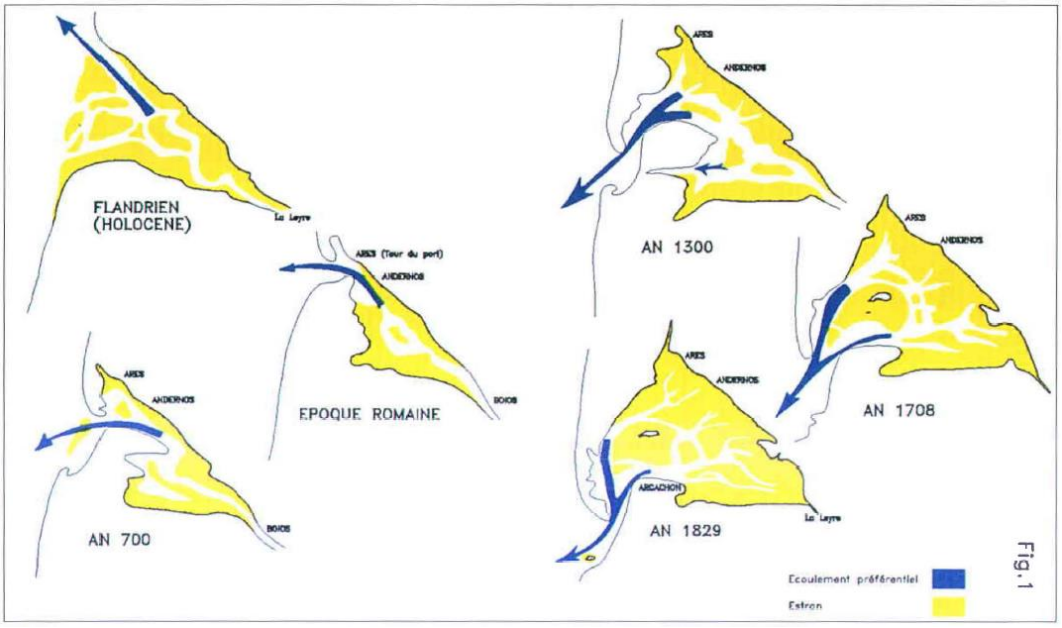


Figure 8 : Evolution Flandrienne de l'estuaire de L'Eyre pour aboutir à la configuration actuelle du Bassin d'Arcachon (d'après Bouchet, 1974).

Bien que le Bassin d'Arcachon ait atteint sa forme actuelle depuis plusieurs centaines d'années, les données bathymétriques (anciennes et récentes) font état de variations géomorphologiques de l'embouchure caractérisées par des phases d'allongement de la flèche du Cap Ferret (quasi fermeture de l'embouchure en 1826) et des phases de retrait (situation érosive actuelle par exemple). D'autre part, le réseau de chenaux (nommés « les Passes ») et de bancs de sables à l'embouchure a également connu de fortes évolutions géomorphologiques qui ont donné lieu à un modèle conceptuel d'évolution proposé par Michel et Howa (1996, Figure 9). Ces travaux s'appuient également sur des travaux antérieurs : Caspari (1872), Bouchet (1968), LCHF (1979) et Gassiat (1989), pour les principaux. Actuellement, ces travaux ont été synthétisés et actualisés dans le cadre d'une étude réalisée par les bureaux d'études ARTELIA et GeoTransfert à la demande des communes de La-Teste-de-Buch, Lège – Cap Ferret et Biscarrosse pour l'élaboration de la stratégie locale de gestion de la bande côtière sur le secteur des Passes. En complément, un travail de doctorat (Nahon, 2013-2016, BRGM et Université de Bordeaux) vient compléter les approches naturalistes essentiellement basées sur des analyses topo-bathymétriques de l'évolution de l'embouchure par une analyse de l'influence des agents climatiques.

Outre le rôle majeur des agents naturels (houle, courant, disponibilité en sable, vent) et de leurs variations climatiques, d'autres agents anthropiques sont susceptibles de jouer un rôle dans l'évolution géomorphologique du Bassin d'Arcachon : plantation des pins au XVIIIème siècle (ayant conduit à la fixation du cordon dunaire aquitain), travaux de stabilisation de l'embouchure de l'estuaire de la Gironde, constructions d'ouvrages de protection côtière sur le pourtour de la lagune, travaux de dragage et d'ensablement dans la lagune, etc.

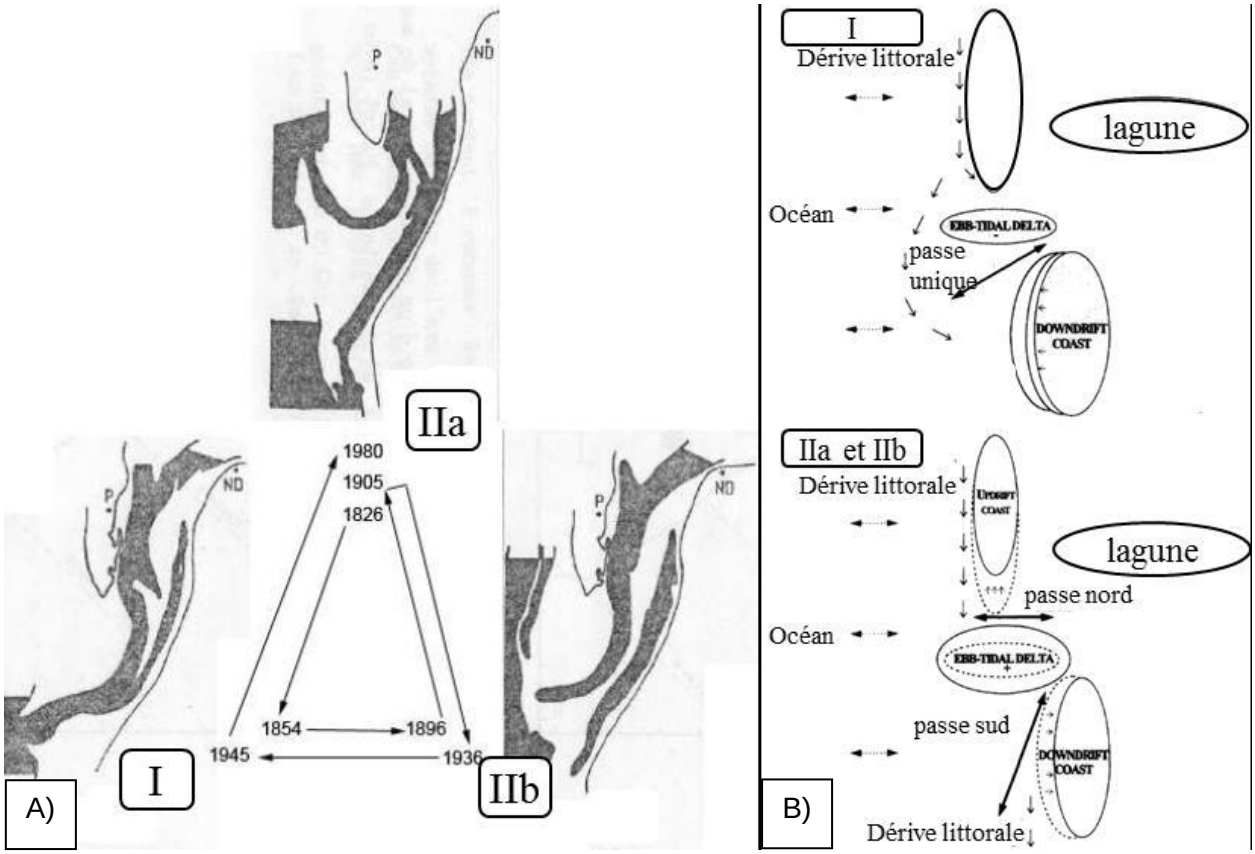


Figure 9 : A) Cycle des Passes du Bassin d'Arcachon, déduit des cartes marines depuis 1826 (d'après Gassiat, 1989) ; B) modèle conceptuel de Michel et Howa (1996).

En conclusion, le contexte géologique du Bassin d'Arcachon lui confère une certaine sensibilité aux aléas côtiers et en particulier sur les phénomènes de submersion marine du fait que c'est une zone d'embouchure inscrite dans un bassin sédimentaire sableux et relativement bas. Les évolutions morphosédimentaires qu'il connaît sont susceptibles de jouer un rôle non négligeable sur ces phénomènes. Compte-tenu des incertitudes sur les mécanismes (naturels et anthropiques) responsables de ces évolutions et sur la prédiction de ces évolutions dans un contexte de changement climatique, la DDTM de la Gironde en concertation avec le SIBA et le BRGM a choisi d'élaborer le PPRL submersion marine dans l'état des connaissances actuelles et donc dans la configuration géomorphologique actuelle du Bassin d'Arcachon (cf. paragraphe 4).

2.3. CONTEXTE HYDROLOGIQUE

Le Bassin d'Arcachon se trouve au sein de 2 systèmes hydrographiques constitués de cours d'eau (L'Eyre pour le plus important) qui débouchent dans le Bassin et de lacs ou étangs (Hourtin-Carcans au Nord et Cazaux-Sanguinet au Sud) reliés par des canaux (canal des Etangs au Nord et Canal des Landes au Sud) qui débouchent également dans le Bassin (IFREMER, 1997).

L'apport d'eau douce au Bassin s'effectue essentiellement par le biais des cours d'eau (apports via les canaux négligeables). La station la plus en aval de L'Eyre qui dispose d'une longue chronique de mesures, se trouve à Salles (mesures de 1967 à 2016, cf. http://hydro.eaufrance.fr/presentation/procedure.php, fiche de synthèse en Annexe 1). Les débits mensuels moyens y sont inférieurs à 10 m^3/s en période d'étiage et sont de l'ordre de 25

m^3/s en période de crue (débit maximum instantané : 128 m^3/s). **Par comparaison avec le volume d'eau salée oscillant entraîné par la marée, le volume d'eau douce introduit par la rivière de L'Eyre est environ 400 fois plus faible (Féniès, 1984 ; Allard, 2009).**

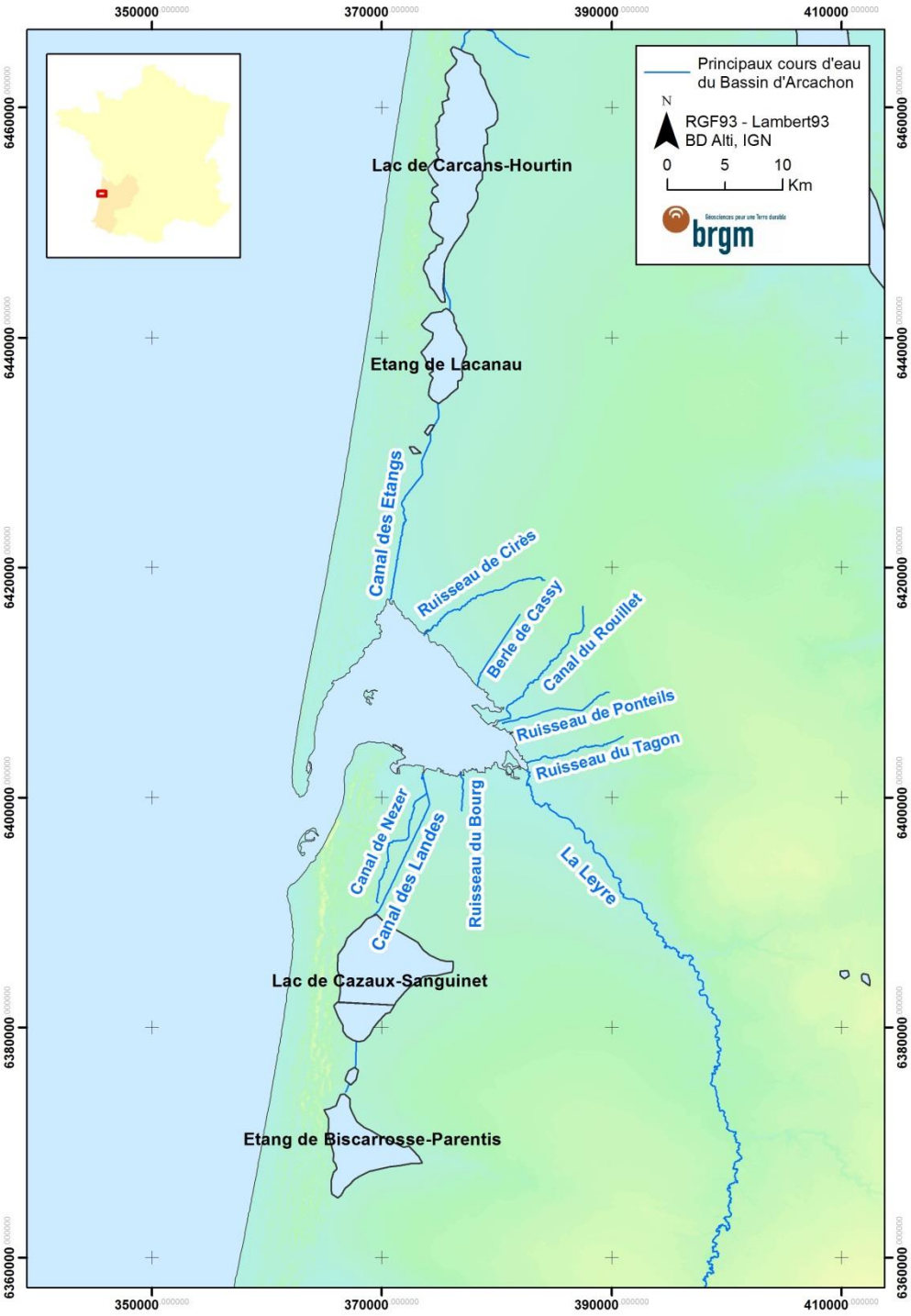


Figure 10 : Carte du contexte hydrologique du Bassin d'Arcachon.

La configuration géologique et géomorphologique du Bassin d'Arcachon et de son bassin versant (faible pente topographique, sols perméables, couverture sédimentaire par la formation du Sable des Landes, réseau hydrographique naturel peu développé) induit naturellement des inondations d'eau douce par débordement des cours d'eau ainsi que par des remontées de

nappe. Les fluctuations de la nappe du Plio-Quaternaire omniprésente et située proche de la surface du sol, sont d'ailleurs suivies par le Conseil Départemental de la Gironde (avec comme opérateur le BRGM) et par le Conseil Départemental des Landes (mesures mises à disposition du public dans la banque de données ADES[3]). A noter que le BRGM a déjà émis plusieurs avis techniques dans le cadre des demandes de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle (www.inondationsnappes.fr) déposées par les communes auprès des Préfectures.

Outre les cours d'eau et les canaux, la nappe superficielle du Plio-Quarternaire constitue donc un apport d'eau douce au Bassin d'Arcachon non quantifié aujourd'hui[4] (estimation de 1% en hautes eaux à 10 % en basses eaux dans Durst, 2009). Une étude sur la contribution de cette nappe au débit de L'Eyre en aval de la station de Salles devrait d'ailleurs démarrer prochainement en 2016 dans le cadre du SAGE Leyre, cours d'eau côtiers et milieux associés.

Le guide méthodologique du MEDDE (mai 2014) souligne qu'une submersion marine *« peut avoir pour origine plusieurs phénomènes qui ne sont pas uniquement maritimes »* (débordement de cours d'eau et remontée de nappe par exemple) et recommande d'analyser les concomitances entre les niveaux marins et les débits fluviaux. Pour l'élaboration de PPRL, en l'absence de méthode opérationnelle pour calculer les périodes de retour conjointes évènement marin/évènement fluvial[5], ce sont généralement des débits fluviaux annuels voire décennaux qui sont pris en compte dans les modélisations numériques des submersions marines. Les aléas des évènements marins et fluviaux sont donc caractérisés de manières indépendantes.

Dans le cas du PPRL du Bassin d'Arcachon, l'aléa submersion marine a été caractérisé sans prise en compte d'une concomitance avec une inondation fluviale. Aucun débit fluvial n'a été intégré dans la modélisation numérique. La DDTM de la Gironde a fait ce choix sur la base, entre autre, des éléments techniques fournis par le BRGM.

Les débits mesurés à Salles (débit mensuel moyen < 35 m^3/s) laissent supposer une faible influence des inondations fluviales sur un phénomène de submersion marine résultant d'un évènement naturel marin centennal.

D'autre part, l'état des connaissances au niveau du principal cours d'eau (L'Eyre) se jetant dans le Bassin a été jugé insuffisant pour les raisons suivantes :

- même si une station à Salles fournit une chronique longue de débits elle se situe trop en amont de l'embouchure de L'Eyre et la contribution des autres cours d'eau (Ruisseaux le Lacanau et d'Andron par exemple) et de la nappe Plio-Quarternaire entre cette station et l'embouchure n'est pas connue ;

- des tests de sensibilité avec différents débits auraient pu être réalisés mais les simulations numériques sur le secteur du delta de L'Eyre présentent de nombreuses incertitudes dont l'identification et l'estimation demeurent complexes en raison du contexte

[3] ADES : Banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines : www.ades.eaufrance.fr

[4] Les apports d'eau douce au Bassin via les nappes aquifères profondes (Aquitanien, Oligocène et Eocène) ne sont pas non plus connus aujourd'hui. En revanche, ces nappes ne sont pas impliquées dans les phénomènes d'inondation par remontée de nappe.

[5] Pour rappel, l'évènement naturel de référence est un évènement centennal ou historique s'il est supérieur.

géomorphologique et géographique (mobilité géomorphologique du delta, absence de donnée topo-bathymétrique précise, difficulté d'accès pour calibration et validation).

En revanche, le niveau marin (lors de forts coefficients de marée par exemple) peut avoir un impact défavorable significatif sur l'évacuation vers le Bassin d'eau pluviale (ruissellement sur les surfaces imperméabilisées, drainages par les fossés…) et fluviale et ainsi accentuer les phénomènes d'inondation « d'eau douce ». Cet impact est étudié et pris en compte **dans d'autres cadres que celui des études PPRL submersion marine** (schémas directeurs de gestion des eaux pluviales établis par le SIBA par exemple).

2.4. CONTEXTE METEOROLOGIQUE

Contexte aquitain général

La Côte Aquitaine jouit d'un climat tempéré océanique. A l'instar des autres côtes de l'Atlantique du Nord-Ouest situées aux latitudes moyennes, elle reçoit de plein fouet les perturbations qui traversent l'océan et se trouve directement exposée aux tempêtes et aux fortes houles engendrées sur l'Atlantique nord.

Le régime des vents y est très fluctuant, le Golfe de Gascogne est un secteur particulièrement agité où les vents peuvent devenir subitement violents. Les vents dominants viennent de l'Ouest avec une composante Nord en régime anticyclonique, et une composante Sud à l'approche des perturbations, qui sont fréquentes en automne et en hiver.

Sur le littoral atlantique, la température moyenne se maintient aux alentours de 13°C entre le Médoc et Hossegor. De brefs mais intenses accès de froid, peuvent tout de même se produire, comme ce fut le cas par exemple en 1985 et 1986 avec des épisodes neigeux importants.

Les précipitations

Les précipitations annuelles (700 à 1000 mm pour les stations de mesures du Bassin d'Arcachon) connaissent leur maximum en automne. Les épisodes neigeux sont exceptionnels. La frange littorale est souvent moins arrosée que l'arrière-pays. Ce cadre climatique global influence les paysages et la végétation de la côte Aquitaine.

Les vents

Les différentes études statistiques réalisées à partir des données de Météo-France sur le sémaphore du Cap-Ferret montrent que les vents dominants y sont de secteur Nord-Ouest et Nord-Est.

L'examen des roses des vents mensuelles met également en évidence deux types de répartition des directions du vent dans l'année :

- un type automnal-hivernal, d'octobre à mars, qui présente des vents forts de secteur Ouest-Nord-Ouest à Sud-Ouest ;

- un type printanier-estival, d'avril à septembre, qui se caractérise par une dominance des vents forts de secteur nord-ouest.

En hiver, les vents sont les plus violents avec une direction de provenance de secteur Ouest (entre 260° et 280°). A l'inverse, en période estivale, les vents sont très faibles et balayent principalement les secteurs Nord-Ouest à Sud-Ouest et Nord-Est à Est.

A l'échelle annuelle, près de la moitié des vents proviennent d'un secteur Ouest – Sud - Ouest à Ouest – Nord - Ouest, et ce sont des vents forts voire violents. A l'inverse, les vents de secteur Nord – Nord - Ouest à Nord - Est, sont eux aussi, bien représentés mais ils sont plus modérés en termes d'intensité (Figure 11).

Une analyse statistique des vents et de leur association avec les conditions de vagues a été spécifiquement réalisée dans le cadre de cette étude pour la détermination des caractéristiques de l'évènement de référence (cf. paragraphe 3.2). **Cette analyse ainsi que les résultats des études précitées plus haut et la connaissance locale, confirment que les vents les plus violents et généralement associés aux plus fortes vagues sont le plus fréquemment de direction Ouest – Nord - Ouest.** Une analyse de la sensibilité de l'altitude du plan d'eau dans le Bassin face à différentes directions et intensités du vent a néanmoins été réalisée dans cette 2nd phase de l'étude. La méthode et les résultats sont présentés en Annexe 2.

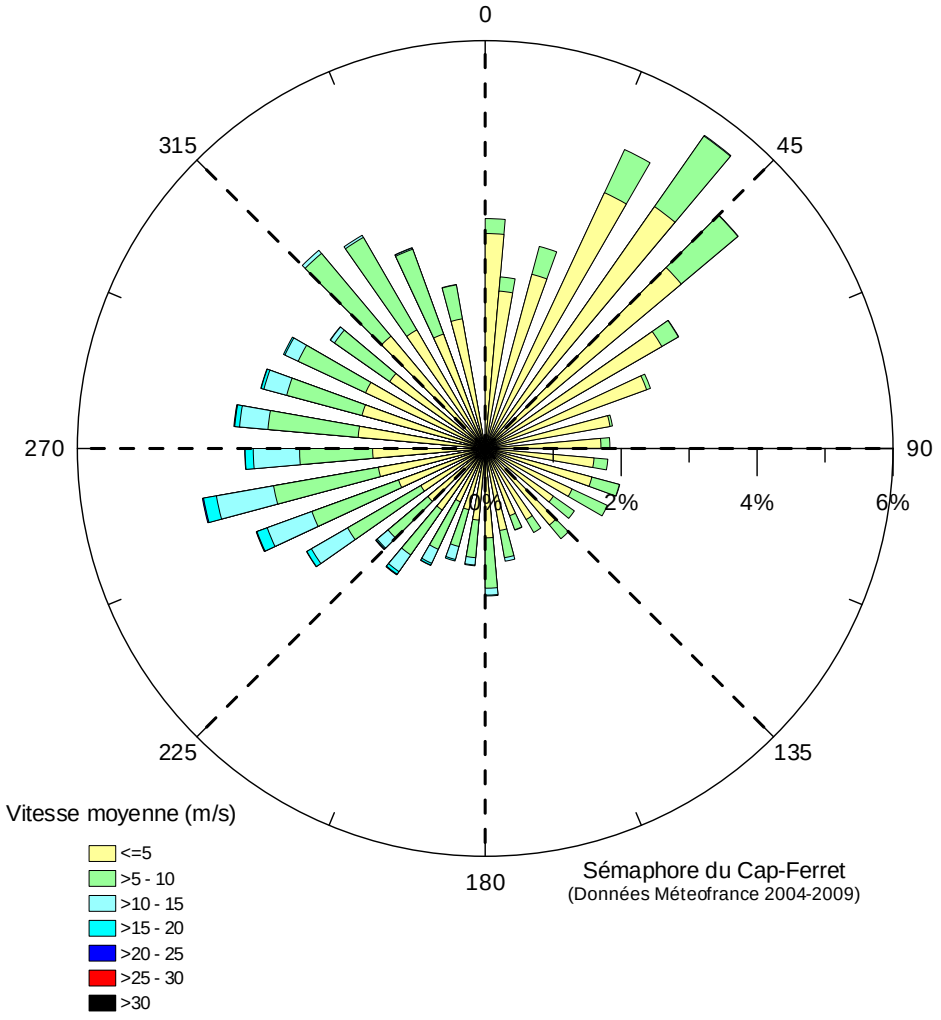


Figure 11 : Rose des vents au sémaphore du Cap-Ferret (Données Meteofrance, période 2004-2009).

2.5. CONTEXTE OCEANOGRAPHIQUE

Vagues

Les vagues qui atteignent les côtes du Golfe de Gascogne sont principalement générées par des flux dépressionnaires d'Ouest issus de l'Atlantique Nord (Castelle *et al*, 2007). Mais, il existe une grande variabilité saisonnière et interannuelle, dont une composante pourrait être liée à des cycles climatiques qui se succèdent sur des dizaines d'années, comme l'Oscillation Nord Atlantique, et qui modulent périodiquement le climat des houles[6] le plus fréquent (Dupuis *et al*, 2006).

Les vagues sont généralement caractérisées par trois principaux paramètres : la hauteur significative (H_s), la période pic (Tp) et la direction pic (Dp). En termes de statistiques annuelles, le climat de houle dans le Golfe de Gascogne se caractérise par la prédominance de vagues de faible hauteur. Ainsi, les hauteurs significatives moyennes (H_s) enregistrées par la bouée CANDHIS[7] du Cap-Ferret (44°39,150'N ; 01°26,800'W à 14,6 km de la côte), sur l'ensemble de la période 2001-2015 montrent que :

- plus de 70 % des vagues sont inférieures ou égales à 2 m de H_s ;
- environ 25% se situent entre 2 et 4 m de H_s ;
- seulement 5% sont supérieures à 4 m de H_s (le max enregistré sur cette période est 11,3 m).

Les périodes pics moyennes associées aux vagues dont la hauteur significative est supérieure à 1m sont de l'ordre de 10 s. La gamme des Tp s'étend de 3 à 20 s, les périodes les plus longues sont généralement associées aux vagues les plus fortes. De plus, la direction dominante des vagues est Ouest – Nord – Ouest.

A l'échelle de temps saisonnière, on distingue deux régimes contrastés :

- un régime hivernal, d'octobre à avril, caractérisé par une forte proportion de houles de forte H_s (45% d'entre elles dépassent 2 m) et de Tp longue (75% sont supérieures à 10 s) ;
- un régime estival, de mai à septembre, durant lequel les vagues sont de faible H_s (75% sont inférieures à 2 m) et de courte Tp (80% sont inférieures à 10 s).

[6] La houle correspond aux vagues qui se propagent au-delà de leur zone de génération (hauteur significative de l'ordre de 1 à plusieurs mètres, période pic de 7 à 23 s).

[7] CANDHIS : Centre d'Archivage Nationale de Données de Houle In Situ du MEDDE, http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/

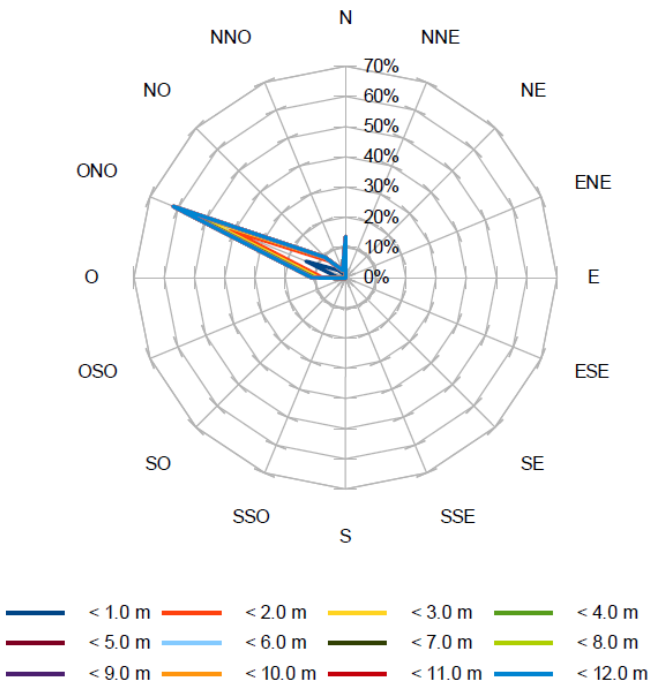


Figure 12 : Répartition des hauteurs significatives des vagues en fonction des directions de propagation des vagues, Mesures du 28/08/2001 au 01/06/2015 à la bouée CANDHIS Cap Ferret (CEREMA, SHOM, Université de Bordeaux, Fiche des états de mer, 2015).

La lagune du Bassin d'Arcachon est protégée de la houle venant du large (direction dominante Ouest – Nord – Ouest, Figure 12) qui déferle en grande partie au niveau des bancs de sable du delta de jusant (Bancs d'Arguin et du Toulinguet).

Cependant, malgré le déferlement et l'atténuation de la houle à proximité de la côte, des conditions d'agitation intenses peuvent se propager dans toute la zone de l'embouchure (rive de Pyla-sur-Mer et du Moulleau et façade interne de Lège – Cap Ferret, de La Pointe à Bélisaire) sous l'effet de la diffraction de la houle au niveau de la Pointe du Cap Ferret et/ou lors de houles de direction plus Sud (i-e dans l'axe de l'embouchure) et/ou lors de la pleine mer qui favorise les flux entrants. Ailleurs, plus en amont de la lagune, les conditions d'agitation sont beaucoup plus faibles et essentiellement liées au clapot[8] et aux courants de marée.

Lorsque le fetch[9] est maximal, lors de la pleine mer, et lorsque les conditions de vent locales sont intenses, le clapot peut avoir des impacts non négligeables au rivage : franchissements de paquets de mer et chocs mécaniques comme en témoigne la connaissance historique (cf. paragraphe 2.6) et les illustrations des Figures 13 à 18.

Outre la prise en compte de la surcote liée aux vagues (le wave Setup, cf. paragraphe ci-après), les autres effets des vagues (la houle à l'embouchure et le clapot à l'intérieur de la lagune), à savoir les franchissements de paquets de mer et les chocs mécaniques sont

[8] Le clapot correspond aux vagues générées sur place par le vent local (hauteurs significatives de quelques dizaines de centimètres, périodes pic de moins de 7 s) et sont généralement plus désorganisées que la houle.

[9] Le fetch est la surface du plan d'eau (océan, mer, lac, lagune, …) sur laquelle un vent souffle selon une certaine direction et pendant une certaine durée avec pour conséquence la formation de vagues.

donc considérés non négligeables et à prendre en compte pour l'élaboration du PPRL submersion marine.

Figure 13 : Illustrations de l'effet des vagues sur le front de mer lors de la dernière tempête du 11/01/2016 (La Dépeche du Bassin, n°1026). A gauche : Lège – Cap Ferret (photo de Martial Hoffmann) ; A droite : La-Teste-de-Buch (photo de Ghislaine Lafon).

Figure 14 : Illustrations de l'effet des vagues sur le secteur de Pyla-sur-Mer lors des grandes marées de février 2011 (source web inconnue).

Figure 15 : Illustrations de l'effet des vagues en amont de la lagune.
A gauche : Andernos-Les-Bains en décembre 2011 (Observatoire Côte Aquitaine) ; A droite : Taussat en mars 2014 (photo Mireille Blériot).

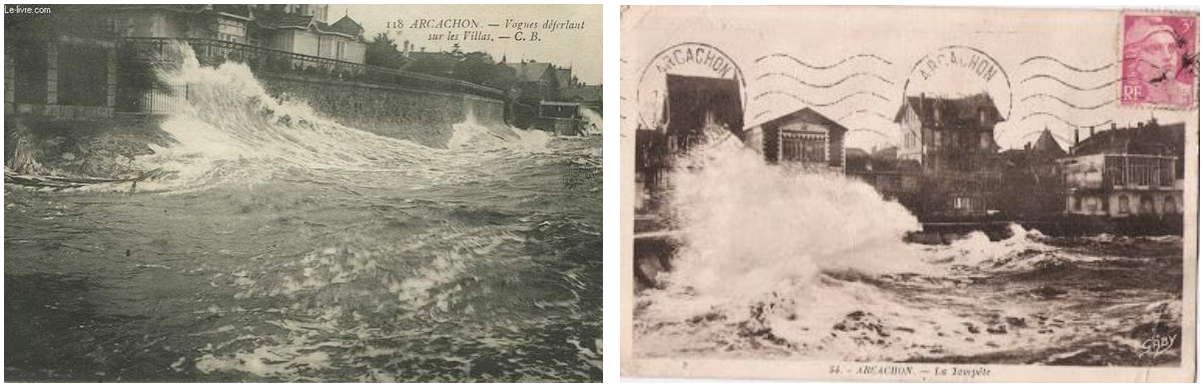


Figure 16 : Illustrations de l'effet des vagues à Arcachon.

Figure 17 : Traces d'érosion marine générée par l'effet des vagues.
A gauche : Rive du Pyla sur Mer (juillet 2015) ; A droite : Dégradation du sommet du perré dans le quartier des 44 Hectares à Lège – Cap Ferret (janvier 2014).

Figure 18 : Traces d'érosion marine générée par l'effet des vagues.
A gauche : Mur à Arès (février 2010) ; Au centre : Digue de Malprat au Teich (avril 2010) ; A droite : Sommet du perré au port de Fontainevielle à Lanton (mai 2014).

Courants et régime de marée

Alors qu'à l'extérieur du Bassin, les courants de marées sont négligeables comparés à ceux générés par les vagues (Castelle et Bonneton, 2002), ils peuvent être puissants à l'intérieur jusqu'à atteindre 2m/s dans les Passes (Plus et al., 2006). Dans le Bassin, le régime des marées à l'origine de courants alternatifs dans les chenaux, est :

- semi-diurne[10] avec une dissymétrie en mortes-eaux de 20 à 30 minutes (jusant plus court que le flot). La symétrie est quasi-parfaite en vives-eaux (L'Yavanc, 1995) ;

[10] Semi-diurne : 2 cycles de marées de période de 12h25min

- mésotidal avec un marnage moyen en vives-eaux de 3,8 m (SHOM, 2014).

D'après Plus et al. (2006), les courants sont majoritairement sortants (dominance du jusant) dans la Passe Nord (dirigés vers le Sud – Sud - Ouest au voisinage de la Pointe) et majoritairement rentrants (dominance du flot) le long de la côte du Pyla-sur-Mer et du Moulleau (communes de La-Teste-de-Buch et d'Arcachon). Plus à l'intérieur du Bassin, les courants sont plus faibles et sans dominance directionnelle nette dans un système de chenaux et de platiers sablo-vaseux.

Niveaux marins et surcotes

Dans le Bassin d'Arcachon, le niveau marin est mesuré par le marégraphe d'Arcachon, positionné au bout de la jetée d'Eyrac, depuis le 28 Novembre 1967. La durée des observations disponibles en 2012 (mesures horaires) est de 10,8 ans, ce qui représente 74,4% de lacunes (SHOM-CETMEF, 2012). Les statistiques des niveaux extrêmes calculées par le SHOM (SHOM-CETMEF, 2012) sont présentées Tableau 1.

Période de retour	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Arcachon (PM), m/NGF	3,22	3,31	3,40	3,51	3,60

Tableau 1 : Niveaux extrêmes de pleines mers (en m/NGF) à Arcachon-Eyrac (SHOM - CETMEF, 2012).

Certains évènements récents de tempête, Klaus (24/01/2009) et Xynthia (28/02/2010), ont mis en évidence l'effet important des phénomènes de surcote sur l'altitude du plan d'eau à l'intérieur du Bassin. En effet, les surcotes peuvent atteindre plusieurs dizaines de centimètres dans le Bassin.

Pour rappel, lors du passage de la tempête Klaus, alors que le coefficient de marée était moyen (58) avec une altitude du plan d'eau prévue par le SHOM de 1,75 m/NGF (marée prédite), l'altitude mesurée au marégraphe d'Arcachon-Eyrac était de 2,9 m/NGF, soit une surcote calculée de PM (Pleine Mer) de ***1,15 m.*** En revanche, la tempête Xynthia, lors de laquelle le coefficient de marée était beaucoup plus fort (102) avec une altitude du plan d'eau prévue de 2,58 m/NGF (marée prédite), a généré une altitude du plan d'eau de 3,48 m/NGF, c'est-à-dire une surcote de PM de ***0,90 m***.

Dans le Bassin, les phénomènes de surcotes proviennent de la combinaison des effets suivants :

- des effets météorologiques, i-e la surcote atmosphérique, générée par la chute de pression lors du passage d'une dépression et de l'action du vent ;

- des effets liées aux vagues (wave Setup) : la houle du large qui déferle à l'embouchure génère une surcote qui se propage de manière relativement homogène à l'intérieur du Bassin. Elle peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres. La surcote générée par le clapot (quelques centimètres) est considérée négligeable par rapport à celle générée par les vagues du large.

La conjugaison de la surcote atmosphérique et de la surcote liée aux vagues avec des forts coefficients de marées et/ou des pleines mers, peut considérablement surélever l'altitude du plan d'eau, aggravant ainsi les aléas côtiers (submersion et érosion marines), tel que ce fut le

cas, par exemple, lors de Klaus et Xynthia (submersion marine sur certains secteurs du Bassin – Andernos-Les-Bains notamment) et lors des tempêtes de l'hiver 2013-2014 (fortes érosion à l'embouchure – secteur de la Corniche – et nombreux dégâts sur les perrés et digues du Bassin – Pyla-sur-Mer, Lège – Cap Ferret, etc.).

Remarque : la surcote maximale enregistrée de 1,67 m lors de la tempête Klaus s'est produite proche de la basse mer, ce qui a limité le niveau marin maximal.

A noter : Bien que la houle ne pénètre pas à l'intérieur du Bassin (ou reste limitée à l'embouchure), la surcote liée à la houle (wave Setup), elle, se propage sur toute sa superficie. Une modélisation numérique réalisée en 2010 par le BRGM dans le cadre de ses missions pour l'Observatoire de la Côte Aquitaine, ayant pour objectif la simulation de l'altitude du plan d'eau lors des tempêtes Klaus et Xynthia a mis en évidence cette propagation homogène de la surcote notamment à PM (rapport BRGM/RP-58723-FR, Figure 19).

Le choix de la méthode de caractérisation de l'aléa pour l'élaboration du PPRL submersion marine, repose donc sur le constat de l'effet majeur de la surcote liée à la houle qui déferle à l'embouchure de la lagune et sur l'effet négligeable de la surcote liée au clapot à l'intérieur de la lagune.

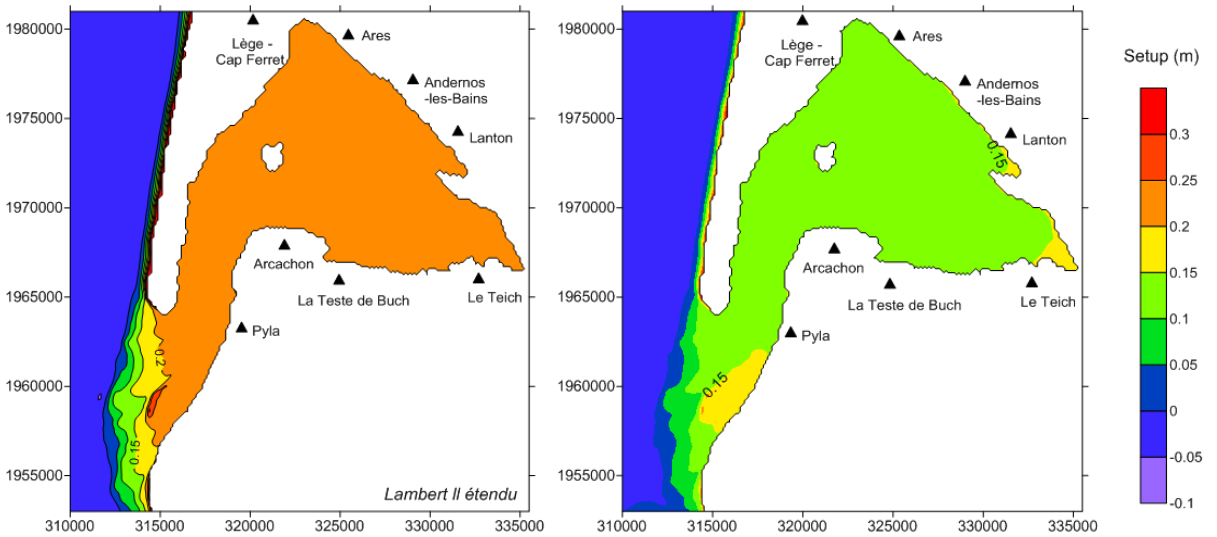


Figure 19 : Propagation de la surcote liée à la houle à l'intérieur du Bassin d'Arcachon lors des tempêtes Klaus (à gauche) et Xynthia (à droite).

Attention : cette simulation ne prend pas en compte la surcote atmosphérique.

Seiche

Les seiches sont des phénomènes d'oscillation « haute-fréquence » qui induisent un facteur d'amplification des hauteurs d'eau (plusieurs dizaines de centimètres), généralement dans les zones portuaires. **De récentes analyses temporelle et spectrale des mesures marégraphiques des ports du réseau RONIM ne mettent pas en évidence de tels phénomènes au niveau du Port d'Arcachon-Eyrac** (résultats non significatifs en amplitude et en fréquence, Muteau dans SHOM, 2014). C'est pourquoi, les seiches ne sont pas traitées dans cette étude.

2.6. CONNAISSANCES HISTORIQUES

Des informations sur les impacts des tempêtes passées ayant généré des submersions marines ont été recensées dans l'étude du CETE Sud Ouest (actuellement CEREMA) réalisée à la demande de la DDTM 33 dans le cadre des PPRL submersion marine (CETE Sud Ouest, novembre 2012).

Ces informations collectées à partir de questionnaires (État, associations, communes, etc.), du fichier CAT-NAT et de recherches bibliographiques (archives, presses, etc.) sont essentiellement qualitatives. La Figure 20 localise les secteurs ayant fait l'objet de submersions marines passées, notamment à partir des informations de l'étude du CETE Sud Ouest (novembre 2012) mais il est probable que ce recensement ne soit pas exhaustif. Certains secteurs non identifiés par absence d'information dans les archives, la presse, ou autres sources ont également pu faire l'objet de submersion marine (Pointe du Cap Ferret, delta de L'Eyre par exemple). En revanche, il est mis en évidence les nombreuses informations sur les secteurs d'Arcachon, Andernos-Les-Bains et Gujan-Mestras.

Excepté pour les évènements de Klaus (24 janvier 2009) et Xynthia (28 février 2010) pour lesquels une cartographie des surfaces inondées ainsi que des mesures de hauteurs d'eau ont été réalisées par le BRGM en association avec le SIBA, aucune information quantitative précise n'est disponible sur les submersions marines passées (Figure 20).

Impacts de la tempête Xynthia (28/02/2010)

La cartographie des surfaces inondées par submersion marine lors de la tempête Xynthia a été obtenue à partir d'observations et de levés sur le terrain réalisés les jours suivants la tempête par le BRGM et le SIBA : des laisses de mer et de traces sur les murs (Figure 21), des zones encore inondées quelques jours après la tempête (Figure 22) ainsi que des dépôts de sables et de vases avec des figures sédimentaires donnant des informations sur la direction et la vitesse de l'écoulement (Figure 23).

Bien que Xynthia n'atteigne pas l'intensité des tempêtes Martin et Lothar de décembre 1999 ou de Klaus (24/01/2009) en termes de vitesses maximales instantanées de vent, la submersion marine qu'elle a engendrée a touché tout le pourtour du Bassin d'Arcachon (Figure 20).

Ces informations qualitatives permettent d'avoir une meilleure connaissance des évènements passés et des processus locaux.

Comme suite à cette tempête, le BRGM dans le cadre de ses missions pour l'Observatoire de la Côte Aquitaine a été chargé par le SIBA d'estimer les niveaux marins et les périodes de retour (Rapport BRGM/RP-58723-FR, 2010). Alors que le niveau marin maximal mesuré à Arcachon – Eyrac lors de cette tempête est de 3,48 m/NGF, il est estimé à 3,83 m/NGF à Andernos-Les-Bains. Bien qu'il y ait une grande incertitude sur cette valeur[11], l'estimation de ce niveau marin a permis de déduire que les franchissements de paquets de mer (sous l'effet du clapot) ont joué un rôle déterminant dans le phénomène de submersion marine dans le quartier du Mauret (commune d'Andernos-Les-Bains). D'autre part, il a été souligné l'importance des connexions hydrauliques (Rapport BRGM/RP-57462-FR) : vigilance sur le dimensionnement des barbacanes et buses avec des clapets antiretour fonctionnels afin de permettre l'évacuation de

[11] Cette incertitude est notamment liée à 1/ la résolution temporelle des données de vent disponibles lors de la réalisation de l'étude qui n'était que de 3h ; 2/ l'emprise des modèles emboîtés qui pourrait aujourd'hui être améliorée 3/ les variations du niveau moyen à l'intérieur de la lagune qui n'ont pas pu être prises en compte à l'époque, etc.

l'eau vers le Bassin tout en évitant sa pénétration à l'intérieur des terres, installation de batardeaux (accès plage par exemple) avant les grandes marées et fortes conditions d'agitation, etc..

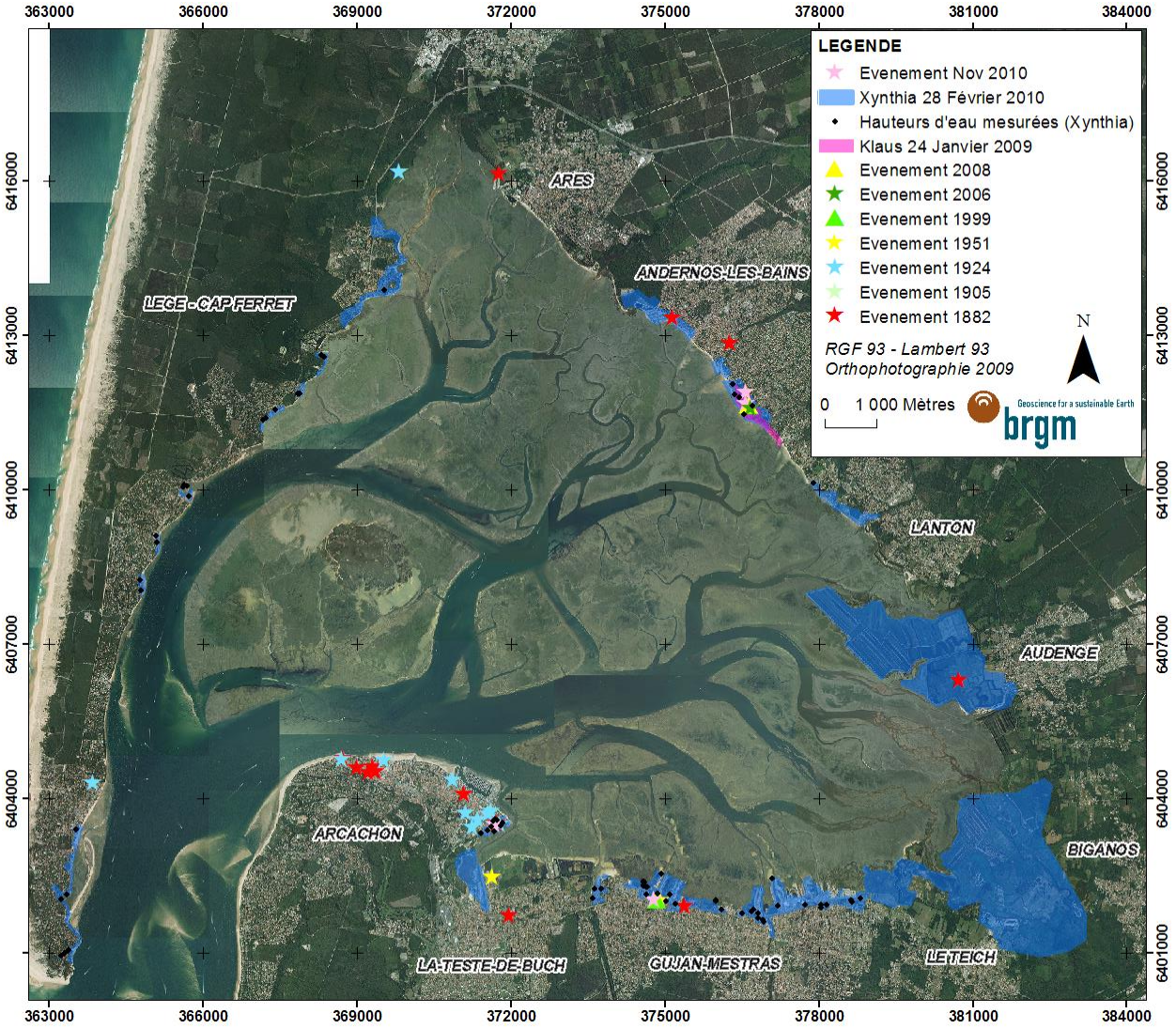


Figure 20 : Recensement des zones inondées lors d'évènements de tempête passés 1882 - 2008. (Informations issues de l'étude du CETE Sud Ouest, novembre2012). Pour les tempêtes Klaus et Xynthia, les surfaces inondées ont été cartographiées à partir de visites de terrain du BRGM (Mugica et al., 2010, Rapport BRGM/RP-58723-FR).

Figure 21 : Hauteurs d'eau mesurées à partir des laisses de mer et des traces sur les murs (Xynthia 28/02/2010).

Figure 22 : Zones encore inondées 2 jours après la tempête Xynthia (28/02/2010), Claouey à gauche, Gujan-Mestras à droite en exemple.

Figure 23 : Dépôts de sables et de vase

Impacts des tempêtes de l'hiver 2013-2014

Plus récemment, les tempêtes de l'hiver 2013-2014 sur la côte Aquitaine ont présenté un caractère exceptionnel par leur succession. La proportion de hauteurs significatives des vagues dépassant le seuil de tempête lors de l'hiver 2013-2014 est nettement supérieure aux valeurs issues de modélisation pour les hivers de 1958 à 2002 (base de données de vagues BoBWA-X3, Bulteau et al., 2013),et correspond à plus du double des valeurs enregistrées par la bouée « Cap Ferret » pour les 3 hivers de 2008-2009, 2011-2012 et 2012-2013. D'autre part, la puissance de la houle au cours de cet hiver est très nettement supérieure aux données historiques (modèles et mesures). En revanche, ces tempêtes n'ont pas généré de niveaux

d'eau particulièrement exceptionnels : les tempêtes Christina (3-4 janvier 2014) et Christine (3 mars 2014) indiquent toutefois des valeurs notablement supérieures au reste des évènements avec une période de retour maximale d'environ 12 ans observée au marégraphe de Port-Bloc pour Christine (Rapport BRGM/FR-63797-FR).

Les impacts de ces événements ont été suivis (de manière non exhaustive) sur le Bassin d'Arcachon par l'Observatoire de la Côte Aquitaine. La Figure 24 présente la localisation des premières observations réalisées au début (7-9 janvier 2014) de l'enchainement de tempêtes de l'hiver 2013-2014.

Hormis des débordements localisés (Lège – Cap Ferret : La Pointe, Rue du Tram, Claouey, etc.) et sur le Domaine Public Maritime, aucune submersion exceptionnelle n'a été constatée sur le Bassin d'Arcachon (Figure 25).

En revanche, de nombreux dégâts sur les infrastructures (cabanes des villages ostréicoles, ouvrages portuaires, perrés et digues) ont été constatés (Figure 25, Figure 26 et Figure 27). Les déplacements de blocs, les dégradations de perrés, les traces d'érosion sur les digues en terre ainsi que les traces d'érosion observées sur tout le pourtour du Bassin témoignent des effets défavorables que peuvent avoir les vagues (clapot) jusqu'en amont de la lagune.

A noter également que la flèche sableuse du Mimbeau a fait l'objet de plusieurs brèches et entailles d'érosion marine (Figure 28).

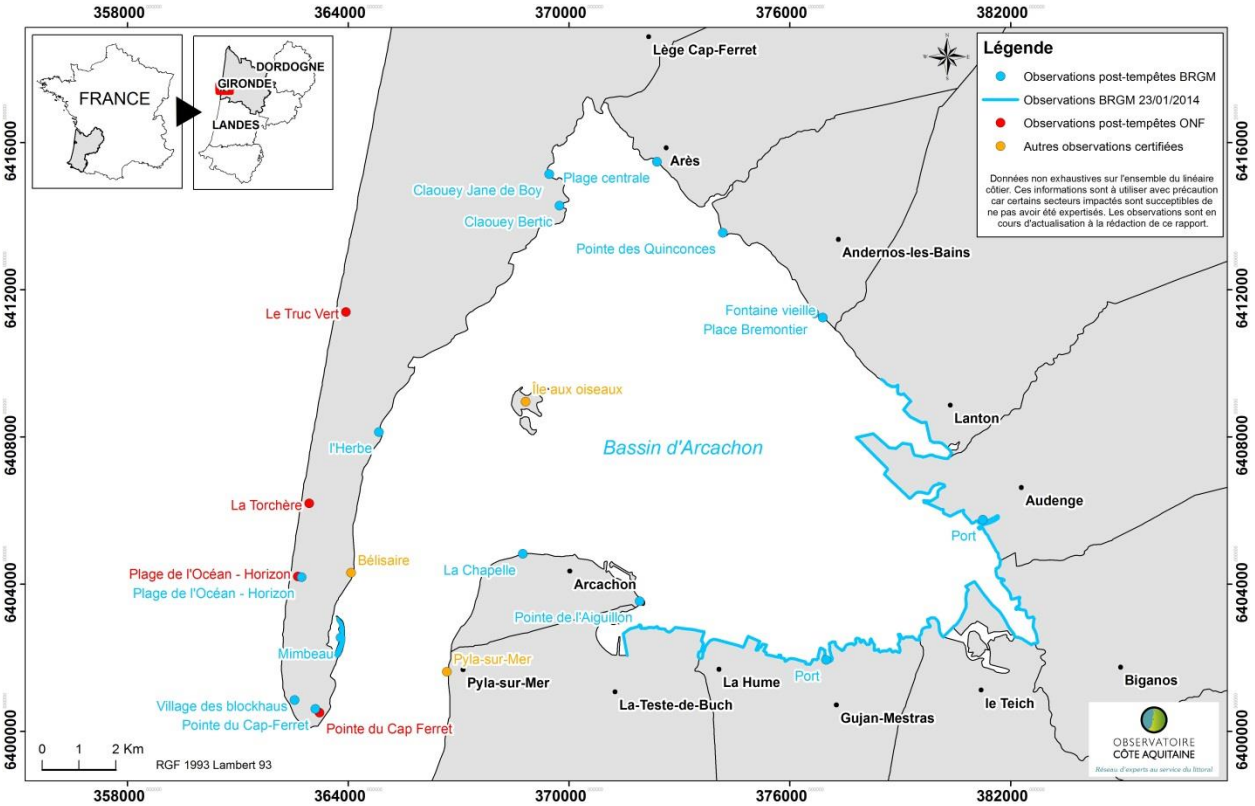


Figure 24 : Carte de localisation des différents types d'observations post-tempêtes effectuées sur le Bassin d'Arcachon entre le 7 et le 9 janvier 2014 (issue du Rapport BRGM/FR-63182-FR).

Figure 25 : Exemples de submersions locales lors de l'hiver 2013-2014 (BRGM)
A gauche : dans le domaine des 44 Hectares avec dépôt de sable et de vase (Lège-Cap-Ferret, 09/01/2014) ; Au centre : dépôt de sable, anse de Bertic à Claouey (Lège-Cap-Ferret, 09/01/2014) ; A droite : surverse marine (tirets rouges) et érosion des terrains au sommet des enrochements sur le domaine de Graveyron (Audenge, 23/01/2014).

Figure 26 : Exemple de dégâts sur la façade interne de la flèche du Cap Ferret lors des tempêtes de l'hiver 2013-2014, (©SudOuest)

Figure 27 : Déplacement de blocs au niveau de l'enrochement de la Pointe du Cap Ferret à Hortense (Lège-Cap-Ferret, 09/01/2014, BRGM).

Figure 28 : Impacts des tempêtes de l'hiver 2013-2014 sur la flèche sableuse du Mimbeau : surverse au sud et érosion du pied de dune au nord, 6 brèches, 11 entailles d'érosion marine (commune Lège – Cap Ferret, Rapport BRGM/RP-63182-FR).

La connaissance historique a permis de mettre en évidence l'effet des vagues dans le phénomène de submersion marine sur certains secteurs. Même si le niveau marin ne dépasse pas l'altitude du terrain naturel, des submersions marines peuvent se produire par franchissement de paquets de mer sur certains secteurs (quartier du Mauret à Andernos-Les-Bains, Pointe du Cap Ferret par exemple). D'autre part, les vagues (houle à l'embouchure, clapot en amont de la lagune) peuvent être responsables d'érosion des structures de protection côtières et générer des brèches. Enfin, la connaissance historique a également permis de mettre en évidence le rôle important des connexions hydrauliques sur les entrées et évacuation d'eau marines (buses, clapet anti-retour, écluses et ponts cadre) dans les zones particulièrement basses (Communes de La-Teste-de-Buch, de Gujan-Mestras, de Le Teich et d'Andernos-Les-Bains par exemple).

2.7. CONCLUSION SUR LES PHENOMENES NATURELS A L'ORIGINE DES SUBMERSIONS

L'analyse du fonctionnement du littoral du Bassin d'Arcachon basée sur une synthèse bibliographique des connaissances existantes a permis de dégager les principales caractéristiques géographiques, géologiques, météorologiques, océanographiques et hydrologiques à prendre en compte pour l'élaboration des PPRL submersion marine. **La méthodologie de caractérisation de l'aléa submersion marine s'appuie donc sur ces caractéristiques :**

- **Les submersions marines par débordement du plan d'eau sont considérées comme les plus impactantes** en termes d'emprise et de hauteur d'eau à l'échelle de l'ensemble du Bassin d'Arcachon ;
- Les **vagues ont un effet non négligeable** sur les aléas côtiers du Bassin d'Arcachon :
    - La **génération d'une surcote** lors du déferlement de la houle à l'embouchure qui se propage à l'intérieur de la lagune peut contribuer significativement à l'élévation de l'altitude du plan d'eau ;
    - Les **franchissements de paquets de mer** peuvent être responsables de submersions marines dans certaines zones basses (quartier du Mauret à Andernos-Les-Bains et Pointe du Cap Ferret par exemple) et générer des vitesses d'écoulement très importantes sur les premiers mètres du front de mer sur tout le pourtour du Bassin ;
    - Les **chocs mécaniques** induits par le déferlement des vagues (houle à l'embouchure, clapot en amont de la lagune) sont responsables de dégradations du front de mer (dégâts sur les infrastructures, érosion et brèches des structures de protection côtières) ;
- **Les vents les plus violents et associés aux plus fortes vagues qui peuvent générer des surcotes pluri-décimétriques sont le plus fréquemment de direction Ouest – Nord – Ouest.** En complément de l'analyse bibliographique du contexte météorologique, une analyse de la sensibilité de l'altitude du plan d'eau dans le Bassin face à différentes directions et intensités du vent a été réalisée. La méthode et les résultats sont présentés en Annexe 2.
- Bien que les **inondations par remontées de nappes et débordement des cours d'eau** soient des aléas caractéristiques des zones basses et humides telles que le Bassin d'Arcachon, aucun élément (historiques, mesures de débit, etc.) ne permet de considérer qu'une conjonction d'un tel évènement annuel voire décennal pourrait amplifier l'impact d'un évènement marin centennal à terre. D'autre part, en l'état actuel des connaissances (fonctionnement fluvial des principaux cours d'eau du Bassin, disponibilité de longues chroniques de mesures de débit), ces phénomènes ne peuvent être pris en compte dans une stratégie de modélisation numérique de l'aléa submersion marine sans générer de larges incertitudes. C'est notamment pourquoi, la DDTM de la Gironde a choisi de ne pas prendre en compte les inondations par remontées de nappes et débordement des cours d'eau pour l'élaboration des PPRL Submersion marine du Bassin d'Arcachon. En revanche, l'impact défavorable de niveau de marée important (lors de fort coefficient) sur le phénomène d'inondation fluviale ou pluviale est pris en compte dans le cadre d'autres études que celles des PPRL Submersion marine (schémas directeurs de gestion des eaux pluviales par le SIBA, par exemple).

3. Evènement naturel de référence

L'élaboration des PPRL s'appuie sur la caractérisation de l'aléa submersion marine, c'est-à-dire *« sa transcription spatiale »,* pour un évènement naturel de référence donné (MEDDE, mai 2014). D'après les consignes ministérielles *« **L'évènement naturel de référence est l'évènement historique majeur s'il est supérieur à un évènement de période de retour 100 ans.** Par défaut, c'est l'évènement théorique de période de retour 100 ans. ».*

Sur le Bassin d'Arcachon l'évènement historique le plus fort suffisamment documenté en termes de submersion marine s'est produit lors de la tempête Xynthia le 28 février 2010. La période de retour du niveau marin au marégraphe d'Arcachon – Eyrac a été estimée de 20 à 50 ans par le SHOM (Pineau-Guillou, 2010). En raison du jeu de données utilisé (environ 10 ans de mesures au moment de l'étude) et de la configuration du Bassin d'Arcachon, ces valeurs ne représentent qu'une estimation. Cela permet néanmoins de constater que la période de retour du niveau marin lors de Xynthia dans le Bassin d'Arcachon est nettement inférieure à 100 ans. **De ce fait, il a été considéré nécessaire de calculer les caractéristiques d'un évènement naturel de période de retour 100 ans.**

3.1. RAPPEL DES CONCLUSIONS DES PRECEDENTES ETUDES ET NOUVELLES CONSIDERATIONS

Ce présent chapitre rappelle les résultats menés dans la phase 1 de l'étude PPRL pour la détermination de l'évènement naturel de référence, c'est-à-dire le calcul de l'évènement naturel centennal au large (les résultats sont détaillés dans le rapport BRGM/RP-61408-FR). Des analyses complémentaires réalisées dans cette phase 2 sont également présentées et concernent notamment le choix des paramètres de vent de l'évènement naturel de référence et la comparaison de l'évènement naturel centennal avec les évènements historiques et les niveaux centennaux du SHOM-CETMEF (2012).

Lors de la phase 1 de l'étude, la DDTM de la Gironde a souhaité qu'une direction de vent de Ouest – Sud – Ouest (215°N) soit testée afin d'estimer l'éventuel impact défavorable des vents orientés dans l'axe de l'embouchure. Pour cela, c'est la combinaison n°8 qui a été employée (la combinaison n°7 avec des vagues de 7 m ne pouvant être associée à des vents de cette direction comme l'illustre la Figure 29). Sur certains secteurs du Bassin d'Arcachon (Nord-Est essentiellement), les niveaux marins au rivage générés par la combinaison n°8 avec un vent de 215°N sont effectivement supérieurs de quelques centimètres à ceux de la combinaison n°7 avec un vent de 270°N (cf. rapports BRGM/RP-61408-RP et BRGM/RP-62187-FR).

En conclusion de l'étude « Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre des PPRL du Bassin d'Arcachon (Gironde), Détermination de l'évènement naturel de référence. Rapport intermédiaire » (rapport BRGM/RP-61408-FR, Mugica *et al.*, 2014) il était indiqué :

« *Il est déduit de cette comparaison que l'évènement naturel de référence retenu pour cartographier l'aléa submersion marine dans le cadre des PPRL est l'évènement naturel centennal défini dans ce rapport qui correspond à :*

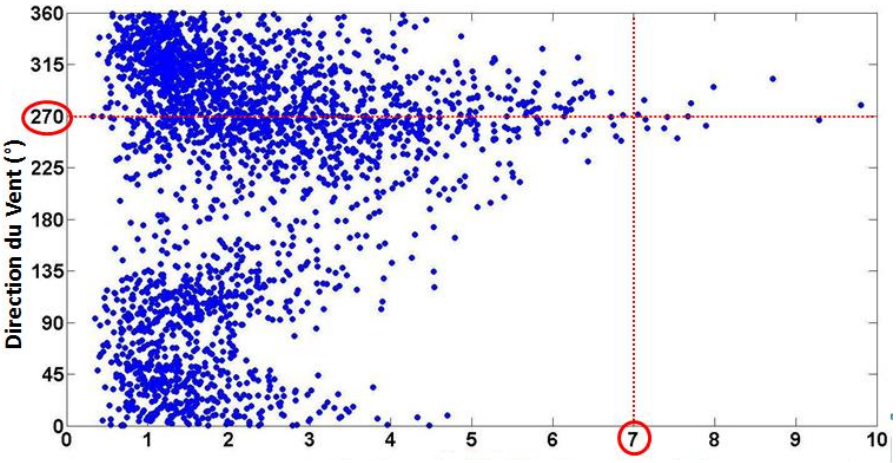
- *la combinaison n°8 avec un vent de direction 215°N pour l'ensemble du Bassin d'Arcachon excepté sur le Delta de l'Eyre (entre Lanton et La-Teste-de-Buch).*
- *la combinaison n°7 avec un vent de direction 270°N pour la zone du Delta de l'Eyre entre Lanton et La-Teste-de-Buch. »*

Il convient de rappeler que l'analyse en probabilités conjointes a été faite pour le couple de variable (Hs, Niveaux) et non pour la combinaison (Hs, Tp, Dp, Niveaux, Vitesse de vent, Direction de vent). Les variables Tp, Dp, Vitesse de vent, Direction de vent sont traitées comme des co-variables, *i.e.* des variables secondaires que l'on considère ici comme entièrement conditionnées à Hs. Autrement dit, lorsque l'on parle d'évènement naturel centennal, il s'agit bien de la combinaison (Hs, Niveaux) de période de retour de dépassement conjoint centennale à laquelle on associe une valeur de Tp, Dp, Vitesse de vent, Direction de vent. On fait donc l'hypothèse que la période de retour de la combinaison complète (Hs, Tp, Dp, Niveaux, Vitesse de vent, Direction de vent) est identique à celle du couple (Hs, Niveaux). Hypothèse que l'on peut considérer comme valide si les valeurs des co-variables sont bien choisies c'est-à-dire si, pour un Hs donné, les valeurs des co-variables sont les plus probables.

Dans cette phase 2 de l'étude, il a été montré que la combinaison n°8 (Hs de 6 m, vent de 215°N) est très peu probable (Figure 29). La combinaison résultante est plus rare que celle avec un vent de 270°N et il a donc été convenu entre le BRGM, la DDTM de la Gironde et le SIBA de l'écarter.

Pour tenir compte de l'incertitude de la submersion marine vis-à-vis des paramètres de vent (vitesse et direction), des tests de sensibilité ont été réalisés sur la combinaison 7. La méthode et les résultats sont présentés en Annexe 2. Ces tests, dits de sensibilité, ont permis de constater une influence faible à l'échelle du Bassin d'Arcachon de la variation des paramètres de vent sur un phénomène de submersion marine résultant d'un évènement naturel centennal.

La DDTM de la Gironde en concertation avec le SIBA et le BRGM a donc choisi de ne retenir qu'une direction et une intensité de vent sur l'ensemble du Bassin d'Arcachon pour l'évènement naturel de référence : 270°N et 13,2 m/s avec la combinaison n°7.



Dir (°) / Hs (m)

	0.00	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50	7.00	7.50	>8.00
0	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.02	0.02	0.04	0.02	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.05	0.05	0.05	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50	0.00	0.06	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60	0.21	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
70	0.05	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
80	0.05	0.05	0.02	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.05	0.05	0.03	0.05	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100	0.11	0.02	0.03	0.05	0.02	0.03	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
110	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	0.00	0.02	0.02	0.02	0.04	0.01	0.02	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
130	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
140	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
150	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
160	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
170	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
180	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
190	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.00	0.02	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
210	0.00	0.02	0.00	0.01	0.02	0.03	0.06	0.03	0.04	0.07	0.02	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
220	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.06	0.04	0.03	0.02	0.00	0.05	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
230	0.00	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.06	0.11	0.08	0.04	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
240	0.00	0.03	0.02	0.02	0.04	0.07	0.06	0.04	0.08	0.04	0.12	0.00	0.05	0.17	0.00	0.00	0.00
250	0.00	0.01	0.03	0.04	0.07	0.06	0.08	0.14	0.14	0.07	0.15	0.19	0.14	0.17	0.33	0.20	0.00
260	0.11	0.03	0.03	0.05	0.11	0.07	0.10	0.15	0.19	0.15	0.12	0.13	0.05	0.33	0.33	0.40	0.33
270	0.05	0.01	0.04	0.05	0.07	0.08	0.08	0.07	0.08	0.11	0.07	0.23	0.24	0.17	0.17	0.00	0.33
280	0.00	0.03	0.04	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.08	0.15	0.17	0.13	0.29	0.00	0.17	0.20	0.00
290	0.00	0.04	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.08	0.06	0.04	0.07	0.13	0.10	0.17	0.00	0.20	0.00
300	0.05	0.04	0.07	0.07	0.04	0.06	0.07	0.03	0.04	0.09	0.07	0.06	0.05	0.00	0.00	0.00	0.33
310	0.00	0.06	0.08	0.06	0.06	0.03	0.05	0.01	0.02	0.04	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
320	0.05	0.07	0.08	0.06	0.03	0.03	0.02	0.04	0.01	0.00	0.02	0.03	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
330	0.05	0.06	0.05	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
340	0.00	0.06	0.05	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
350	0.00	0.05	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Figure 29 : Graphe bivarié représentant les directions de vent en fonction des hauteurs significatives de vagues après sélection des évènements indépendants (cf. rapport BRGM/RP-61408-FR)[en haut] et fréquence normalisée des directions de vent par tranche de Hs (la valeur de Dir la plus observée par tranche de Hs est la case la plus colorée)[en bas]

3.2. RAPPEL METHODE DE CALCUL DE L'EVENEMENT NATUREL CENTENNAL

3.2.1. Principe

Dans le cas du Bassin d'Arcachon, les résultats de modélisations et les observations de terrain réalisés dans le cadre de travaux antérieurs (Mallet et al., 2009, rapport BRGM/RP-57462-FR ; Mugica et Mallet, 2009, BRGM/RP-57902-FR ; Mugica et al., 2010, BRGM/RP-58723-FR ; Mugica et al., 2013, BRGM/RP-61408-FR) ont mis en évidence l'hétérogénéité de l'altitude du plan d'eau à l'intérieur de la lagune lors d'évènements extrêmes sous l'effet des vents et de la circulation marine. C'est pourquoi la spécificité de la lagune a été prise en compte pour identifier un évènement naturel de référence par secteur, conformément aux consignes du

guide méthodologique (MEDDE, mai 2014) : *« Dans certains cas particuliers, plusieurs évènements naturels de référence peuvent être retenus à l'échelle du bassin d'étude des aléas ».*

3.2.2. Caractéristiques de l'évènement naturel centennal au large

Grâce aux données météo-marines disponibles et à celles spécifiquement générées pour cette étude, la méthode complète du BRGM (Bulteau et *al.*, 2012) recommandée dans le guide méthodologique du MEDDE (mai 2014) a pu être mise en œuvre pour calculer l'évènement naturel centennal au large. Cette méthode consiste à réaliser des analyses statistiques sur les données météo-marines à partir du logiciel JOIN-SEA (Hawkes et *al.*, 2002) afin de déterminer des couples Hs (hauteur significative des vagues) et SWL (niveaux d'eau au repos) de période de retour conjointe centennale ainsi que Tp et Dp (période et direction pic des vagues) puis Uv et Dv (vitesse et direction du vent) associées. **Cette méthode est détaillée dans le rapport BRGM/RP-61408-FR (janvier 2014).**

L'évènement naturel centennal au large est ainsi caractérisé par la combinaison des hauteurs de vagues avant leur déferlement et du niveau d'eau au large qui intègre le niveau de marée et la surcote atmosphérique, pour une période de retour centennale dite « conjointe ». Il s'agit ici de la période de retour de dépassement conjoint. C'est-à-dire qu'il y a une possibilité sur 100 chaque année que cet évènement (couple Hs et SWL) se produise ou soit dépassé.

Treize combinaisons centennales de hauteur de vagues et de niveau marin ont été sélectionnées de manière à être représentatives de l'ensemble des évènements naturels centennaux (Tableau 2). Elles associent par exemple des fortes conditions de vagues avec des faibles niveaux marins (combinaisons 1 à 4) ou bien à l'opposé du tableau, des faibles conditions de vagues avec forts niveaux marins (combinaisons 10 à 13) avec au centre, des combinaisons intermédiaires.

D'autres paramètres associés[12] à ces combinaisons centennales hauteur de vagues et niveau d'eau ont été déterminés. Il s'agit de la période et de la direction pics des vagues ainsi que de l'intensité et de la direction du vent (Tableau 2)**.** La direction pic des vagues retenue après analyse statistique est 270°N (Rapport BRGM/RP-61408-FR).

Combinaisons		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Niveau marin(marée + surcote athmosphérique)	SWL(m/NM)	0.5	1.07	1.29	1.58	2.04	2.26	2.41	2.47	2.52	2.58	2.63	2.66	2.69
Hauteur significatives des vagues	Hs(m)	10.2	10.19	10.1	9.89	9.15	8	7	6	5	4	3	2	1
Période pic des vagues	Tp(s)	17.3	17.3	17.3	17.2	16.8	16.2	15.6	15	14.5	13.8	13	11.8	10.4
Intensité du vent	Uv(m/s)	18.8	18.7	18.6	18.3	17	14.5	13.2	11.9	10.5	8.9	7.1	6	5.5
Direction du vent	Dir(°N)	270	270	270	270	270	270	270	270 - 215	270 - 215	270 - 215	270 - 215	270 - 215	270 - 215

Tableau 2 : Combinaisons centennales de hauteur de vagues et de niveaux marins (sans prise en compte de l'incertitude) au large avec paramètres associés.

[12] Attention : la période de retour de ces paramètres associés n'est pas connue car non calculée par cette méthode d'analyse statistique.

Parmi ces 13 combinaisons, la plus défavorable pour ce qui est du niveau marin au rivage sur l'ensemble du Bassin a été retenue pour représenter l'évènement naturel de référence. Il s'agit de la combinaison n°7 (Tableau 2)**.** Ce choix s'est appuyé sur une stratégie de modélisation qui a permis de propager les caractéristiques de chaque combinaison depuis le large vers le rivage à l'intérieur de la lagune en tenant compte de sa configuration et de calculer ainsi les niveaux marins au rivage résultants de la contribution du niveau de marée, de la surcote atmosphérique, de la surcote liée au déferlement des vagues à l'embouchure et des caractéristiques du vent (Tableau 3).

Combinaisons		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Surcote liée aux vagues	Setup (m)	0.6	0.6	0.59	0.58	0.53	0.46	0.4	0.33	0.25	0.19	0.12	0.06	0.01

Tableau 3 : Surcote liée au déferlement des vagues à l'embouchure du Bassin.

3.2.3. Prise en compte du changement climatique et des incertitudes de la méthode

Changement climatique

Conformément aux consignes méthodologiques (guide méthodologique, MEDDE, mai 2014), le niveau marin doit prendre en compte l'élévation du niveau de la mer sous l'effet du changement climatique pour l'évènement naturel de référence ainsi que pour un évènement naturel « à échéance 100 ans ».

Une marge de **20 cm** est donc rajoutée au niveau marin (de l'événement naturel centennal) au large pour l'**évènement naturel de référence**.

Pour **l'évènement naturel « à échéance 100 ans »,** c'est une marge de **60 cm** qui est ajoutée au niveau marin de l'évènement naturel centennal (dont 20 cm sont déjà ajoutés au niveau marin au large de l'évènement de référence).

Ces consignes s'appuient sur les prévisions du GIEC reprises par l'ONERC citées dans la Circulaire du 27 juillet 2011 et reprises dans le guide méthodologique (MEDDE, mai 2014).

Marge de sécurité liée aux incertitudes

Les incertitudes liées à la méthode de détermination de l'évènement naturel de référence doivent également être prises en compte (incertitudes sur les données et outils utilisés). Il est recommandé de rajouter une marge de 25 cm au niveau marin de l'évènement naturel de référence si les incertitudes ne peuvent être estimées.

Cependant, les incertitudes de chaque étape de la méthode mise en œuvre pour déterminer le niveau marin de l'évènement naturel de référence ont pu être calculées et ont permis au BRGM de proposer une **marge de sécurité de 15 cm** en remplacement de la marge de 25 cm recommandée dans le guide méthodologique (cf. rapport BRGM/RP-61408-FR).

Cette marge de 15 cm a été acceptée par la DDTM de la Gironde. Cette marge de sécurité sera donc intégrée aux niveaux marins des combinaisons utilisées dans les simulations pour la caratérisation de l'événement naturel de référence.

3.2.4. Références altimétriques

Jusqu'à présent, les résultats de niveaux marins ont été exprimés en référence au Niveau Moyen (NM) comme il est d'usage dans les études de modélisation numérique en océanographie.

Une conversion en 2 étapes a dû être réalisée afin de déterminer les altitudes IGN69 du plan d'eau puis de réaliser les cartes de submersion marine à terre :

1/ expression par rapport au zéro hydrographique du SHOM[13] (par exemple, à Arcachon l'écart entre le Niveau Moyen et la Cote Marine (CM) est de 2,53 m d'après le fichier CST-France du SHOM, Le Roy et Simon, 2003) ;

2/ expression par rapport au zéro NGF de l'IGN69[14] (le zéro NGF est au-dessus du zéro hydrographique, à +1 ,98 m d'après les Références Altimétriques Maritimes du SHOM, 2014).

Une présentation détaillée de la méthode est réalisée dans le rapport BRGM/RP-61408-FR.

3.3. COMPARAISON AVEC LES EVENEMENTS HISTORIQUES ET NIVEAUX CENTENNAUX DU SHOM-CETMEF 2012 A ARCACHON-EYRAC

Lors de la première phase de la caractérisation de l'aléa submersion marine pour les PPRL du Bassin d'Arcachon, le niveau marin au rivage a été calculé pour l'évènement naturel centennal au large de façon simplifiée (pas d'intéraction entre les niveaux d'eau-courants-vagues) et sans prise en compte des débordements à terre[15] (cf. rapport BRGM/RP-61408-FR). Le niveau marin qui avait été calculé au droit de la jetée d'Eyrac est de **3,95 m/NGF** (incluant à la fois les 20 cm du changement climatique et les 15 cm de marge de sécurité).

Cette première phase de l'étude a ensuite été affinée par une approche dite « dynamique » basée sur une modélisation numérique chainée SWAN/MARS-2DH permettant de prendre en compte les intéractions niveaux d'eau-courants-vagues ainsi que les débordements (détaillées dans le présent rapport). Cette approche a permis de recalculer de manière plus fine les niveaux marins au rivage (sur tout le pourtour du Bassin d'Arcachon) issus d'un évènement naturel centennal au large. Le niveau marin au rivage calculé à Arcachon-Eyrac dans cette seconde phase est de **3,85 m/NGF** (incluant les 20 cm du changement climatique et les 15 cm de marge de sécurité).

Aussi si l'on enlève à cette valeur les 20 cm liés au changement climatique, on peut constater que le niveau de **3,65 m** obtenu est:

- supérieur au maximum historique de **3,48 m/NGF** enregistré lors de Xynthia ;

[13] Le *zéro hydrographique* (fourni par le SHOM) est une référence verticale. Il s'agit du niveau de référence commun aux cartes marines et aux annuaires des marées. Il correspond au niveau de référence à partir duquel sont comptées positivement vers le bas, les sondes portées sur les cartes marines et, positivement vers le haut, les hauteurs de marée. Il est choisi en France au voisinage (généralement en-dessous) du niveau des plus basses mers astronomiques.

[14] Le *zéro NGF* (Nivellement Général de la France) est le niveau zéro utilisé sur les cartes de l'IGN.

[15] Pour rappel, pour cette 1ère phase, la submersion a été caractérisée par une approche dite « statique » c'est-à-dire par projection du niveau marin obtenu au rivage sur la topographie (cf. rapport BRGM/RP-62187-FR).

- comparable aux valeurs centennales issues de l'analyse statistique des extrêmes à partir des mesures à Arcachon-Eyrac effectuées par le SHOM-CETMEF (2012) et le BRGM (voir Annexe 3) de **3,60 m/NGF et 3,65m/NGF** respectivement.

La comparaison (cf. paragraphe sur la validation de l'approche modèle 6.6.2) de ces niveaux marins permet de déduire que **le niveau marin au rivage modélisé à Arcachon pour un évènement naturel centennal au large, propagé à l'intérieur du Bassin est compris dans l'intervalle de confiance d'un niveau d'eau de période de retour 100 ans déterminé à partir des observations au marégraphe.**

I**l est ainsi vérifié au marégraphe d'Arcachon-Eyrac que le niveau marin de l'évènement naturel de référence retenu est de l'ordre de grandeur de celui d'un évènement naturel centennal ; l'évènement historique présentant des caractéristiques inférieures (périodes de retour et niveau marin).**

4. Données utilisées et connaissance terrain

Ce chapitre a pour objet de présenter les données topographiques et bathymétriques utilisées ainsi que les données relatives à l'occupation du sol, les structures de protection côtière (digues par exemple), les connexions hydrauliques et les remblais. Les données météo-marines ont été présentées dans le rapport BRGM/RP-61408-FR.

Pour rappel, la caractérisation de l'aléa submersion marine a été réalisée dans l'état des connaissances actuelles et avec les données et outils disponibles au démarrage de l'étude.

La précision des résultats dépend entre autre de la qualité des données utilisées. C'est pourquoi, le choix de ces données a fait l'objet d'une concertation entre le BRGM, la DDTM de la Gironde et le SIBA. La bonne connaissance de leur qualité a ensuite permis une analyse critique des résultats (précision, résolution, incertitudes, cf. chapitre 7.4).

4.1. DONNEES TOPOGRAPHIQUES DISPONIBLES

Les données topographiques et bathymétriques ont été recueillies et rassemblées pour constituer un Modèle Numérique de Terrain (MNT) nécessaire à la simulation dynamique des phénomènes de submersion marine.

Les informations sur les données collectées sont rassemblées dans le Tableau 4 et la Figure 31.

Le levé LIDAR a été réalisé par le SIBA à l'été 2005 (juillet-aout-septembre) par la société Terra Imaging. Il s'agit d'un LIDAR topographique (ne pénétrant pas l'eau). Les bâtiments (sauf digues et ouvrages d'art) ainsi que la végétation ne sont pas représentés. Il a été compilé dans une grille de maille de 2 m de côté constituant un modèle numérique de terrain (Figure 30). Celui-ci a fait l'objet d'une analyse de sa qualité en le comparant aux levés DGPS disponibles sur la période du levé LIDAR. Cette analyse et les préconisations d'utilisation ont été décrites dans le rapport BRGM/RP-62187-FR. Une des conclusions est que ces données LIDAR de 2005 sont globalement fidèles à la précision altimétrique annoncée de moins de 25 cm.

La Figure 32 présente les données DGPS qui ont été fournies par les différents acteurs locaux. Cependant toutes n'ont pas été utilisées en raison soit de leur format non exploitable dans un SIG soit de leur localisation considérée peu influente sur l'aléa. La Figure 33 présente donc les données DGPS finalement utilisées pour construire le MNT.

Données	Fournisseur	Format	Commentaires
LIDAR 2005	SIBA	Dalles de 2km x 2km de résolution 2m x 2m	Précision altimétrique de 25 cm sur domaine terrestre Une évaluation de la qualité de la donnée a été effectuée dans le rapport BRGM RP-62187-FR
Sondes bathymétriques 2002 et 2007	DDTM33 et SIBA	Levés mono-faisceau	Couverture de l'ensemble du Bassin et des passes
Sondes bathymétriques	SIBA	Levés mono-faisceau	Delta de L'Eyre
Histolitt®	SHOM	semis de points MNT maille de 50m x 50m	Utilisation au large du Bassin, partie océanique
Levés DGPS	SIBA, Conservatoire du Littoral, les services techniques des communes, DDTM33, Observatoire de la Côte Aquitaine, …	Données ponctuelles	Toutes les données n'ont pu être exploitées

Tableau 4 : Données topo-bathymétriques collectées sur le Bassin d'Arcachon.

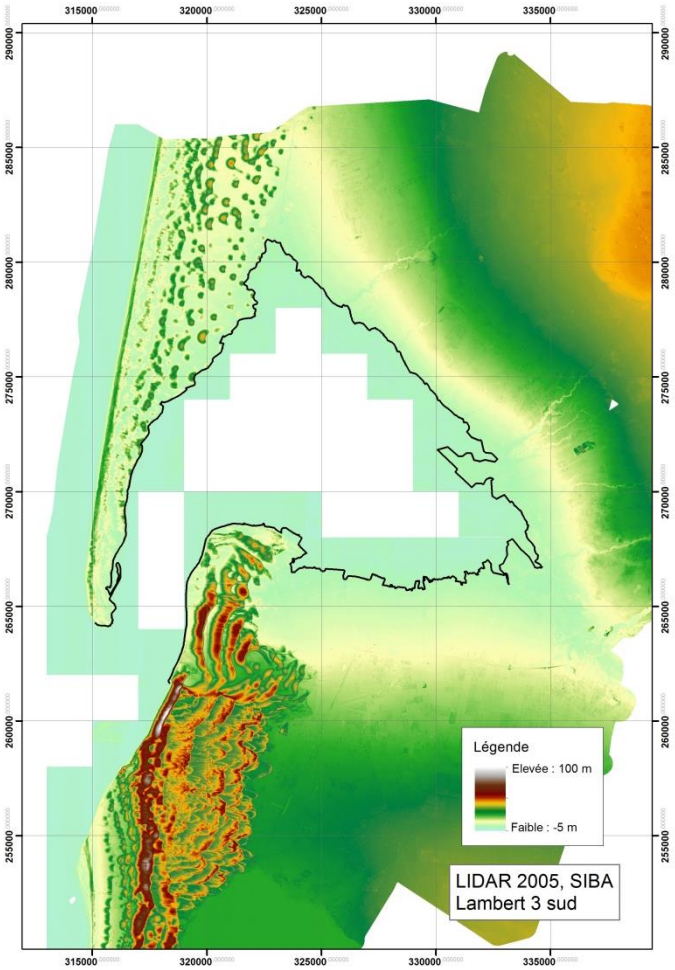


Figure 30 : Emprise géographique des données LIDAR de 2005 du SIBA.

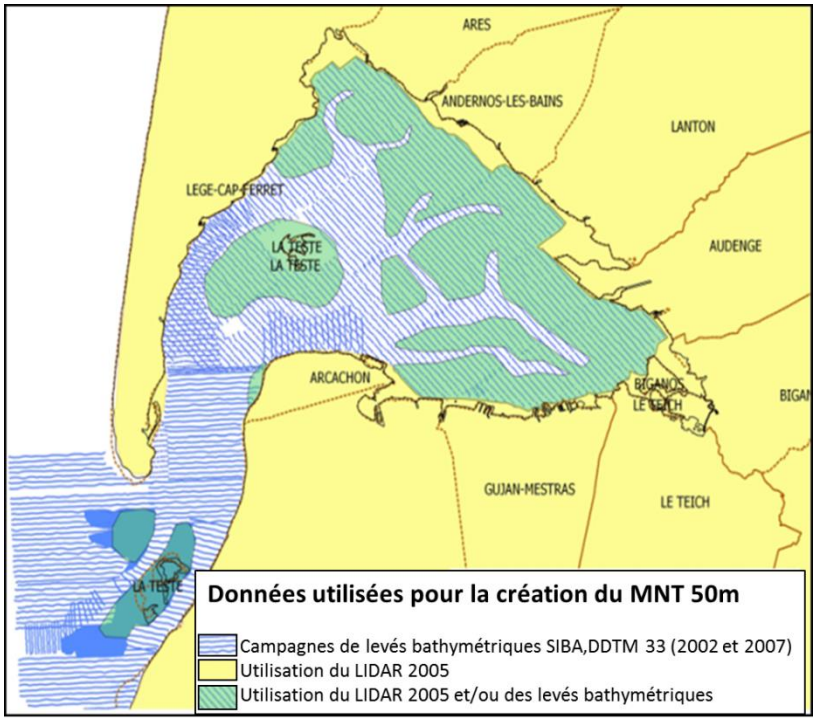


Figure 31 : Emprise schématique des différentes sources de données topographiques et bathymétriques.

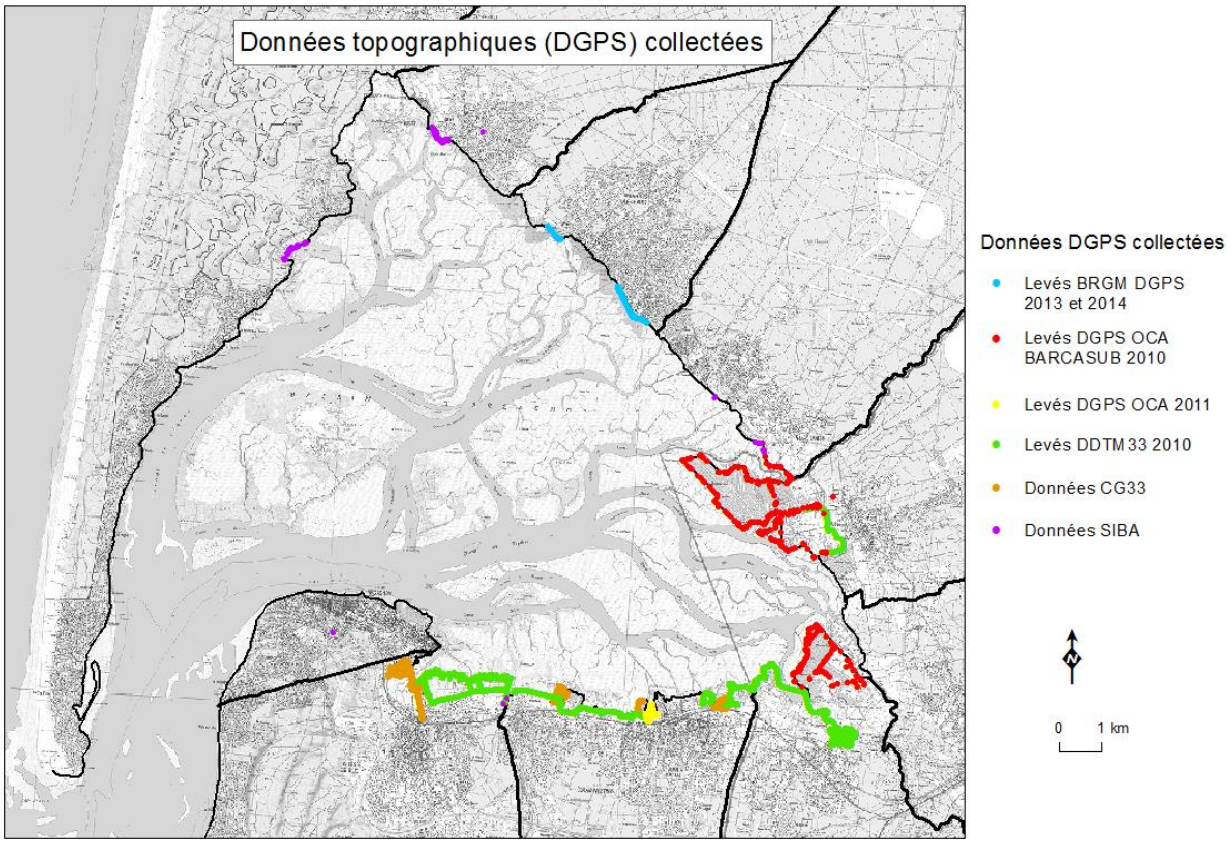


Figure 32 : Données DGPS disponibles.

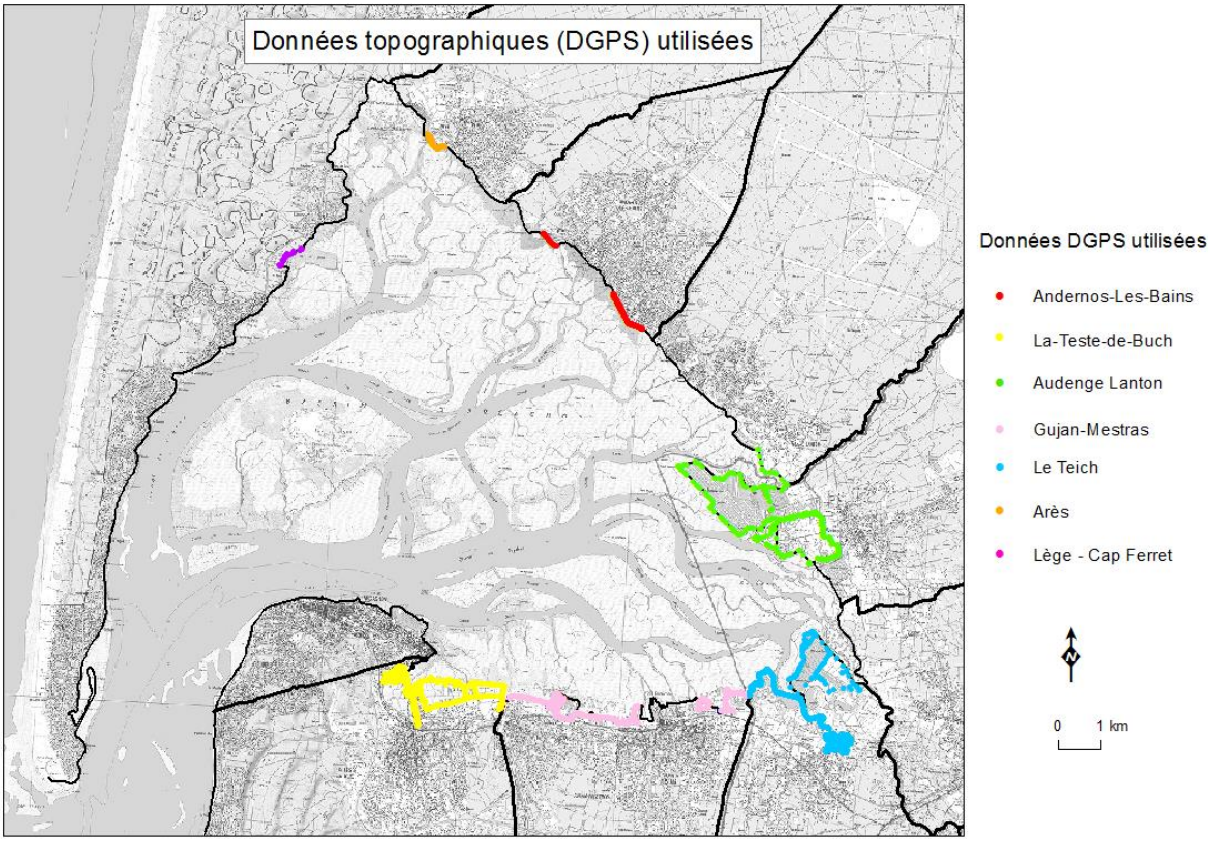


Figure 33 :Données DGPS utilisées pour construire le MNT.

4.2. DONNEES D'OCCUPATION DU SOL

Le GIP Littoral Aquitain, avec l'aide de la plateforme PIGMA (Plateforme de l'Information Géographique en Aquitaine), a produit un référentiel aquitain d'occupation du sol à grande échelle à partir des orthophotographies de 2009.

Il s'agit d'une description fine du territoire décrite selon une nomenclature emboitée à 4 niveaux et 56 postes basée sur la nomenclature européenne Corine Land Cover. La nomenclature hiérarchisée en 4 niveaux permet de couvrir l'ensemble du territoire, le premier niveau correspond aux grandes catégories d'occupation du sol repérables à l'échelle de la planète, le second niveau est utilisable pour les échelles de 1/500 000 et 1/1 000 000, le troisième niveau est utilisé pour une échelle au 1/100 000. Les codes d'occupation du sol sont construits par juxtaposition des numéros de postes de chaque niveau de la nomenclature. Exemple : 221 représente les Vignobles (2 : territoires agricoles, 2 : cultures permanentes, 1 : vignobles).

Cette nomenclature a été adaptée au territoire aquitain après analyse et remontée des besoins par les partenaires. Un quatrième niveau a donc été défini afin de numériser les zones artificialisées et naturelles avec un autre degré de précision :

- les zones naturelles, agricoles et forestières ont été produites afin de permettre une exploitation au 1/25 000 (Echelle de saisie : 1/8 000 - Unité Minimale de Collecte : 10 000m², soit 1 ha) ;

- les zones artificialisées ont fait l'objet d'une cartographie à grande échelle permettant une exploitation au 1/5 000 plus fine que le reste du territoire (Echelle de saisie : 1/2 000 - Unité Minimale de Collecte : 1 000m², soit 0,1 ha).

Dans le cadre de la présente étude, cette donnée a servi à créer une carte de rugosité du sol adaptée à la modélisation de la propagation de la submersion marine à terre (cf. paragraphe 6.4.3 et Figure 34).

La Figure 34 représente l'occupation du sol du Bassin d'Arcachon en 2009 selon le premier niveau de description et deux exemples selon le niveau 4 de description.

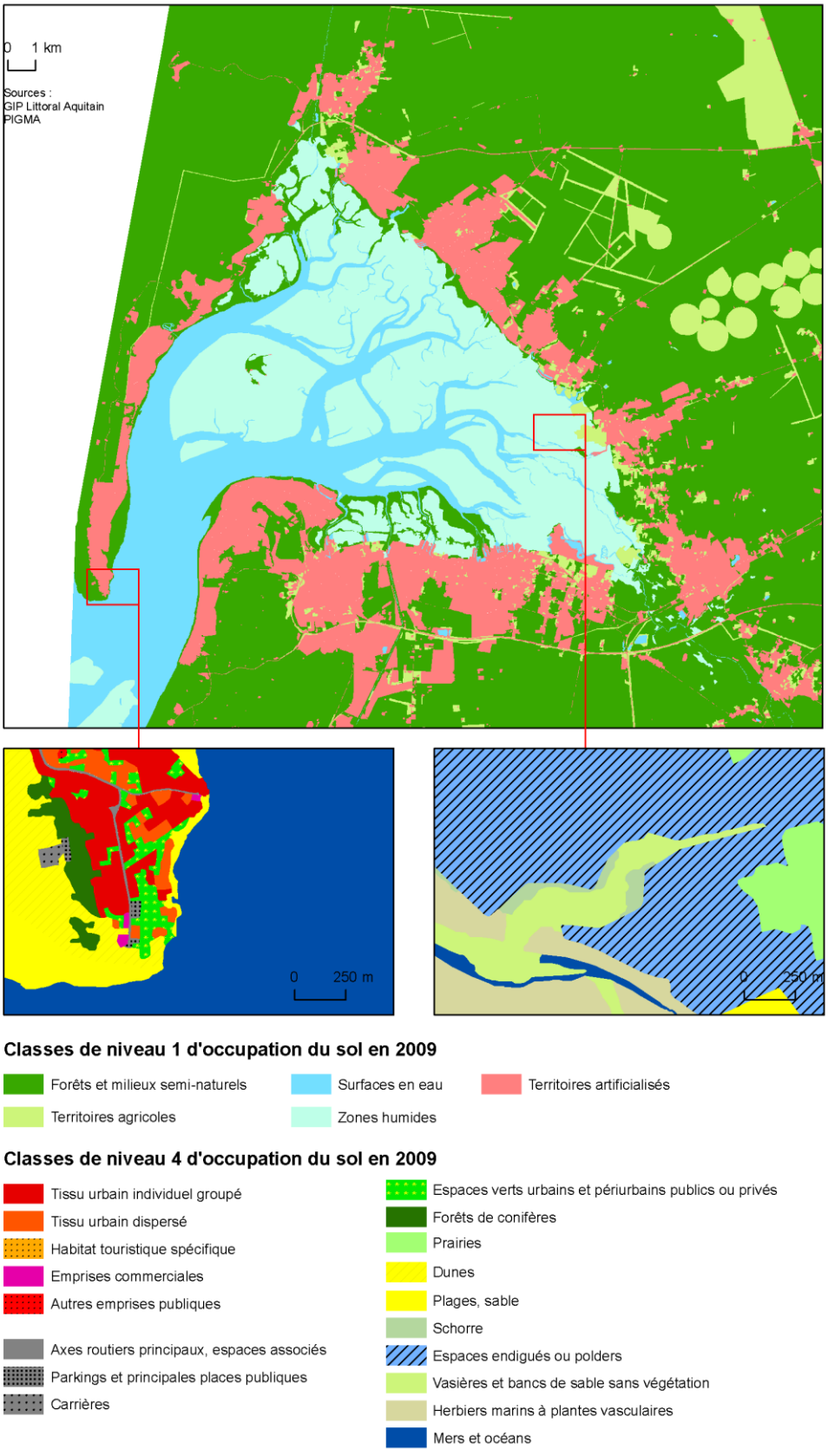


Figure 34 : Carte d'occupation du sol du Bassin d'Arcachon en 2009.

4.3. IDENTIFICATION DES STRUCTURES DE PROTECTION

4.3.1. Types de structures de protection prises en compte

Conformément aux consignes ministérielles, les structures de protection doivent être prises en compte pour l'élaboration des PPRL au regard du danger qu'elles génèrent en cas de défaillance et en considérant la protection qu'elles peuvent réellement offrir si leur état et leur conception sont adaptés à l'évènement de référence.

Différents types de protection côtières existent. Pour la caractérisation de l'aléa submersion marine, seules les structures ayant un rôle et une vocation de protection contre les phénomènes de submersion marine sont prises en compte. Sur le Bassin d'Arcachon, les structures concernées sont les suivantes :

- les digues côtières : *« ouvrages généralement longitudinaux faisant obstacle à l'écoulement. Ils sont attachés au rivage par au moins une extrémité et possèdent deux talus visibles … »* (CETMEF, 2011). Les digues sont donc des ouvrages surélevés par rapport au terrain naturel qui sont les plus fréquents sur le Bassin d'Arcachon (Prés salés, polders, etc., Figure 35). Dans certains cas, plusieurs rangs de digues composent la structure de protection. Chacun des rangs est donc considéré selon les mêmes modalités.

- les couronnements qui terminent les perrés : *« permet par exemple d'éviter les projections de paquets de mer en arrière »* (CETMEF, 2011). Sur le Bassin d'Arcachon, le terme de muret est employé notamment à Andernos-Les-Bains pour ce type de structure qui rehausse les perrés (Figure 36).

A noter que les **perrés** (Figure 37) sont des ouvrages longitudinaux et non surélevés par rapport au terrain naturel, dont le rôle est la fixation du trait de côte et la protection contre l'érosion marine, de même que les enrochements (longitudinaux, Figure 38) et les épis (perpendiculaires au trait de côte, Figure 39). **Ils n'ont donc pas été considérés pour la caractérisation de l'aléa submersion marine.**

- les cordons naturels : la configuration géomorphologique des cordons naturels (de sable dans le cas du Bassin d'Arcachon, Figure 40) évolue fortement à l'échelle annuelle voire saisonnière. De ce fait, il est indispensable d'envisager les conséquences de leur disparition partielle ou totale (brèche ou ruine) sur les entrées d'eau lors d'un évènement de tempête. De ce fait, les cordons naturels sont traités selon les mêmes modalités que les digues et couronnements.

Figure 35 : Exemples de digues, structures de protection contre la submersion marine, sur la commune de La-Teste-de-Buch à gauche et au centre et sur la commune d'Audenge à droite, ©Observatoire de la Côte Aquitaine.

Figure 36 : Exemple de couronnement ou muret rehaussant un perré sur la commune d'Andernos-Les-Bains, ©Observatoire de la Côte Aquitaine.

Figure 37 : Exemples de perrés, structure de protection contre l'érosion marine, au Pyla-sur-Mer à gauche (commune La-Teste-de-Buch) et à l'Herbe à droite (commune de Lège-Cap Ferret), ©Observatoire de la Côte Aquitaine.

Figure 38 : Exemples d'enrochements, structure de protection contre l'érosion marine (commune de Lège-Cap Ferret, ©Observatoire de la Côte Aquitaine).

Figure 39 : Exemple d'épis à l'Herbe (commune de Lège-Cap Ferret, ©Observatoire de la Côte Aquitaine).

Figure 40 : Exemples de cordons naturels, ici dunaires, à la Pointe à gauche, au Mimbeau à droite (commune de Lège-Cap Ferret, ©Observatoire de la Côte Aquitaine).

4.3.2. Identification des structures de protection contre la submersion marine sur le Bassin d'Arcachon

L'identification de ces structures de protection contre la submersion marine sur le Bassin d'Arcachon a fait l'objet d'une concertation et de visites de terrain entre le SIBA et la DDTM puis avec le BRGM. Ainsi, certaines structures ont été sélectionnées pour faire l'objet de scénario de défaillance. Les critères pris en compte pour cela sont, conformément aux consignes ministérielles, les suivants :

- existence d'un propriétaire et/ou gestionnaire identifiés ;
- disponibilité d'éléments techniques (état, vocation et comportement de l'ouvrage, analyse fonctionnelle interne et externe), existence d'Etude de danger ;
- connaissance historique de la structure, et le cas échéant, témoignages de défaillances passées.

Les structures de protection retenues sur le Bassin d'Arcachon sont localisées sur la Figure 41 : digues, murets et cordons dunaires. Leurs caractéristiques sont ensuite détaillées par commune dans l'Annexe 4.

Il a été considéré que la trop grande complexité de la configuration spatiale des polders du Bassin (Certes, Graveyron et ceux du delta de L'Eyre) qui présentent un grand nombre de rangs de digues parallèles et perpendiculaires et plusieurs écluses, ne permettaient pas une prise en compte réaliste avec des scénarios de défaillance, sur le plan technique (application de

modèle numérique) mais aussi pour le choix des hypothèses. Ils ont donc été considérés comme éléments topographiques et par conséquent invariants pendant les épisodes de submersion.

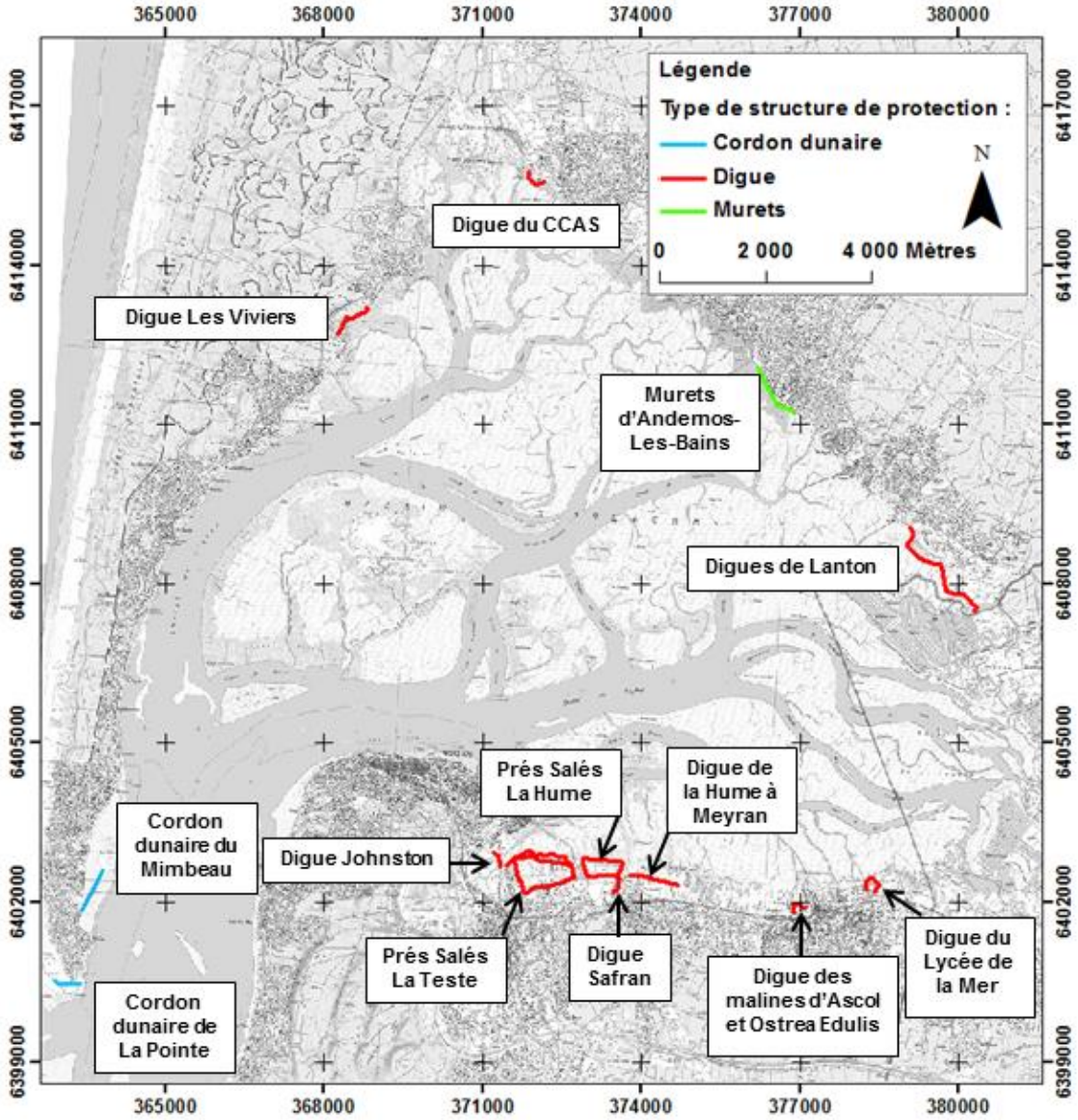


Figure 41 : Localisation des structures de protection côtières prises en compte dans la présente étude.

4.4. CONNEXIONS HYDRAULIQUES

Les dispositifs ou connexions hydrauliques qui permettent le stockage, le drainage ou l'évacuation d'eau peuvent avoir un impact considérable sur le phénomène de submersion marine. Ils sont donc également pris en compte pour la caractérisation de l'aléa. Il s'agit par exemple d'écluses, de fossés, de clapet anti-retour, de pont cadre, barbacanes, etc. (Figure 42 et Figure 43).

Figure 42 : Exemple de buse avec clapet anti-retour à gauche, exemple de fossé à droite.

Figure 43 : Exemple de Pont cadre à gauche,exemple d'écluse à droite.

De même que pour les structures de protection côtières, la prise en compte dans cette étude des connexions hydrauliques a fait l'objet d'une concertation entre le SIBA, la DDTM et le BRGM. La base de données du SIBA sur les connexions hydrauliques a été utilisée afin de sélectionner les plus « impactantes » sur les critères suivants également présentés Figure 44 :

- Les écluses sont considérées ouvertes pour le scénario de ruine et de défaillances alors qu'elles sont considérées fermées pour le scénario des structures de protection fonctionnelles.
- Certains ouvrages (ponts cadres, fossés, etc.) sont considérés ouverts dans les 2 sens quel que soit le scénario.
- Pour les buses avec un clapet anti-retour, l'écoulement se fait de la terre vers la mer.
- Les ouvrages non pris en compte dans la modélisation sont essentiellement des buses avec ou sans clapet anti-retour jugées sans influence sur le phénomène de submersion marine et ils ne sont donc pas pris en compte dans la présente étude.

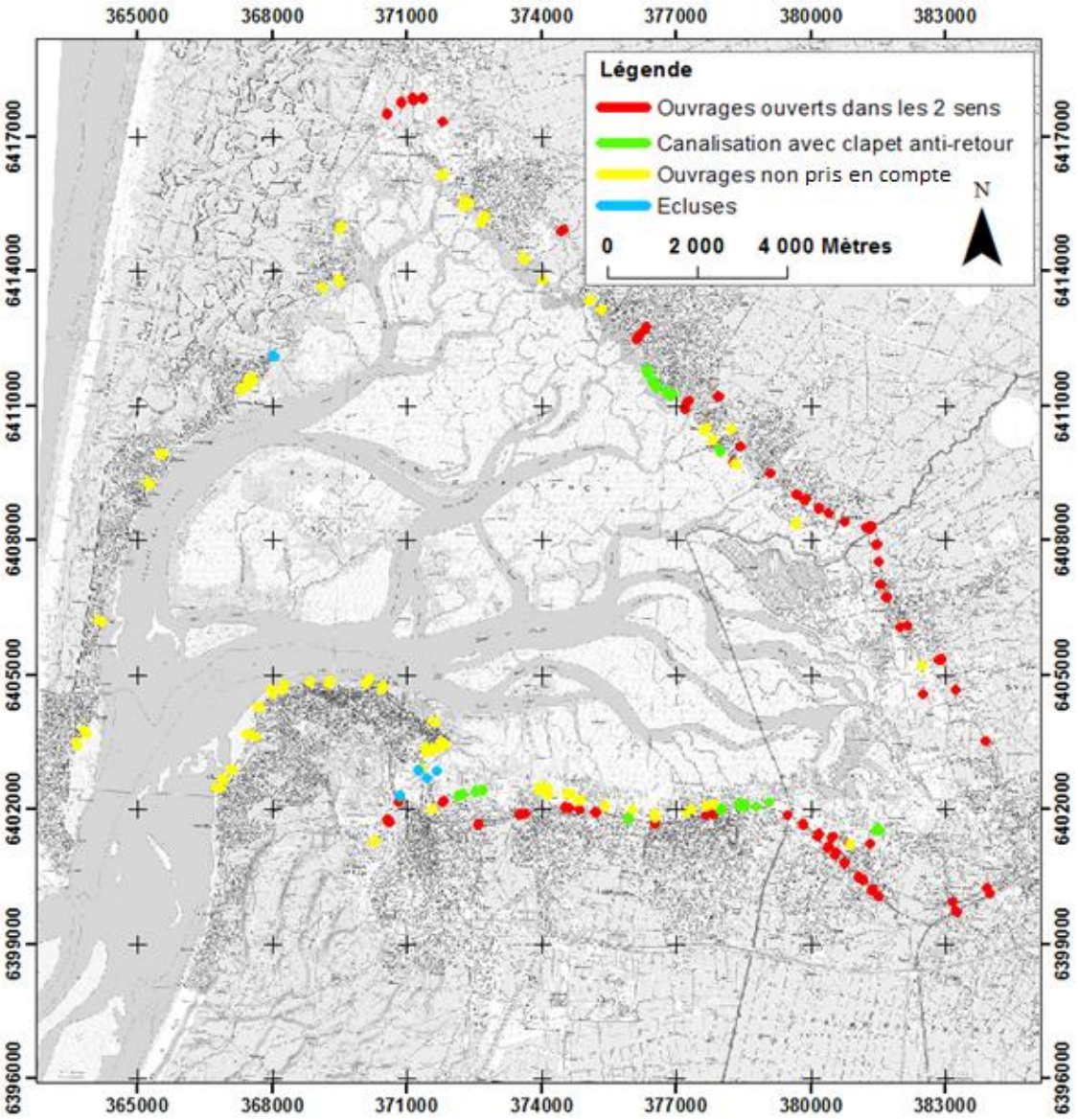


Figure 44 : Localisation des différents types de connexions hydrauliques.

4.5. REMBLAIS

Dans la première phase de l'étude PPRL, certains éléments topographiques tels que les remblais (routes et voie ferrée) ont été considérés « perméables » car des connexions hydrauliques ont été identifiées (cf. Rapport BRGM/RP-62187-FR). Ces remblais, sont présentés pour rappel et de manière non exhaustive sur les Figure 45, Figure 46, Figure 47 et Figure 48.

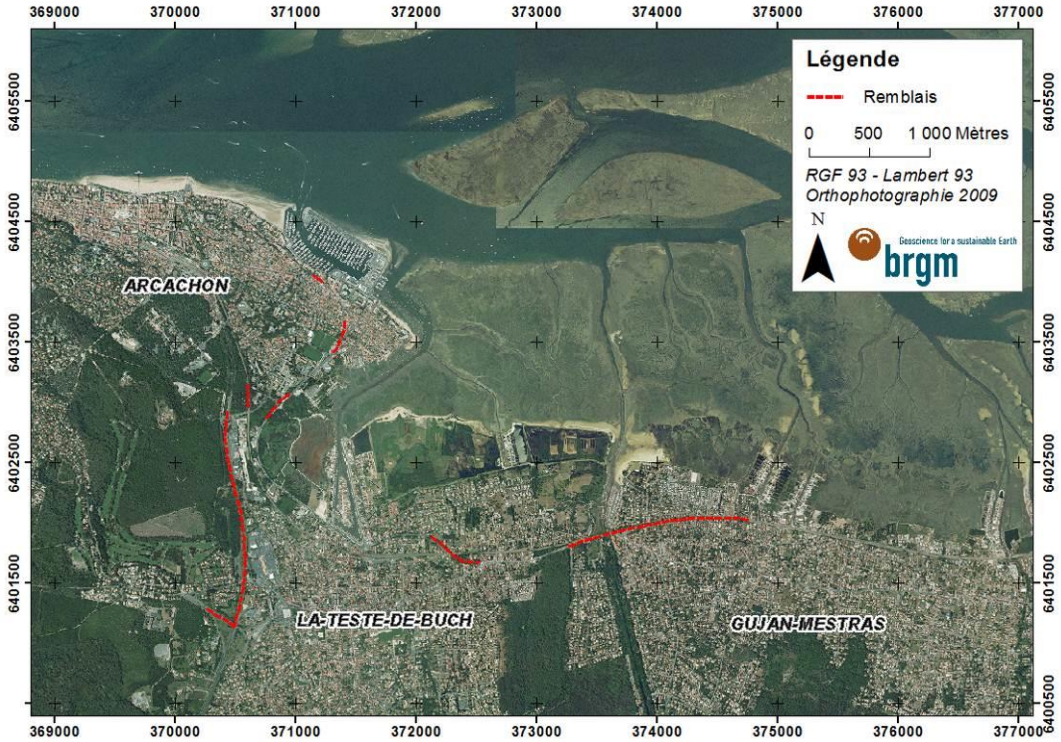


Figure 45 : Remblais présentant des connexions hydrauliques sur les secteurs de l'Aiguillon à Arcachon, de la zone commerciale de La-Teste-de-Buch, de la Hume (commune de Gujan-Mestras).

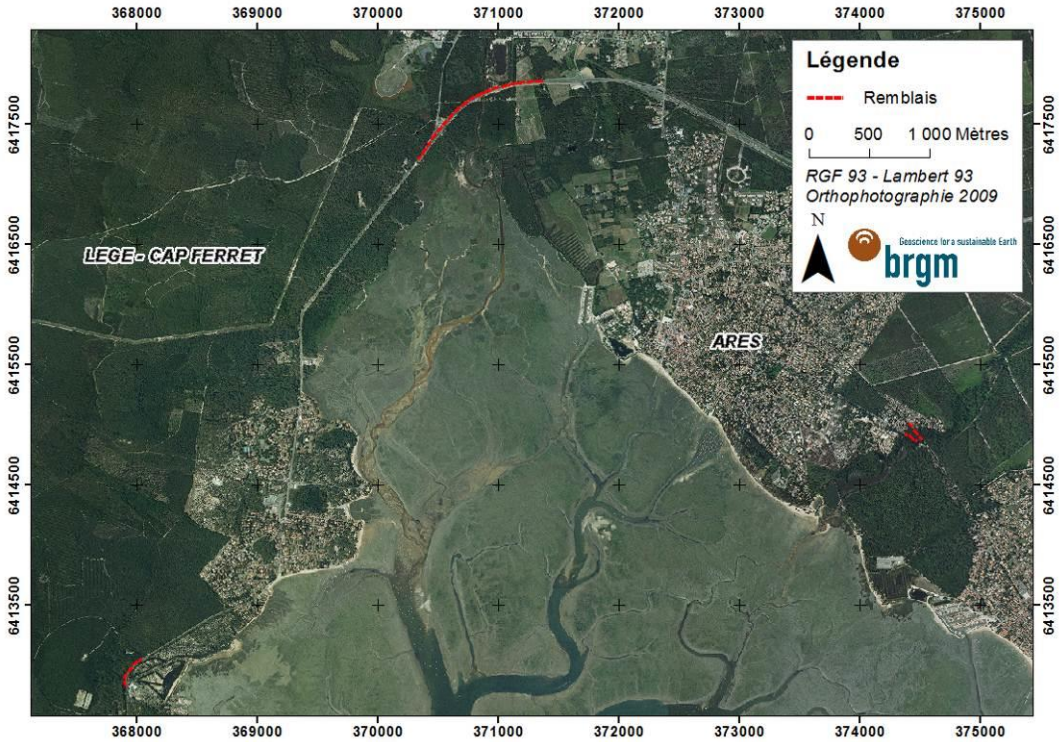


Figure 46 : Remblais présentant des connexions hydrauliques sur le secteur du Canal des Etangs et de l'Anse du Sangla (commune de Lège-Cap-Ferret).

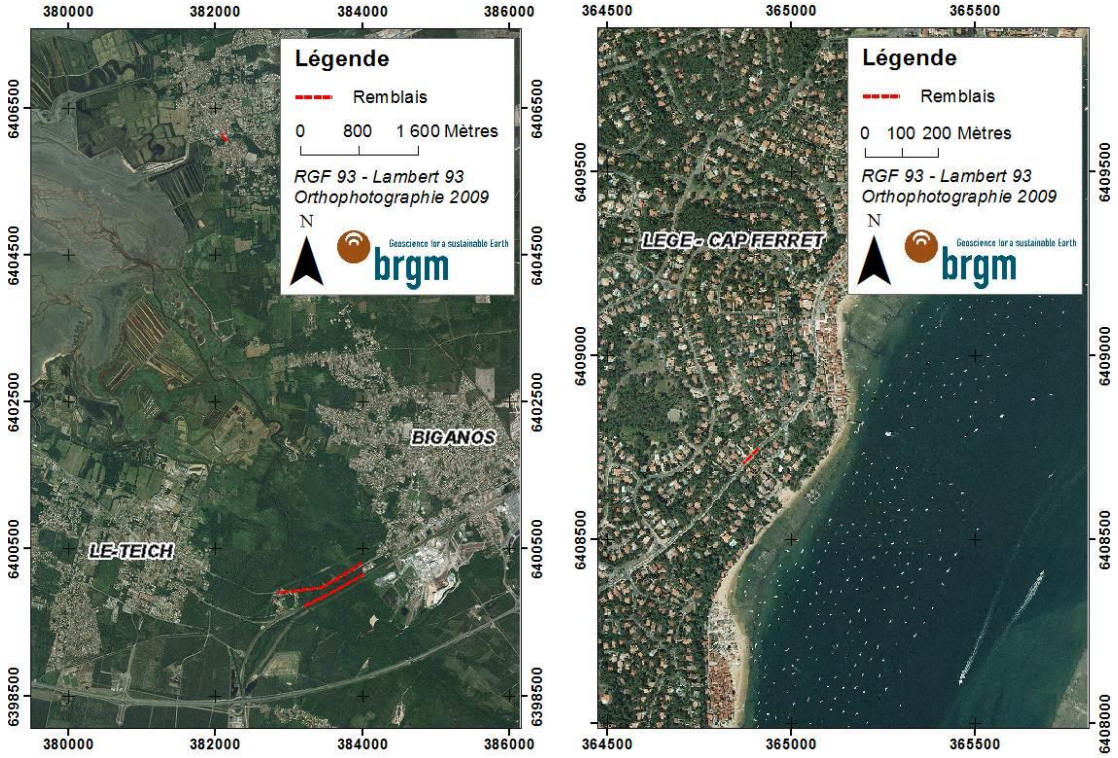


Figure 47 : Remblais présentant des connexions hydrauliques.
<u>A gauche :</u> entre les communes du Teich et de Biganos ; <u>A droite :</u> à l'Herbe sur la commune de Lège-Cap-Ferret.

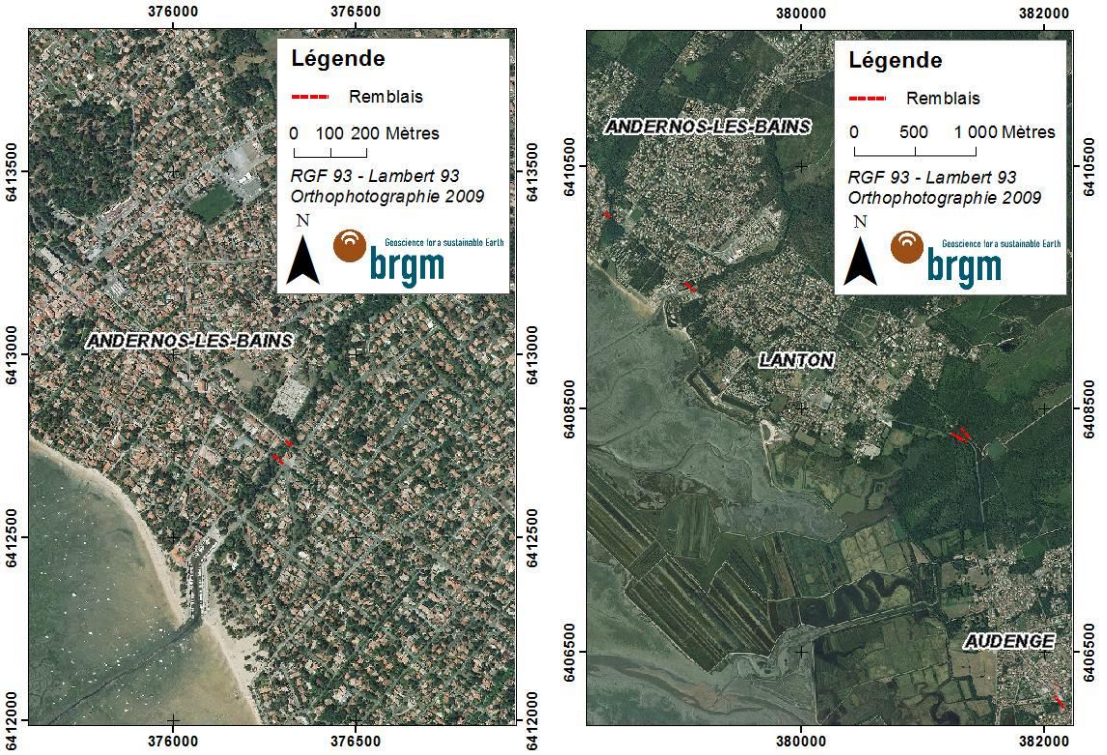


Figure 48 : Remblais présentant des connexions hydrauliques.
A gauche : sur la commune d'Andernos-Les-Bains ; A droite : sur les communes d'Andernos-Les-Bains, Audenge et Lanton.

5. Scénarios étudiés : prise en compte des structures de protection

Pour caractériser l'aléa submersion marine, le guide méthodologique (MEDDE, mai 2014) prévoit la réalisation de plusieurs scénarios basés sur différentes hypothèses de prise en compte des structures de protection côtière (ruine généralisée ou défaillances ponctuelles) afin de définir *in fine* le scénario de référence. A l'échelle du bassin d'étude de l'aléa, le scénario de référence peut donc contenir différentes hypothèses concernant le comportement des structures de protection. Ce chapitre présente donc les différents scénarios simulés : ceux retenus pour le scénario de référence et ceux fournis à titre informatif. Les modalités techniques de réalisation de ces scénarios sont présentées dans le chapitre 6.4.

5.1. SCENARIO DE RUINE GENERALISEE DES STRUCTURES DE PROTECTION COTIERES

Les ruines des structures de protection côtière (digues et cordon dunaire) ont été appliquées aux structures considérées non résistantes à l'évènement naturel de référence ou bien pouvant faire l'objet de surverses de plus de 20 cm.

Techniquement, les ruines sont réalisées par modification du MNT, i-e de la topographie de l'ouvrage. Cette méthode est présentée en détail dans le paragraphe 6.4.2. Les pieds d'ouvrages (ou de dune) côté terre et côté mer ont été identifiés et la partie de l'ouvrage (ou de la dune) située au-dessus du terrain naturel a ensuite été arasée. Cette modification du MNT intervient dès le début de la simulation numérique, c'est-à-dire que la ruine est considérée existante avant l'évènement.

Dans ce scénario, les connexions hydrauliques sont toutes considérées ouvertes.

Cette étape a fait l'objet d'échanges et d'une validation par le SIBA et la DDTM de la Gironde.

5.2. SCENARIO DES STRUCTURES DE PROTECTION FONCTIONNELLES

Pour ce scénario, toutes les structures de protection contre la submersion marine ainsi que les connexions hydrauliques sont considérées fonctionnelles. Les écluses et les buses sont fermées et les clapets anti-retour sont fonctionnels.

Ce scénario est réalisé à titre informatif car conformément aux consignes ministérielles, même dans le cas d'un ouvrage considéré résistant à l'évènement naturel de référence (dans le cadre d'une étude de danger), une brèche de 50 m minimum doit être envisagée.

5.3. SCENARIO DE DEFAILLANCES PONCTUELLES DES STRUCTURES DE PROTECTION COTIERES

Ce scénario de défaillances ponctuelles des structures de protection contre la submersion marine contient des hypothèses de ruines de certaines structures (mises en œuvre selon les modalités présentées dans le paragraphe 6.4.2) et de brèches des autres structures. Les modalités techniques de reproduction des brèches basées sur l'utilisation de formules hydrauliques de seuil sont présentées dans le paragraphe 6.4.5.

Alors que les ruines sont appliquées dès le démarrage de la simulation numérique (considérées existantes avant l'évènement de référence), les brèches ne surviennent que lorsque le niveau marin au droit de l'ouvrage atteint un certain seuil qui correspond :

- soit au niveau de la pleine mer s'il y a surverse mais qu'elle n'est pas supérieure à 20 cm[16] comme c'est le cas sur de la commune d'Andernos-Les-Bains ;

- soit à 3,3 m/NGF car l'étude de danger des ouvrages de La-Teste-de-Buch a permis de définir un seuil à partir duquel la résistance de l'ouvrage n'est plus assurée.

Les structures de protection sont donc « bréchées » depuis leur sommet jusqu'au terrain naturel, sur une largeur de 100 m. La brèche est considérée se produire en 15 minutes.

5.4. CHOIX DU SCENARIO DE REFERENCE

Le scénario de référence se définit par l'évènement naturel de référence avec une hypothèse de prise en compte des structures de protection contre la submersion marine.

Dans le cadre des études PPRL, un ouvrage de type digue ne peut pas être considéré comme infaillible, une hypothèse de défaillance (ruine ou brèche) doit donc être retenue pour le scénario de référence. Ces hypothèses ont été déterminées sur la base :

- *« du caractère submersible du tronçon et sa capacité à résister à la surverse* ». Si la structure de protection est surversée de plus de 20 cm, elle fera systématiquement l'objet d'une ruine sur toute sa longueur. Sinon des brèches forfaitaires de 100 m pourront être appliquées ;

- *« du caractère franchissable par paquets de mer du tronçon et sa capacité à résister aux franchissements »* ;

- de *« la constatation de détériorations majeures de l'ouvrage ou d'une conception manifestement insuffisante pour résister à l'évènement naturel de référence »*.

La Figure 49 récapitule la démarche de détermination des scénarios de prise en compte des ouvrages.

[16] Pour rappel, s'il y a une surverse de plus de 20 cm, c'est une ruine du tronçon qui est appliquée.

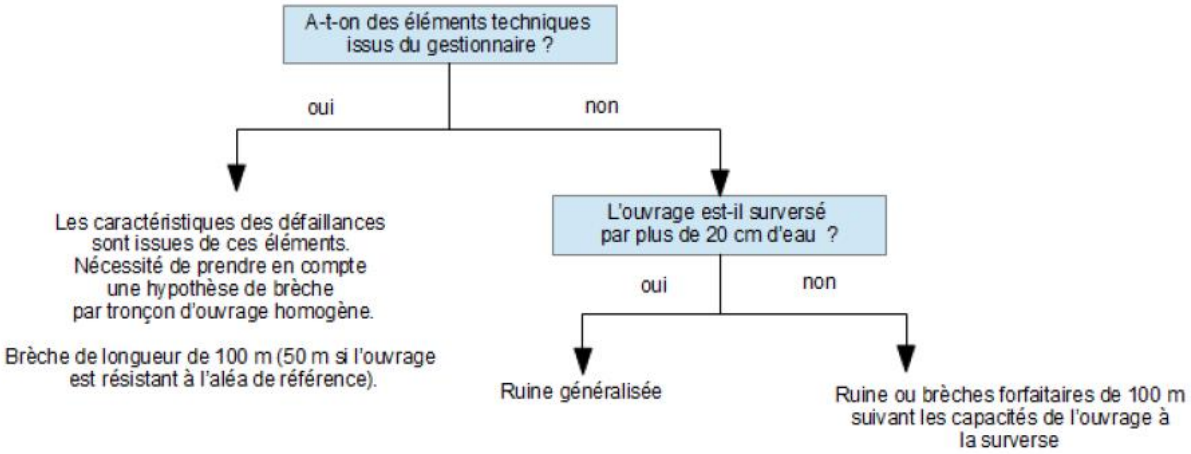


Figure 49 : Démarche simplifiée de prise en compte des ouvrages (guide méthodologique du MEDDE, mai 2014).

Le scénario de ruine de la structure de protection est donc retenu lorsqu'il y a une surverse de l'ouvrage de plus de 20 cm ou bien lorsqu'il n'y a aucun élément technique (issu d'étude de danger par exemple) témoignant de la résistance à l'évènement naturel de référence. **Les structures de protection pour lesquelles ce scénario de ruine a été retenu comme scénario de référence sont présentées sur la Figure 50 : il s'agit des digues identifiées sur les communes de Gujan-Mestras, Lanton, Arès et Lège-Cap Ferret, les murets de la commune d'Andernos-Les-Bains et le cordon dunaire du Mimbeau sur la commune de Lège-Cap Ferret.**

Sur la commune de La-Teste-de-Buch, la réalisation d'une étude de danger sur les digues des prés salés a permis à la DDTM de la Gironde, en concertation avec le SIBA et la commune, de **retenir un scénario d'hypothèse de défaillances contenant des brèches comme scénario de référence.** Seuls deux tronçons de digue surversés par plus de 20 cm font l'objet d'une ruine (Figure 50).

Le scénario de brèche a été retenu pour le cordon dunaire de la Pointe sur la commune de Lège-Cap Ferret car il est suffisamment large (> 100 m) et haut sur une grande partie du linéaire identifié. Les 2 brèches sont localisées au niveau des points faibles du cordon dunaire, c'est-à-dire au niveau des zones les moins larges et les moins hautes et au droit de 2 cuvettes adjacentes.

Les scénarios réalisés et retenus pour chaque structure de protection sont présentés en Annexe 4.

La carte de l'aléa du scénario de référence, c'est-à-dire l'aléa de référence, est présentée dans le dossier cartographique associé à ce présent rapport. De même, les cartes de vitesse d'écoulement et de hauteur d'eau pour le scénario de référence sont présentées dans le dossier cartographique.

Le scénario avec les structures de protection considérées fonctionnelles a été réalisé à titre informatif. Les cartes des résultats (aléa, vitesse d'écoulement et hauteur d'eau) sont fournies dans le dossier cartographique.

A noter, que deux scénarios supplémentaires ont été réalisés à titre informatif :

- un scénario de ruine généralisée des ouvrages de La-Teste-de-Buch. Les cartes (aléa, vitesse d'écoulement et hauteur d'eau) sont fournies dans le dossier cartographique associé à ce présent rapport ;

- un scénario de brèche au niveau des murets d'Andernos-Les-Bains, des digues de Lanton, du Lycée de la Mer à Gujan-Mestras et du cordon dunaire du Mimbeau. Les cartes d'aléa sont fournies dans le dossier cartographique associé à ce présent rapport.

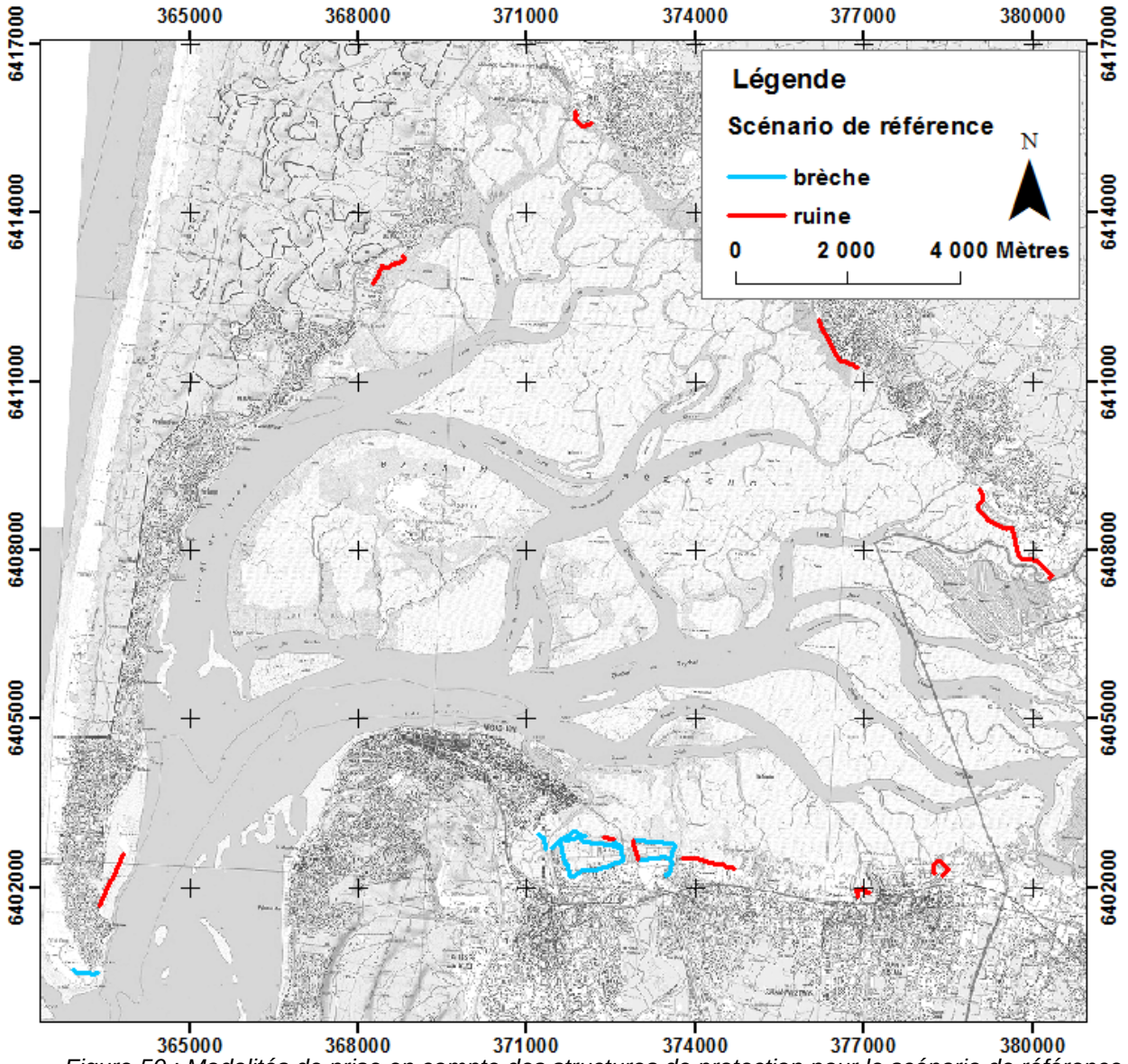


Figure 50 : Modalités de prise en compte des structures de protection pour le scénario de référence.

6. Propagation de la submersion marine - modélisation numérique

6.1. STRATEGIE DE MODELISATION

Une plateforme de modélisation reposant sur l'exploitation de 3 codes numériques de vagues et de niveaux d'eau-courants a été mise en place à différentes résolutions spatiales afin de représenter la **propagation de l'événement naturel** de référence depuis le large jusqu'à terre et simuler ainsi la dynamique de la submersion marine **par débordement** (principal type de submersion intervenant à l'intérieur du Bassin d'Arcachon) et **localement par franchissement de paquet de mer** (Figure 51).

Propagation de l'événement naturel de référence depuis le large jusqu'à l'intérieur du Bassin d'Arcachon :

Elle a été effectuée grâce au **chainage des modèles** de vagues **SWAN** et d'hydrodynamique **MARS-2DH** (Ifremer, Lazure et Dumas, 2007) à une résolution de 50 m à l'échelle du Bassin (R0, Figure 51). **Ce chainage MARS-2DH/SWAN** permet de calculer les niveaux d'eaux et les courants dans le Bassin en tenant compte des interactions vagues-niveaux-courants et intégrant les surcotes induites par le vent et le déferlement des vagues dans la zone des passes du Bassin (*wave setup*). Les résultats de cette modélisation servent ensuite à forcer les modèles de submersion par débordement et par franchissement de paquets de mer.

Modélisation de la submersion marine par débordement :

Elle est réalisée à la résolution spatiale de 12 m avec **MARS-2DH** (Figure 51, R1). Pour cela, le modèle hydrodynamique tient compte (Figure 52) :

- des obstacles à l'écoulement (digues, remblais, seuils topographiques) ;
- du frottement sur le fond et des différences d'occupation du sol (urbanisation plus ou moins dense, végétation, route, etc.) ;
- des connexions hydrauliques (buses, clapets anti-retour, écluses, pont cadre, fossé, etc.) et de leurs modalités de fonctionnement ;
- d'hypothèses de ruine généralisée et de défaillances ponctuelles (brèches) des structures de protection côtière.

Modélisation de la submersion par franchissement de paquets de mer :

Sur certains secteurs exposés aux franchissements de paquets de mer (quartier du Mauret à Andernos-Les-Bains), la plateforme de modélisation comprend également le calcul des volumes d'eau susceptibles de franchir le front de mer par « paquets » sous l'effet du clapot. Pour cela, le modèle vague à vague **SWASH** a été mis en œuvre à très fine résolution (<1 m, Figure 51). Pour forcer le modèle, les conditions de vagues et de niveaux d'eau sont issues du modèle chainé **MARS-2DH/SWAN** R0. Les volumes ainsi calculés avec SWASH sont ensuite introduits dans le modèle MARS-2DH à 12 m (emprise R1).

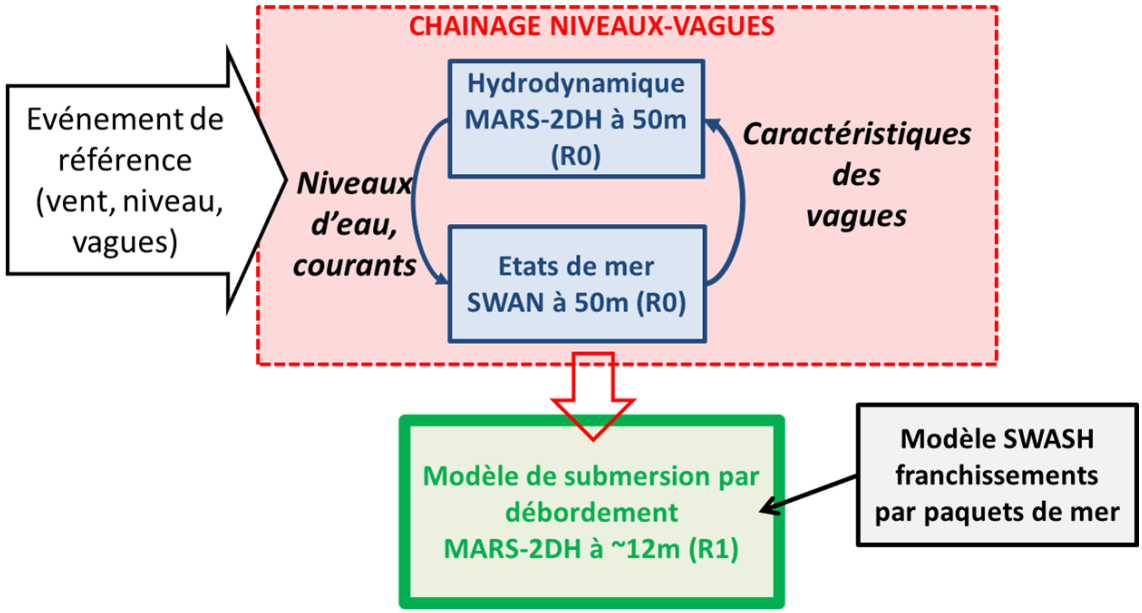


Figure 51 : Stratégie de modélisation

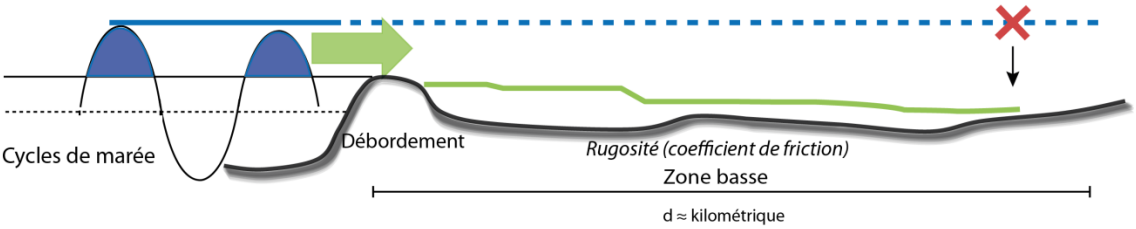


Figure 52 : Schéma de principe de la méthodologie employée pour la propagation de la submersion marine. Le niveau marin de référence (bleu continu) n'est pas simplement projeté sur la topographie (bleu pointillé) mais bien propagé suivant une dynamique de submersion (vert).

6.2. PRESENTATION DES LOGICIELS DE MODELISATION NUMERIQUE

- **MARS-2DH : modèle hydrodynamique de niveaux et courants**

Le code de calcul MARS (Lazure et Dumas, 2007) permet de calculer l'hydrodynamique (niveaux et courants) au niveau régional à partir de composantes de marée et de données de météorologie. Les processus représentés par le modèle sont uniquement liés aux ondes longues (marée et surcote atmosphérique), les ondes courtes (houle et clapot) ne sont pas représentées. Le modèle est utilisé dans sa version 2DH.

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

- de conditions aux limites imposées au bord du domaine de calcul (frontières). Ces conditions aux limites peuvent contenir les effets de la marée et de la surcote atmosphérique ;

- de conditions de forçages météorologiques (vent et pression) appliquées en chaque nœud du domaine du modèle.

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

- la gestion des bancs découvrant (recouvrement/découvrement du sol par l'eau) ;
- du frottement spatialisé sur le fond (sur l'ensemble du bassin dont le sol des terrains inondés).

Par ailleurs, le BRGM a développé dans MARS-2DH des routines, spécifiquement adaptées à la propagation des submersions pour l'élaboration des PPRL, capables de :

- simuler les écoulements torrentiels faisant suite à des ruptures de digue 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.

Les différentes paramétrisations utilisées lors des simulations de la propagation des submersions dans les zones inondables sont présentées en Annexe 5.

- **SWAN : modèle de propagation de vagues**

Le modèle SWAN (Simulating WAves Nearshore), développé à l'Université de Technologie de Delft (Pays-Bas), permet de calculer les paramètres décrivant la houle au niveau des zones côtières, des lacs et des estuaires. Une description détaillée du modèle est faite dans Booij et al. (2004). Les détails sur la paramétrisation du modèle sont présentés en Annexe 5.

SWAN modélise les processus de **propagation** suivants :

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

SWAN modélise également les processus de **génération et de dissipation** :

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

- Dissipation par frottement au fond.

- **SWASH : modèle de calcul des débits franchissant les ouvrages de protection**

SWASH (Simulating WAves till SHore) est un code vague-à-vague développé par l'Université Technologique de Delft aux Pays-Bas (Zijlema et al. 2011). Ce code permet de simuler la propagation des vagues en domaine côtier ainsi que leur comportement en zone de déferlement, avant et après déferlement (wave setup et runup). Des informations complémentaires sont présentées en Annexe 5. Le modèle tient compte des phénomènes de :

- réfraction,

- diffraction,

- réflexion,

- interaction (vague-vague, vague-courant)

- frottement au fond,

- gonflement,

- déferlement,

- génération des courants induits par les vagues,

- le traitement de l'interface sec-mouillé (en zone de swash).

Son utilisation ici est uniquement consacrée à la simulation des franchissements par paquet de mer et au calcul des volumes franchissants qui en découlent. Ce choix se base sur des études récentes (Suzuki et al., 2011 ; Suzuki et al., 2012) qui montrent que dans un cas d'étude proche de la configuration du littoral du Bassin d'Arcachon (estran/muret), les formules EUROTOP ne sont pas applicables car elles surestiment les volumes franchissants. En revanche, le modèle SWASH a été sélectionné car il est performant pour reproduire les caractéristiques des vagues et les volumes d'eau franchissants.

6.3. CONFIGURATION DES MODELES NUMERIQUES

6.3.1. Emprise, bathymétrie et résolution

Les simulations des niveaux d'eau et des courants ont été réalisées grâce à des grilles de calculs emboitées. La grille principale de calcul de résolution de l'ordre de 50 m (R0) a été implantée pour le modèle hydrodynamique MARS-2DH et le modèle de vagues SWAN afin d'effectuer les calculs en configuration chainée de ces 2 modèles. Cette grille R0 couvrant l'ensemble du Bassin d'Arcachon depuis le large est utilisée pour fournir les conditions aux limites de 3 plus petites grilles couvrant la totalité du pourtour du Bassin (résolution de l'ordre de 12 m), R1 Ouest, R1 Sud et R1 Nord pour simuler la submersion par débordement avec le modèle MARS-2DH.

La bathymétrie de la première emprise (R0) est constituée à la fois d'un ré-échantillonnage à 50 m d'une bathymétrie existante à 235 m (réalisée lors de la phase 1 de l'étude PPRL), des levés bathymétriques ainsi que des données LIDAR (2005) existants pour affiner la

représentation des principaux chenaux dans le Bassin. Cette résolution à 50 m permet de bien représenter les écoulements dans les différents chenaux du Bassin d'Arcachon.

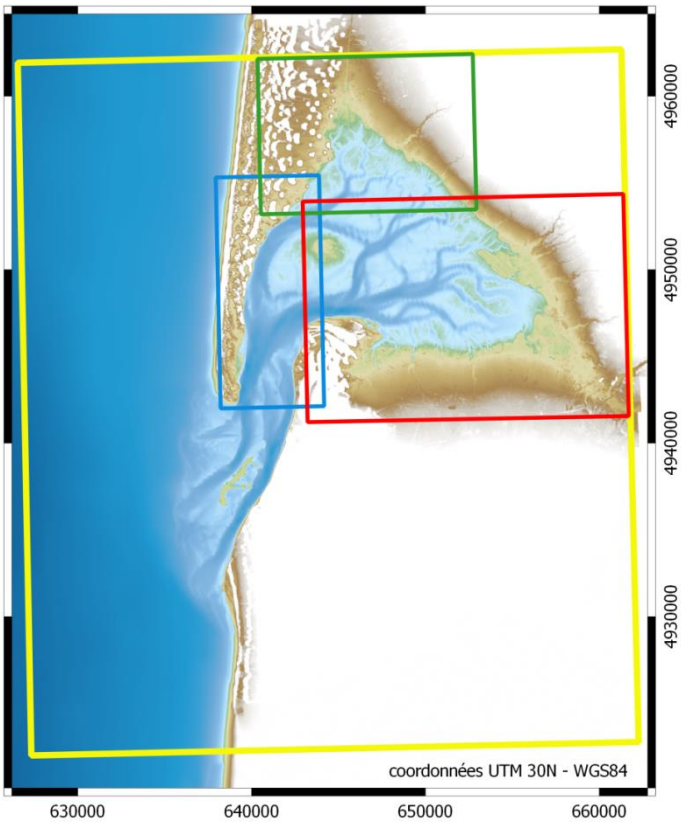


Figure 53 : Emprises géographiques des grilles de calculs sur le Bassin d'Arcachon. Grille R0 (résolution 50 m en jaune) et les 3 grilles R1 (résolution 12 m) des secteurs Sud (en rouge), Nord (en vert) et Ouest (en bleu) du Bassin.

6.3.2. Forçages et conditions aux limites marines

Les conditions de forçages des modèles correspondent aux caractéristiques de l'évènement naturel de référence au large présentées dans le rapport BRGM/RP-61408-FR et dans le chapitre 1. Elles sont rappelées ici.

Conditions aux limites en niveau d'eau

Les variations du niveau d'eau au cours du temps sont imposées sur les limites marines Sud, Ouest et Nord du modèle hydrodynamique MARS. Le niveau d'eau imposé aux frontières est une série temporelle de 3 cycles de marée de vive eau (coefficient 95) issue du marégraphe d'Arcachon-Eyrac. Le premier cycle sert à l'initiation du modèle (mise en eau du Bassin) et les 2 autres au calcul de la submersion (comme indiqué dans le guide PPRL 2014).

Ce marégramme (Figure 54) est normalisé et multiplié par le niveau de référence (SWL, exprimé en référence au niveau moyen de la mer) correspondant à la combinaison centennale retenue de 2,56 m/NM au large (2,41 m/NM + 0,15 m de marge de sécurité).

Chaque simulation est effectuée sur 3 cycles de marée. Le niveau maximum est atteint lors de la 2ème pleine-mer.

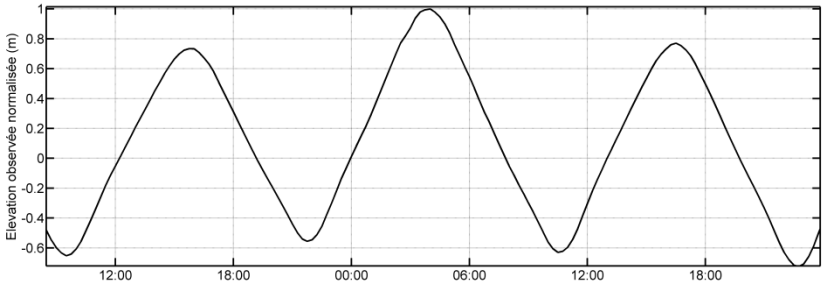


Figure 54 : Marégramme type utilisé pour l'élaboration des condtions aux limites du modèle MARS2DH.

Conditions aux limites en vagues

Les caractéristiques de vagues (hauteur significative Hs, direction Dp, et période pic Tp) issues de l'évènement de référence retenu sont imposées aux limites marines (partie océanique) du modèle de vagues SWAN de manière stationnaire et uniforme. Les conditions du scénario de référence sont Hs = 7 m, Tp = 15,6 s, Dp = 270 °N

Forçages en vent et paramétrisation de la tension du vent de surface

Les conditions de vents en vitesse et direction sont stationnaires et homogènes et les valeurs associées sont issues du scénario de référence soit une vitesse de 13,2 m/s pour une direction de provenance de 270° N (scénario 7).

Des tests de sensibilité sur l'influence des vitesses et directions du vent sur l'extension de l'inondation ont été réalisés et montrent, quelques soient les scénarios, un impact relativement faible sur la modification des hauteurs d'eau et des surfaces inondées (Annexe 3).

6.3.3. Prise en compte du changement climatique dans le niveau marin

La prise en compte de l'augmentation du niveau de la mer est effectuée sur tout le domaine de calcul en ajoutant 20 cm (respectivement 60 cm) d'élévation du niveau moyen de la mer pour l'aléa de référence (respectivement pour l'aléa à échéance 100 ans).

6.4. REPRESENTATION DU TERRAIN

6.4.1. Modèles Numériques de Terrain à 12 m et retouches des éléments structurants

Des MNTs[17] de résolution spatiale de 12 m ont été réalisés à partir des données topographiques LIDAR haute résolution complétées par des données DGPS (paragraphe 4.1). Cette taille de maille permet d'avoir le degré de résolution adapté pour procéder à la modélisation dynamique de la submersion à l'échelle de l'ensemble du Bassin d'Arcachon tout en conservant un niveau d'informations topographiques précis. Cette résolution permet également une restitution cartographique des résultats à l'échelle 1/10 000. La précision verticale des MNTs est relative à celle des données utilisées dont la qualité est présentée dans le paragraphe 4.1.

[17] Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) est une représentation de la topographie et de la bathymétrie sous une forme adaptée à son utilisation par un calculateur numérique.

Au sein des MNT, les infrastructures de type digues, routes, quais, remblais routiers, levées ou autres éléments structurants de la topographie conditionnent le comportement hydraulique des écoulements lors des submersions. En effet, lorsque le niveau de l'inondation dépasse la cote altimétrique de ces éléments topographiques, le modèle doit reproduire fidèlement les débordements. Il convient donc de représenter le plus précisément possible leurs altimétries. Ainsi, compte tenu de la taille de la maille, il convient de procéder localement à des retouches pour prendre en compte spécifiquement ces éléments si le MNT à 12 m les « efface » partiellement.

Retouche des éléments structurants

Avec une maille régulière de 12 m, le MNT a tendance à sous-estimer l'altitude des éléments structurants (Figure 55, Figure 56). La méthode utilisée pour corriger les valeurs des sommets consiste en deux étapes (Figure 57) :

Etape 1 : correction du trait de côte à partir des données LIDAR. Les éléments identifiés sont parcourus et comparés à la valeur maximale des données LIDAR (MNT de résolution 2 m) dans un carré de 12x12 m. Si la valeur du MNT 12 m est inférieure à celle du MNT LIDAR 2 m, celle-ci prend la valeur du MNT LIDAR 2 m.

Etape 2 : intégration de données topographiques les plus précises (levés D-GPS lorsqu'elles existent Figure 32 ou bien données LIDAR 2 m) au sommet des ouvrages.

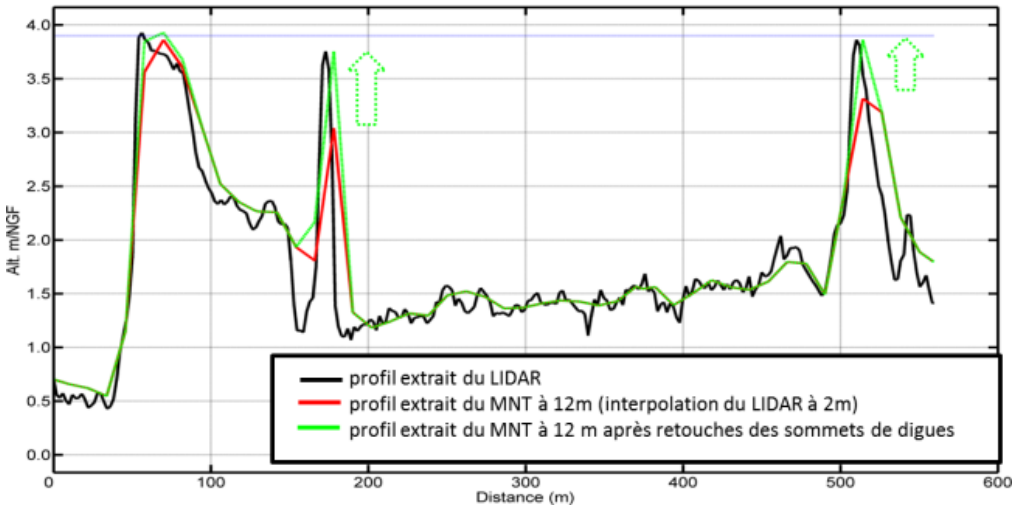


Figure 55 : Illustration en coupe de la correction du modele numérique de terrain 12 m (ici exemple pour trois rangs de digues).

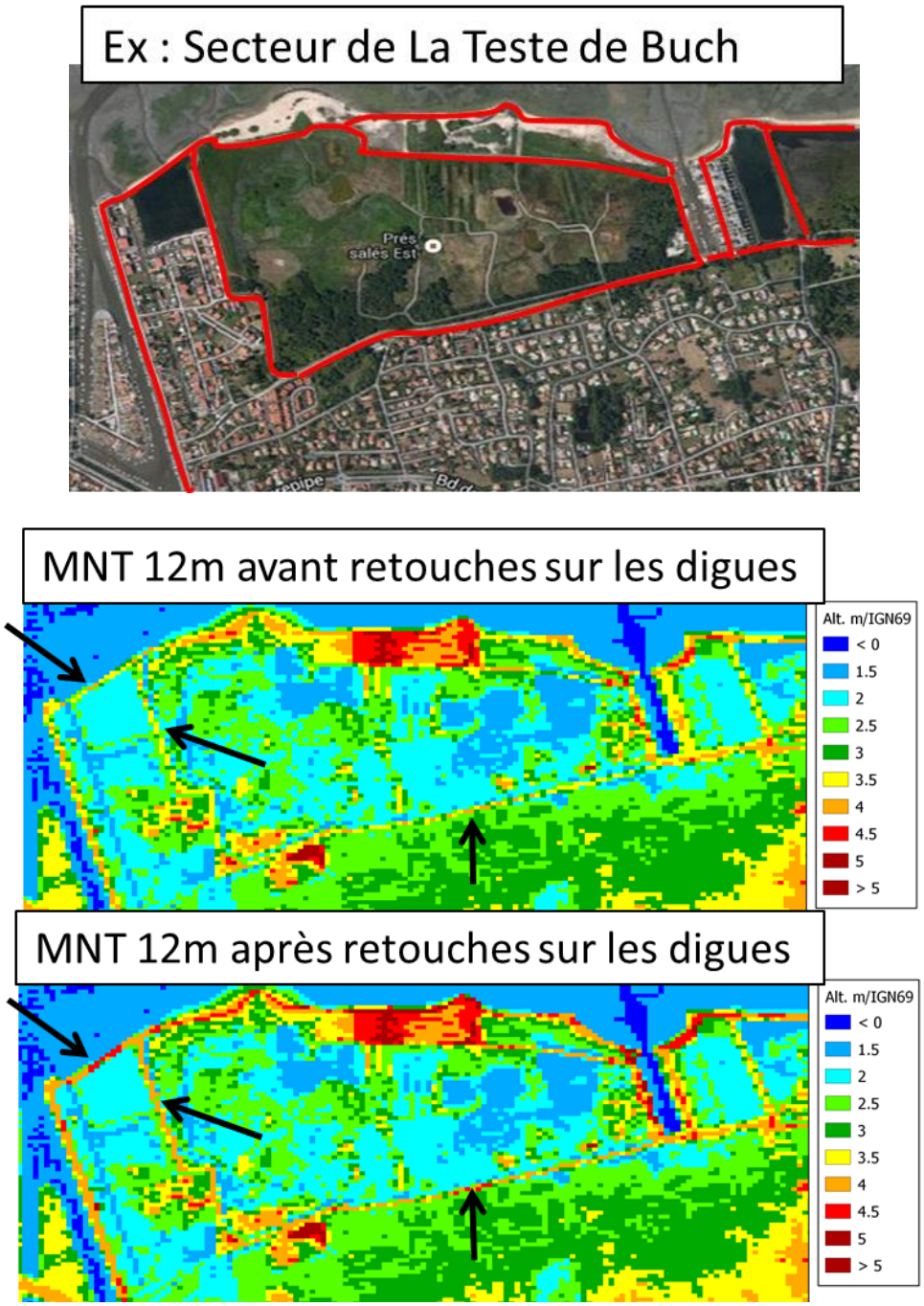


Figure 56 : Illustration en plan de la correction de l'altitude des ouvrages (lignes rouges) et des élements structurants à terre : chemin de fer (en vert), route remblayée (en jaune).

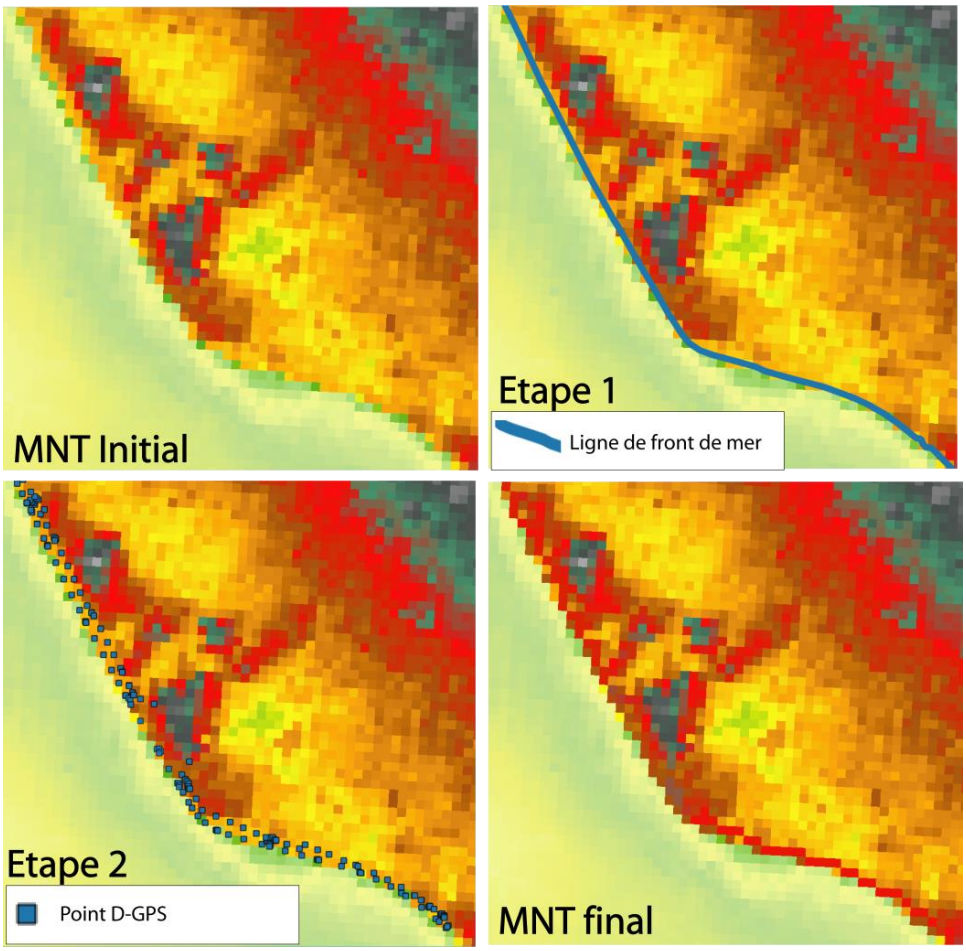


Figure 57 : Méthode de reconstruction des sommets des ouvrages de front de mer sur le littoral d'Andernos-les-Bains. Le relèvement des valeurs du MNT initial est réalisé en deux étapes.

6.4.2. Rectification des Modèles Numériques de Terrain pour la représentation des ruines des structures de protection côtière

En fonction des scénarios modélisés, un travail consistant à araser les ouvrages identifiés comme défaillants a été réalisé. L'arasement des digues a été réalisé de manière automatique via un algorithme de traitement et contrôlé visuellement après opération.

Arasement des ouvrages de front de mer

La méthode consiste à définir un pied d'ouvrage côté mer (PM) et son double coté terre (PT) selon un axe Nord-Sud ou Est-Ouest (Figure 58). Le point PT définit la cote altimétrique d'arasement et la localisation (ie : maille dans la grille de calcul) ou débute celui-ci. L'arasement s'effectue jusqu'à rencontrer le point PM. Dans le cas où la forme de l'ouvrage à araser est composée de plusieurs tronçons d'orientations différentes, plusieurs passages de l'algorithme sont nécessaires (Figure 59).

Pour tous les ouvrages ayant fait l'objet d'arasement, l'ensemble des points considérés comme « pieds d'ouvrage » et les résultats de la procédure d'arasement ont été contrôlés et validés par les services de la DDTM.

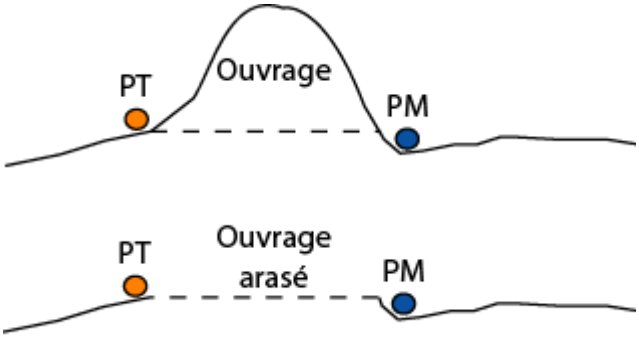


Figure 58 : Representation schématique en coupe de l'arasement d'un ouvrage.

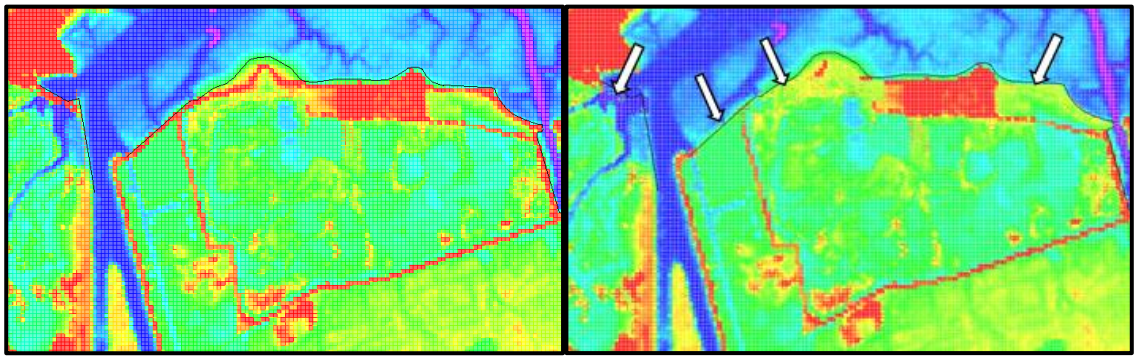


Figure 59 : Exemple en plan d'arasement des digues de premier rang à La-Teste-de-Buch.

Une carte de localisation des tronçons d'ouvrage concernés par l'arasement est présentée dans le paragraphe 5.4 (Figure 50) et les détails de chaque ouvrage en Annexe 4.

Arasement du cordon sableux du Mimbeau

L'arasement de la flèche du Mimbeau a été réalisé via une méthode SIG et un contrôle visuel des résultats. La méthode consiste à déterminer une cote altimétrique d'arasement et une surface délimitée par la limite de l'isocote du niveau d'arasement. Pour l'ensemble de la surface, les valeurs originales de la topographie sont remplacées par la valeur de la cote d'arasement.

La valeur de la cote altimétrique d'arasement a été déterminée en se basant sur la hauteur du terrain naturel de la plage en avant et en arrière de la flèche (côté mer et côté terre). Le terrain naturel étant légèrement plus haut à la racine de la flèche, la hauteur retenue est de 1,5 m/NGF sur une longueur d'environ 200 m, puis de 1m/NGF sur toute la longueur du cordon jusqu'au lobe (terminaison Nord) soit environ 900 m (Figure 60 et Annexe 4). Le lobe n'a pas été arasé car il est considéré comme suffisamment large pour ne pas subir de ruine généralisée.

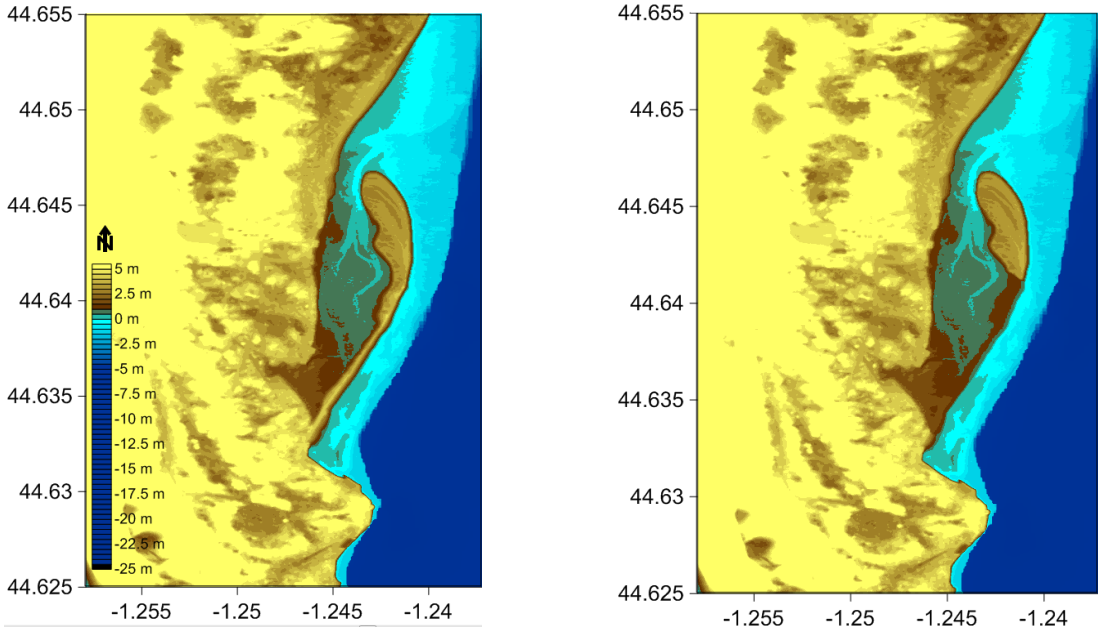


Figure 60 : Flèche du Mimbeau, sans retouche (à gauche), après arasement (à droite).

6.4.3. Rugosité et frottement sur le fond pour la propagation de la submersion

L'impact de l'occupation du sol sur les écoulements est habituellement représenté dans les modèles via un paramètre de frottement caractéristique de la rugosité de chaque type de sol (béton, pelouse, sable,...). La rugosité est généralement paramétrée en termes de coefficients de Manning ou de Strickler. Dans cette étude, une représentation spatialisée de la rugosité a été obtenue à partir d'une classification synthétique de l'occupation des sols issue des cartes d'occupation des sols (OCS, voir paragraphe 4.2) qui a été interprétée en termes de valeurs du **coefficient de Strickler**. Les valeurs utilisées sont celle préconisées par différentes sources et sont applicables pour les études en domaines marins et côtiers (Bunya *et al.* 2010 ; Brown et al, 2007, Goutx et Ladreyt 2001).

Dans un premier temps, un regroupement des typologies brutes OCS en une typologie adaptée à la modélisation de la submersion a été effectué (Figure 61, Tableau 5). La cartographie résultante de la typologie retenue d'occupation du sol pour la modélisation de la submersion pour l'ensemble du périmètre d'étude est représentée sur la Figure 62.

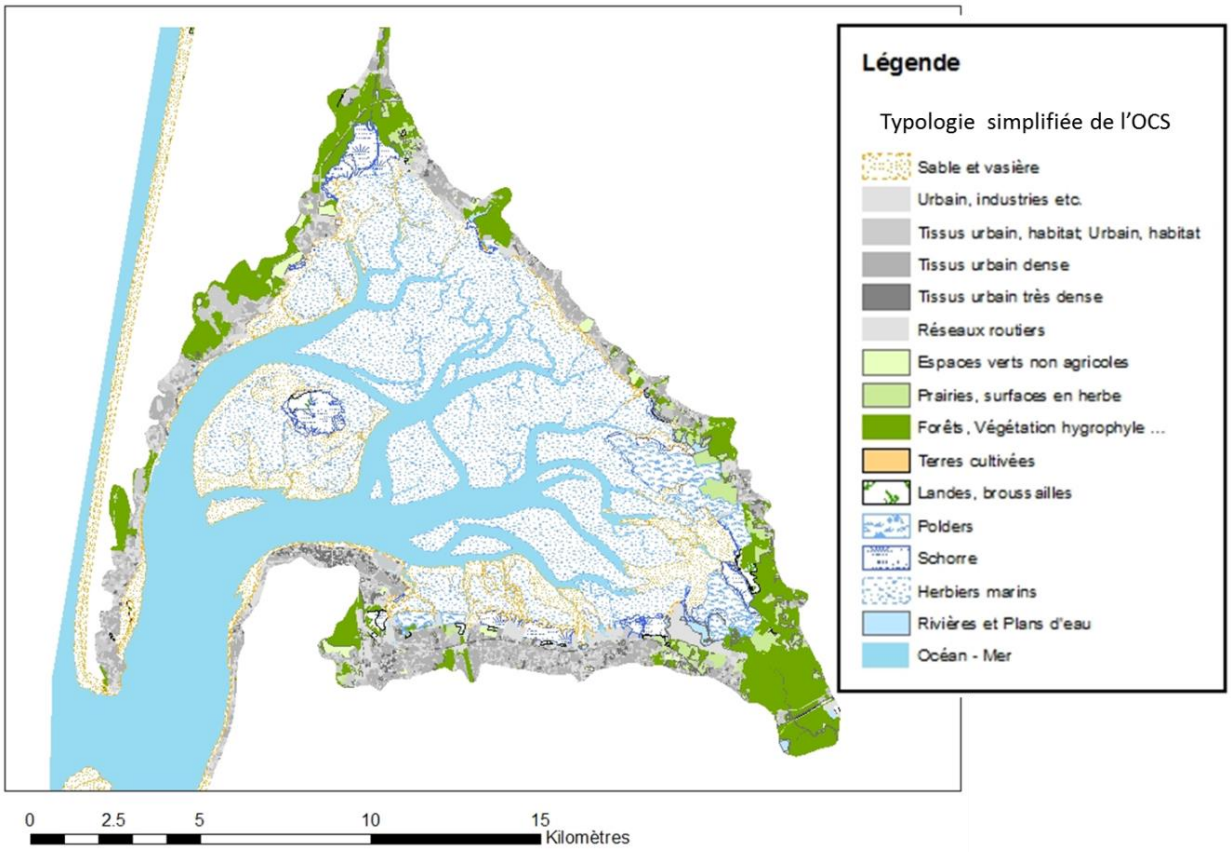


Figure 61 : Carte de la typologie simplifiée pour l'établissement de la carte de rugosité.

Ensuite, on établit la correspondance entre la typologie simplifiée d'occupation du sol et les coefficients de rugosité (ici coefficients de Strickler) comme détaillé dans le Tableau 5 :

- Les valeurs prises pour les coefficients de Strickler dans les différentes simulations varient de 4 $m^{1/3}s^{-1}$ dans les zones de fort frottement (zones urbanisées denses) jusqu' à 40-50 $m^{1/3}s^{-1}$ pour les zones à faible frottement (fond marin, rivières…).

- En milieu urbain, la valeur du coefficient de Strickler est abaissée afin de prendre en compte l'augmentation de la rugosité qui a pour objectif de tenir compte globalement et en moyenne de la densité d'obstacles aux écoulements (bâtiments, haies…).

Typologie simplifiée	Coefficient de Strikler (m^1/3 /s)
Tissus urbain très dense	4
Tissus urbain dense	5
Landes, broussailles	10
Urbain, habitat	10
Forêts, Végétation hygrophyle …	12
Schorre	15
Herbiers marins	20
Terres cultivées	20
Polders	22
Sable et vasière	25
Urbain, industries etc.	25
Espaces verts non agricoles	30
Prairies, surfaces en herbe	30
Réseaux routiers	40
Rivières et Plans d'eau	40
Océan - Mer	52

Tableau 5 : Coefficients de Strickler attribués en fonction de la typologie simplifiée d'occupation du sol.

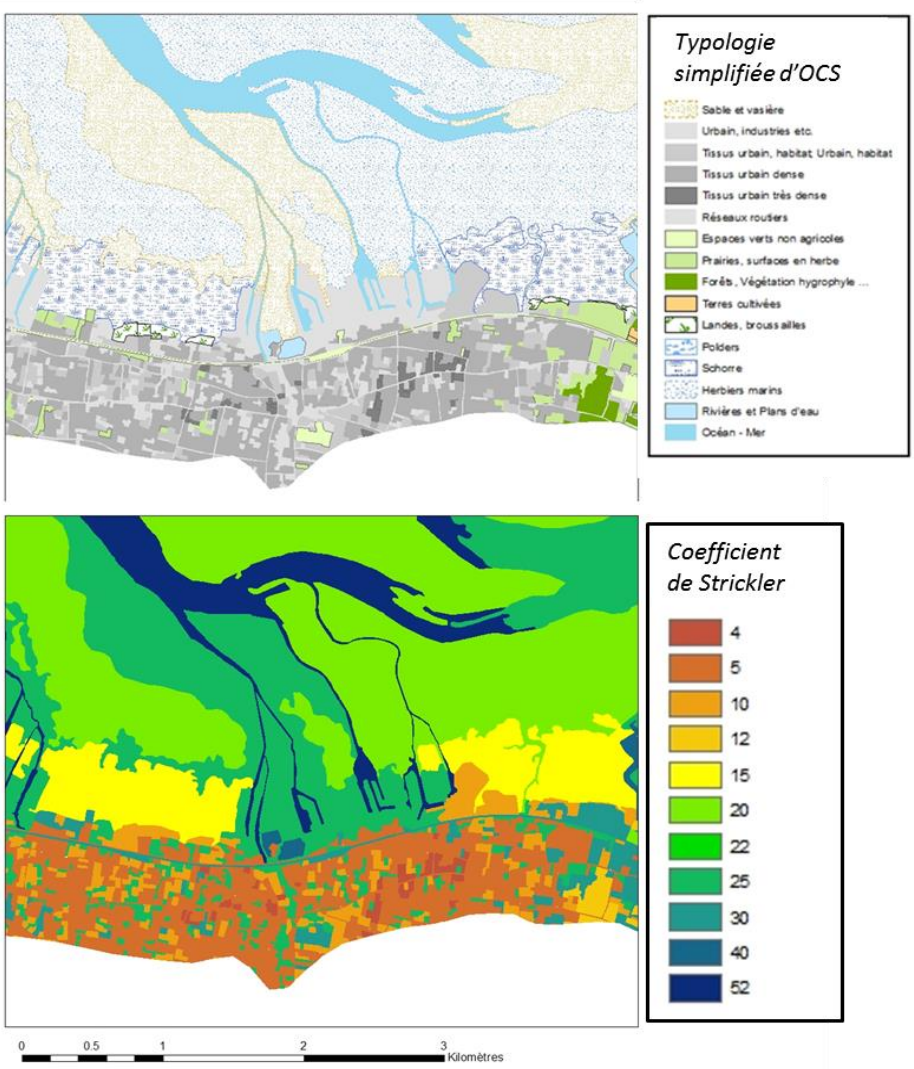


Figure 62 : Exemple de la correspondance entre la typologie simplifiée d'occupation du sol et les coefficients de Strickler ($m^{1/3}s^{-1}$).

6.4.4. Prise en compte des connexions hydrauliques

Le modèle utilisé pour simuler la submersion permet l'intégration d'ouvrages hydrauliques dans la dynamique des écoulements (pont cadre, écluse motorisée ou non, buse, canalisation avec ou sans clapet, Figure 63).

Ces ouvrages hydrauliques de dimensions inférieures à la maille de référence dont les écoulements sont contraints par des relations spécifique hauteur/pente/débit (pas d'écoulement simple à surface libre) sont pris en compte dans le modèle sous la forme de lois hydrauliques spécifiques.

Quatre régimes hydrauliques différents sont pris en compte en fonction des caractéristiques géométriques des ouvrages (largeur, hauteur, section, cotes aux 2 extrémités), ainsi que des niveaux d'eau amont et aval : (1) seuil dénoyé ou (2) seuil noyé, (3) orifice dénoyé ou (4) orifice noyé (Figure 64). Dans le modèle, le débit calculé est prélevé en amont et réinjecté en aval.

Les localisations et les modalités de prise en compte des ouvrages (mode de fonctionnement selon le scénario simulé, par exemple écluses fermées ou ouvertes) ont été définies en concertation avec les services techniques gestionnaires des ouvrages (chapitre 5).

Figure 63 : Illustration des types d'ouvrages hydrauliques (écluses) pris en compte dans le modèle.

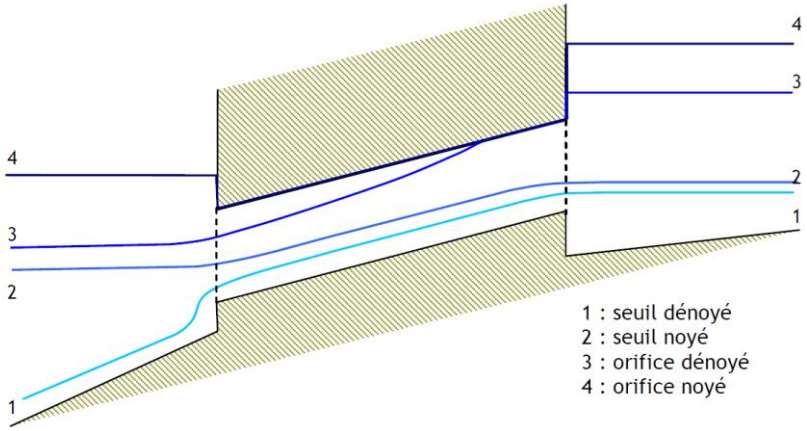


Figure 64 : Exemple de différentes conditions d'écoulement pris en compte dans la modèlisation.

6.4.5. Représentation des défaillances ponctuelles (brèches) des structures de protection côtière

Le modèle MARS-2DH utilisé pour simuler la submersion permet l'intégration de brèches. De la même manière que pour les connexions hydrauliques, localement, les brèches sont prises en compte par l'utilisation des lois hydrauliques de seuils (régime seuil noyé ou dénoyé) permettant de calculer les débits transitant d'amont en aval de la brèche. La brèche est ainsi intégrée dans le maillage comme une singularité hydraulique. La topographie du modèle n'est pas modifiée. La géométrie sur un plan horizontal de la brèche est simplifiée à une forme rectangulaire de largeur fixe et de seuil variable dans le temps.

La cinétique de rupture de la brèche est caractérisée par une durée de rupture. Le seuil de la brèche s'affaisse progressivement depuis son altitude initiale (crête de l'ouvrage) jusqu'à la cote du seuil à l'état final.

Les hypothèses retenues dans le cadre des PPRL sont les suivantes :

- La rupture de la brèche débute lorsque l'ouvrage est surversé (i.e. le niveau marin dépasse l'altitude la crête de l'ouvrage) ou à la pleine mer le cas échéant (absence de surverse) ;

- La durée de rupture est de 15 minutes ;

- L'affaissement du seuil de la brèche se fait donc sur cette durée de 15 minutes, en abaissant les valeurs de l'altitude de crête de l'ouvrage jusqu'au terrain naturel dans les lois hydrauliques utilisées pour évaluer le débit transitant.

Une carte de localisation des structures de protection concernées par des défaillances ponctuelles est présentée paragraphe 5.4 et les détails de chaque structure de protection côtière en Annexe 4.

6.5. FRANCHISSEMENT DE PAQUETS DE MER

Dans le Bassin d'Arcachon, le secteur d'Andernos-Les-Bains est affecté significativement par des phénomènes de franchissement de paquets de mer. Compte tenu de son exposition au clapot et de la particularité des aménagements du front de mer (Figure 65), une méthodologie spécifique a été mise en place afin d'estimer les volumes franchissant les fronts de mer pour les conditions de niveau et de vague (clapot) relatives à l'aléa de référence.

Figure 65 : Particularité des aménagements de front de mer sur le littoral d'Andernos-Les-Bains, constitués d'une double rangée de murets.

La méthodologie basée sur l'utilisation du modèle SWASH mise en œuvre pour simuler le franchissement par paquets de mer comporte plusieurs étapes :

Etape 1 : des tronçons du littoral homogènes en termes de hauteur, largeur et exposition au clapot, et forme des ouvrages sont délimités. Un profil topographique orthogonal à chaque tronçon est défini depuis la plage jusqu'à l'arrière de l'ouvrage côté terre. Le linéaire côtier d'Andernos-Les-Bains a ainsi été segmenté en 5 tronçons homogènes.

Une résolution très fine du modèle SWASH est nécessaire d'une part, pour représenter la particularité du clapot en amont du Bassin (Hs ≈ 0,5 m ; Tp ≈ 3 s), d'autre part pour représenter la géométrie de l'ouvrage de front de mer (double rangée de murets de faible largeur). La résolution spatiale retenue pour répondre à ces contraintes est de 0,20 m (Figure 66).

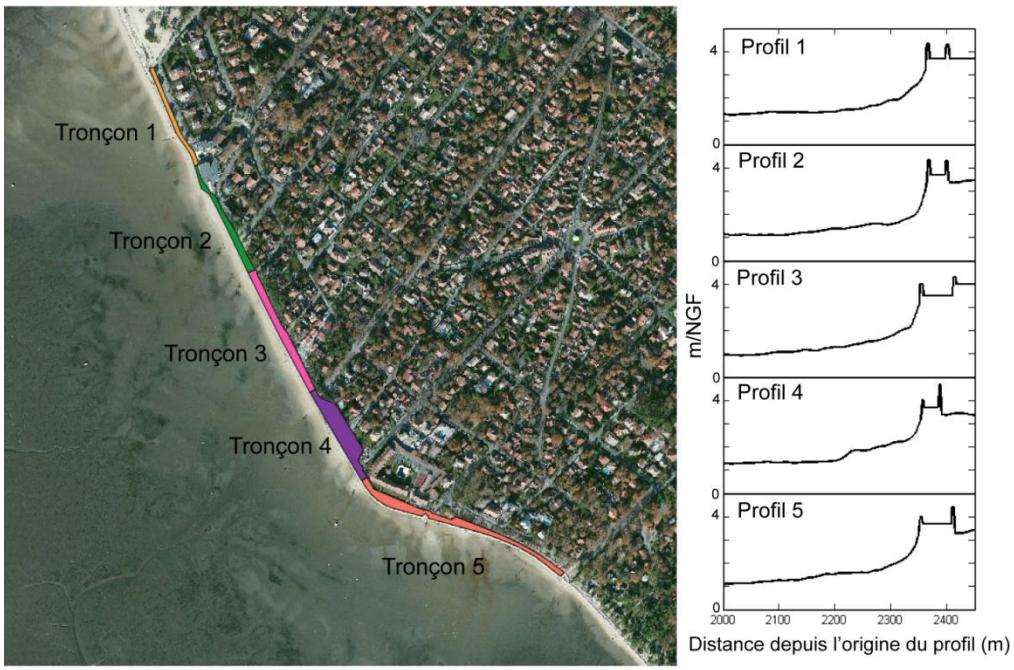


Figure 66 : Tronçons de morphologie et d'exposition homogènes et profils associés pour la modélisation des volumes franchissants.

Etape 2 : les simulations sont réalisées avec SWASH pour chacun des profils (associé à un tronçon) sur une durée de 4 heures autour du 2ème pic de marée (PM +/- 2h) en utilisant en entrée de SWASH les résultats de niveaux d'eau et des vagues issus du chainage MARS-2DH-SWAN 50 m (emprise R0). La simulation SWASH permet de représenter la propagation des vagues jusqu'au pied de l'ouvrage, leurs déferlements et de calculer les volumes franchissant l'ouvrage (premier muret (1) et second muret (2), Figure 67).

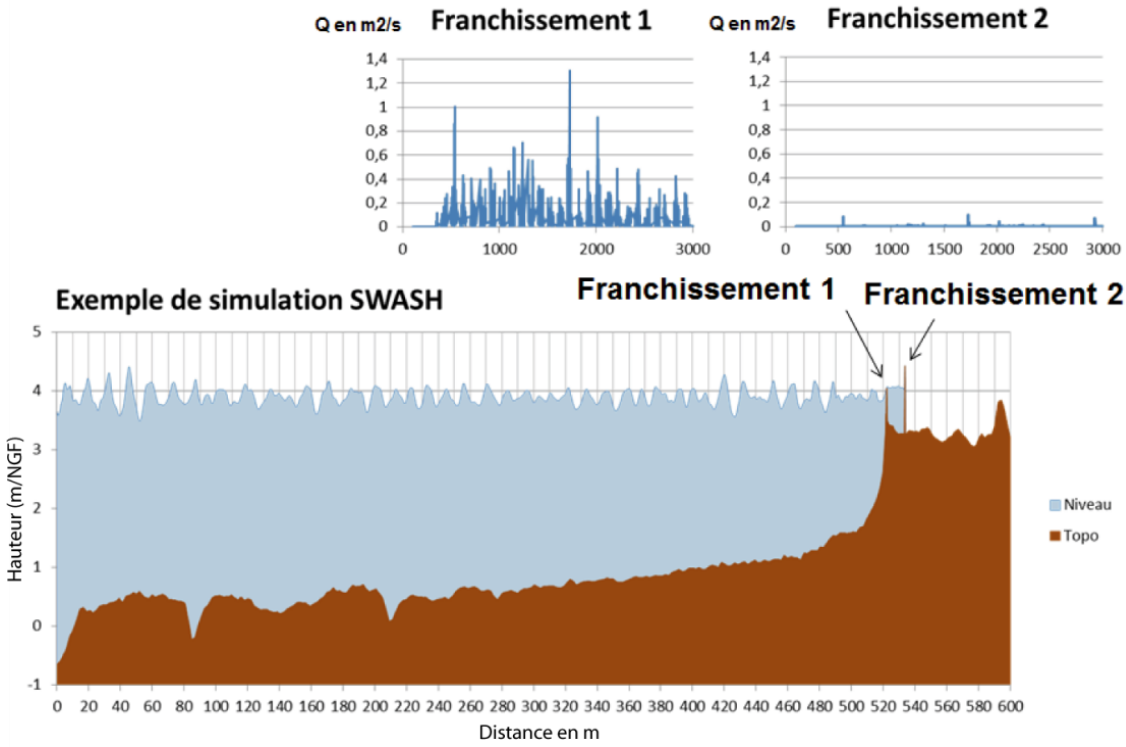


Figure 67 : Instantannée de la propagation des vagues et estimation des volumes franchissant les ouvrages de front de mer à Andernos-Les-Bains.
Les franchissements 1 et 2 correspondent respectivement aux volumes franchissant le 1er muret côté mer et le 2nd muret côté terre.

Etape 3 : les volumes cumulés franchissant la deuxième rangée de muret pour chaque profil, sont multipliés en fonction de la longueur du tronçon associé.

Etape 4 : le volume total par tronçon calculé par SWASH (intégré sur le pas de temps de calcul du modèle MARS-2DH) est enfin injecté au modèle de submersion MARS-2DH à maille 12 m sous forme de débit franchissant en m^3/s.

6.6. VALIDATION DE LA MODELISATION NUMERIQUE

6.6.1. Validation des conditions de marée et des surcotes de tempêtes

Les capacités des modèles MARS-2DH et SWAN à reproduire correctement les conditions de niveaux d'eau (marée et surcote atmosphérique), de courants, de surcote due aux vagues et de clapot à l'intérieur du Bassin d'Arcachon ont été discutées dans le rapport BRGM/RP-58723-FR. Dans cette étude, les résultats issus des modèles ont été confrontés aux mesures du

marégraphe d'Arcachon–Eyrac lors des tempêtes Klaus du 24/01/2009 et Xynthia du 27-28/02/2010 et aux relevés en neuf stations de mesure dans le Bassin lors de l'hiver 2006-2007.

Les tests de validation effectués ont notamment montrés qu'en période de tempête, lorsque des données de forçage de bonne précision sont disponibles, les altitudes du plan d'eau sont correctement reproduites sur les points d'observations.

6.6.2. Validation des niveaux centennaux à l'intérieur du Bassin d'Arcachon

Afin de valider la méthode de calcul des niveaux d'eau centennaux à l'intérieur du Bassin, les résultats de simulation pour l'événement naturel de référence ont été comparées aux valeurs centennales obtenues à partir de l'analyse statistique des mesures effectuées au marégraphe d'Arcachon-Eyrac (Tableau 6).

Il convient de rappeler :

- qu'à l'intérieur du Bassin, des valeurs statistiques centennales ne sont disponibles qu'à Arcachon-Eyrac ;
- qu'il s'agit de valeurs indépendantes (non utilisées dans la méthode mise en place.)

Niveaux extrêmes de pleines mers (m) à Arcachon-Eyrac exprimés en IGN69 ***(Rattachement effectué à l'aide des Références Altimétriques Maritimes 2011)***		
	Période de retour 100 ans	Origine du niveau
Niveau SHOM-CETMEF (2012)	**3.60**	Statistiques à partir des observations
Valeur sup. intervalle de confiance à 95%	*3.88*	
Niveau BRGM	**3.65**	
Valeur inf. intervalle de confiance à 95%	*3.50*	
Niveaux obtenus à Arcachon-Eyrac pour les conditions de l'aléa de référence au large *(20 cm du changement climatique exclu)*	**3.65**	Modélisation chainée courants-niveaux-vagues

Tableau 6 : Comparaison des niveaux d'eau centennaux à Arcachon-Eyrac pour l'aléa de référence.

Le niveau maximum atteint issu de la modélisation couplée de l'évènement de référence à la localisation du marégraphe d'Arcachon-Eyrac est de 3,65 m/IGN69. Cette valeur est comprise dans l'intervalle de confiance à 95% des valeurs attendues pour un niveau d'eau de période de retour 100 ans selon la méthode BRGM (Annexe 3) et supérieur de 5 cm au résultat de l'étude SHOM-CETMEF 2012.

La comparaison de ces valeurs et leur faible différence permettent de valider la méthode utilisée pour la simulation de l'évènement de référence, depuis les données sources utilisées (niveaux d'eau, vagues, vents…), l'analyse statistique en probabilités conjointes des données et la plateforme de modélisation exploitée.

6.7. EXEMPLES DE RESULTATS DE SIMULATIONS NUMERIQUES

6.7.1. Agitation du plan d'eau

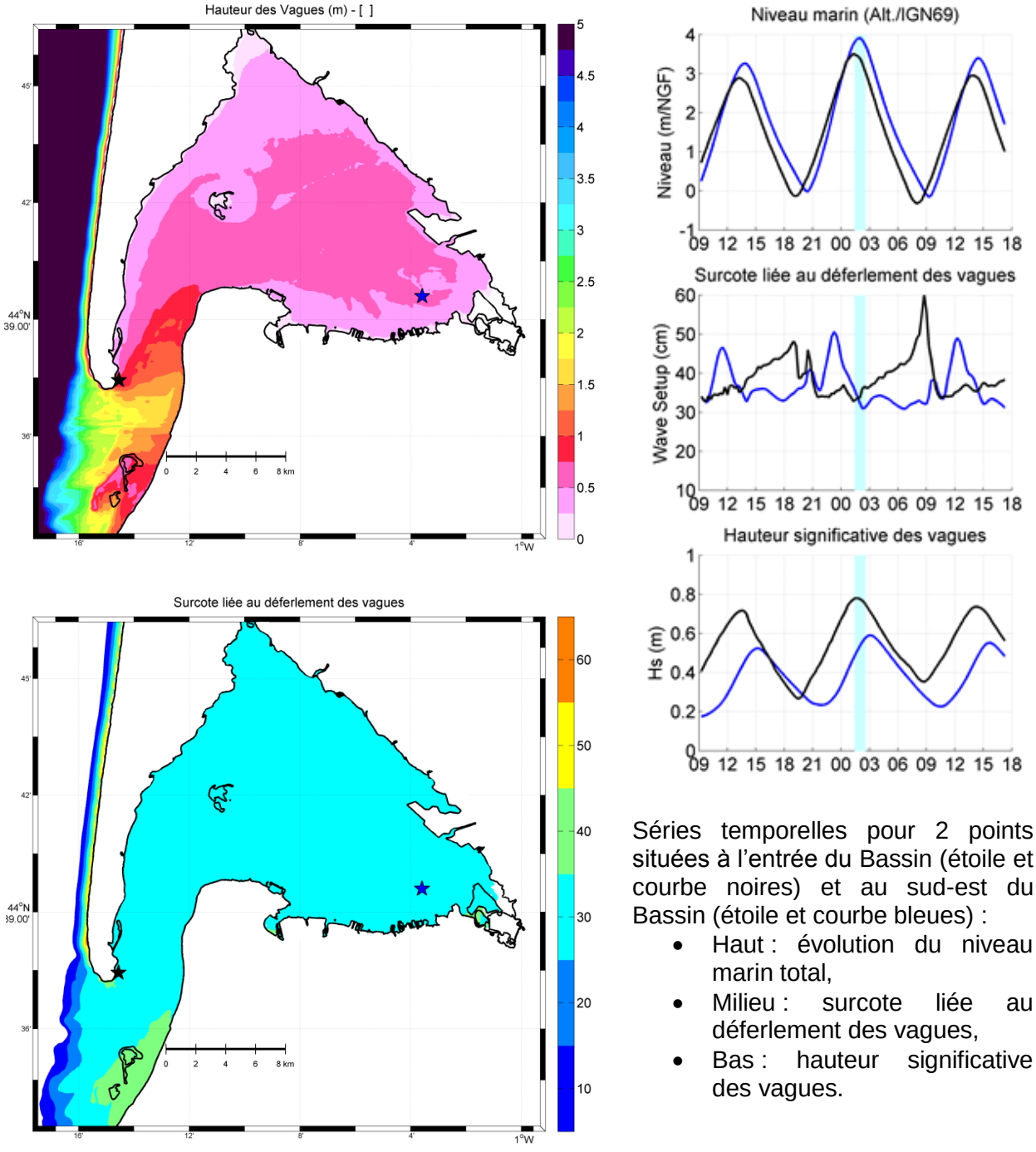
Un exemple des résultats du chainage SWAN-MARS-2DH à 50 m de résolution (emprise R0) pour l'évènement naturel actuel (combinaison n°7 – cf. 3.2.2) présenté Figure 68 illustre la répartition spatiale de la hauteur significative des vagues et de la surcote liée à leurs déferlements (*wave setup*) dans le Bassin d'Arcachon à marée haute au maximum de la pleine mer :

- La carte de hauteur significative des vagues met en évidence des vagues supérieures à 5 m à l'extérieur du Bassin (au large il s'agit de la houle : les vagues ont des hauteurs de 7 m et des périodes pics de 15s) et des vagues inférieures à 1 m à l'intérieur (il s'agit du clapot) avec une zone de déferlement des vagues située dans la zone des passes ;
- La carte des valeurs de surcote correspondant à la surélévation moyenne du plan d'eau générée par le déferlement des vagues dans la zone des passes met en évidence une propagation de cette surcote globalement homogène sur l'ensemble du Bassin. Elle est de l'ordre de 30 cm à marée-haute. Pour rappel, le chainage des modèles, permet une représentation des interactions vagues-niveaux-courants.

Outre ces cartes qui permettent de visualiser une répartition spatiale des résultats, des séries temporelles, extraites à l'entrée (courbe noire) et au fond (courbe bleue) du Bassin permettent de visualiser les variations sur 3 cycles de marée, du niveau marin, de la surcote induite par le déferlement des vagues et de la hauteur significative des vagues :

- Le niveau marin est plus élevé de quelques dizaines de centimètres (~50 cm max) au fond du Bassin en raison de la poussée des masses d'eau et présente un décalage temporel de quelques dizaines de minutes (60 minutes max) lié à la propagation de la marée à l'intérieur du Bassin;
- La surcote liée au déferlement des vagues est modulée par la marée et atteint son maximum (~50cm) lors de la basse-mer et son minimum à la plein-mer (~30 cm)
- Les hauteurs significatives des vagues sont, elles aussi, modulées par la marée. Les hauteurs maximales des vagues à l'entrée et au fond du bassin sont atteintes lors de la plein-mer et ne dépassent pas le mètre.

Des cartes similaires décrivant le comportement du niveau marin, des vagues et des surcotes induites par leurs déferlements à différents instants du cycle de marée (marée-basse et mi-marée) sont décrites en Annexe 6.



Séries temporelles pour 2 points situées à l'entrée du Bassin (étoile et courbe noires) et au sud-est du Bassin (étoile et courbe bleues) :

- Haut : évolution du niveau marin total,
- Milieu : surcote liée au déferlement des vagues,
- Bas : hauteur significative des vagues.

*Figure 68 : Cartes des hauteurs significative des vagues (en haut) et des surcotes liées au déferlement des vagues (en bas) à l'échelle du Bassin d'Arcachon à **marée-haute**.*

6.7.2. Dynamique de submersion

Une illustration de la dynamique de la submersion obtenue avec le modèle MARS-2DH (maille de 12 m, emprise R1) est présentée sur la Figure 69. La simulation montre en différents instants de la submersion, les débordements sur les digues successives, les entrées d'eau préférentielles le long du littoral et la dynamique des écoulements :

- Les instants (A) et (B) correspondent à la montée de la pleine-mer avec la mise en charge hydraulique des ouvrages de protections (digues) ;

- une heure avant la pleine-mer (C) des brèches se forment sur le premier rang de digue conduisant à une inondation des prés salés Est et Ouest ;

- Au moment de la pleine-mer (D) l'inondation atteint les seconds rangs de digue et se poursuit dans les quartiers urbains (D) par surverse au-dessus de ces ouvrages ;

- L'inondation des quartiers urbains se poursuit alors que le niveau marin est à mi-marée (E).

- Le dernier instant (F) correspond à la vidange de l'inondation, seules les cuvettes topographiques restent en eau.

Cette vision de la dynamique de la submersion est possible car le modèle permet d'obtenir en chaque point du maillage du domaine d'étude (espace) et à chaque instant de la simulation (temps), les séries de données de hauteur d'eau et des vitesses horizontales moyennées sur la verticale (intensité et direction).

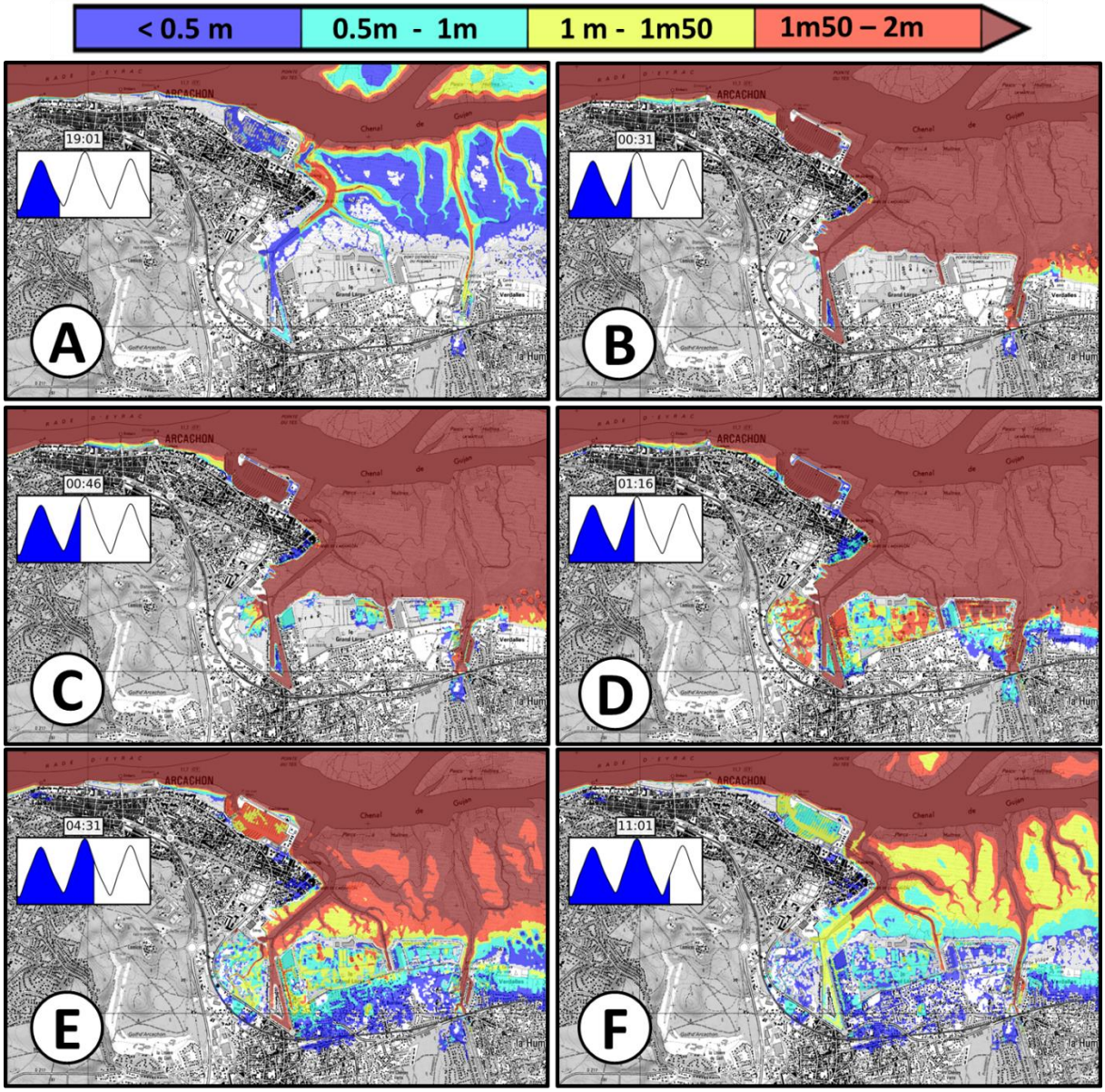


Figure 69 : Illustration de la dynamique de la submersion pour l'évènement naturel actuel avec le scénario de défaillances sur Arcachon et La-Teste-de-Buch. Les cartes présentent les hauteurs d'eau (m).

7. Méthodes de qualification et de restitution de l'aléa

7.1. PRINCIPES GENERAUX

L'aléa submersion marine s'exprime par la surface de la zone concernée et par *« la gradation dans la manifestation du phénomène »* (guide méthodologique, MEDDE, 2014). Cette gradation est liée à la capacité d'un adulte à se mouvoir lors du phénomène en cours qui dépend de la hauteur d'eau et de la vitesse de l'écoulement produites par la submersion.

La modélisation numérique mise en œuvre fournit les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement en tout point du domaine de calcul et à chaque instant de la propagation de la submersion. La gradation de l'aléa résulte du croisement de ces résultats selon les classes présentées dans le Tableau 7.

La classe « très fort » pour des hauteurs d'eau supérieures à 2 m a été rajoutée à la demande de la DDTM de la Gironde.

Le code couleur présenté dans ce tableau correspond à celui des cartes finales présentées dans le dossier cartographique associé à ce rapport.

A noter que :

- les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement ne sont pas forcément maximales au même instant ;
- **l'aléa cartographié correspond à la classe maximale induite par le phénomène de submersion marine sans que pour autant les paramètres hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement soient maximaux** ;
- les hauteurs d'eau et vitesse d'écoulement fournies dans le dossier cartographique associé à ce rapport correspondent à leurs valeurs maximales produites lors du phénomène de submersion marine mais pas forcément au même instant.

Hauteur / Vitesse	V < 0.2 m/s	0.2 < V < 0.5 m/s	V > 0.5 m/s
H < 0.5 m	Faible	Modéré	Fort
0.5 < H < 1 m	Modéré	Modéré	Fort
1 < H < 2 m	Fort	Fort	Très Fort
H > 2 m	Très Fort	Très Fort	Très Fort

Tableau 7 : Classes d'aléa basées sur le croisement des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement (guide méthodologique, MEDDE, 2014).

Les cartes produites et fournies dans le dossier cartographique associé à ce rapport sont les suivantes :

- **Les cartes d'aléa de l'évènement naturel de référence pour le scénario de référence qui est :**

    - le scénario de défaillance des structures de protection côtière sur la commune de La-Teste-de-Buch ;

    - le scénario de ruine généralisée sur les autres communes du Bassin d'Arcachon.

  La carte d'aléa de l'évènement naturel de référence et de ce scénario de référence correspond donc à la carte de l'aléa de référence ayant une vocation réglementaire.

- **Les autres cartes fournies à titre informatif :**

    - **Le scénario des structures de protection fonctionnelles** sur toutes les communes du Bassin d'Arcachon ;

    - **le scénario de ruine généralisée des structures de protection** sur la commune de La-Teste-de-Buch ;

    - **Le scénario de défaillance des structures de protection** sur la commune d'Andernos-Les-Bains, de Lanton et sur le secteur du Mimbeau (commune Lège-Cap Ferret) ;

- **Les cartes d'aléa pour l'évènement naturel à échéance 100 ans.** Elles sont fournies pour les mêmes scénarios que pour l'évènement naturel de référence (cf. ci-dessus).

- **Les cartes de hauteur d'eau** pour l'évènement naturel de référence et l'évènement à échéance 100 ans et pour chacun des scénarios simulés ;

- **Les cartes de vitesse d'écoulement de l'eau** pour l'évènement naturel de référence et l'évènement à échéance 100 ans et pour chacun des scénarios simulés ;

- **Les isocotes** (c'est-à-dire l'altitude du plan d'eau à terre lors de la submersion) pour l'évènement naturel de référence et à échéance 100 ans et pour chacun des scénarios simulés sont fournies sous format numérique vecteur (shapefile) exploitable dans un SIG.

7.2. BANDE DE SECURITE LIEE AUX CHOCS MECANIQUES DES VAGUES

Le guide méthodologique du MEDDE (2014) prévoit l'application d'une bande de sécurité liée aux chocs mécaniques des vagues : *« La zone soumise aux franchissements est sujette à des contraintes spécifiques, en particulier à des chocs mécaniques de vagues et de projections. L'aléa choc mécanique des vagues est donc distinct de l'aléa inondation […] Dans les zones caractérisées par des franchissements modérés, la largeur de la zone soumise au déferlement peut être considérée par défaut comme égale à 25 m, et étendue à 50 m dans un contexte cyclonique ».*

Les chocs mécaniques liés aux vagues représentent un aléa à part entière. Bien qu'associés à la submersion marine, leur impact est distinct d'une inondation et correspond à une **pression**.

Cet aléa « chocs mécaniques des vagues » est généralement calculé dans le cadre d'études de génie civil/génie côtier pour le dimensionnement d'ouvrages de protection et d'ouvrages portuaires. Les méthodes sont donc lourdes et complexes à mettre en œuvre à l'échelle du Bassin d'Arcachon car il faudrait pour cela une identification précise des différents types de contacts terre/mer et types d'ouvrages sur tout le pourtour du Bassin. En l'absence de cette connaissance, cet aléa est généralement déterminé dans les études PPRL sur la base de la connaissance historique sans calcul spécifique.

Sur le Bassin d'Arcachon, la connaissance historique (traces d'érosion sur les ouvrages et infrastructures, Figure 17, Figure 26 et Figure 27) ainsi que la simulation de l'agitation marine pour l'évènement de référence (hauteur significative et période pic des vagues à l'intérieur de la lagune, Figure 70) permettent de considérer que **tout le front de mer du Bassin est exposé à des chocs mécaniques liés aux vagues plus ou moins importants en fonction de l'exposition à la houle ou au clapot.**

La Figure 70 met en évidence des hauteurs de vagues assez importantes (> 1m) dans l'embouchure jusqu'au Moulleau (commune d'Arcachon) rive sud et jusqu'à la racine du Mimbeau (commune Lège – Cap Ferret) rive nord. En revanche, les périodes pic peuvent être également importantes (> 15s) jusqu'au village de l'Herbe sur la commune de Lège – Cap Ferret. Ailleurs, à l'intérieur de la lagune bien que les conditions d'agitation soient plus calmes, le clapot demeure relativement important : la période est de l'ordre de 3 s et la hauteur de l'ordre de 50 cm notamment entre Andernos-Les-Bains et Lanton.

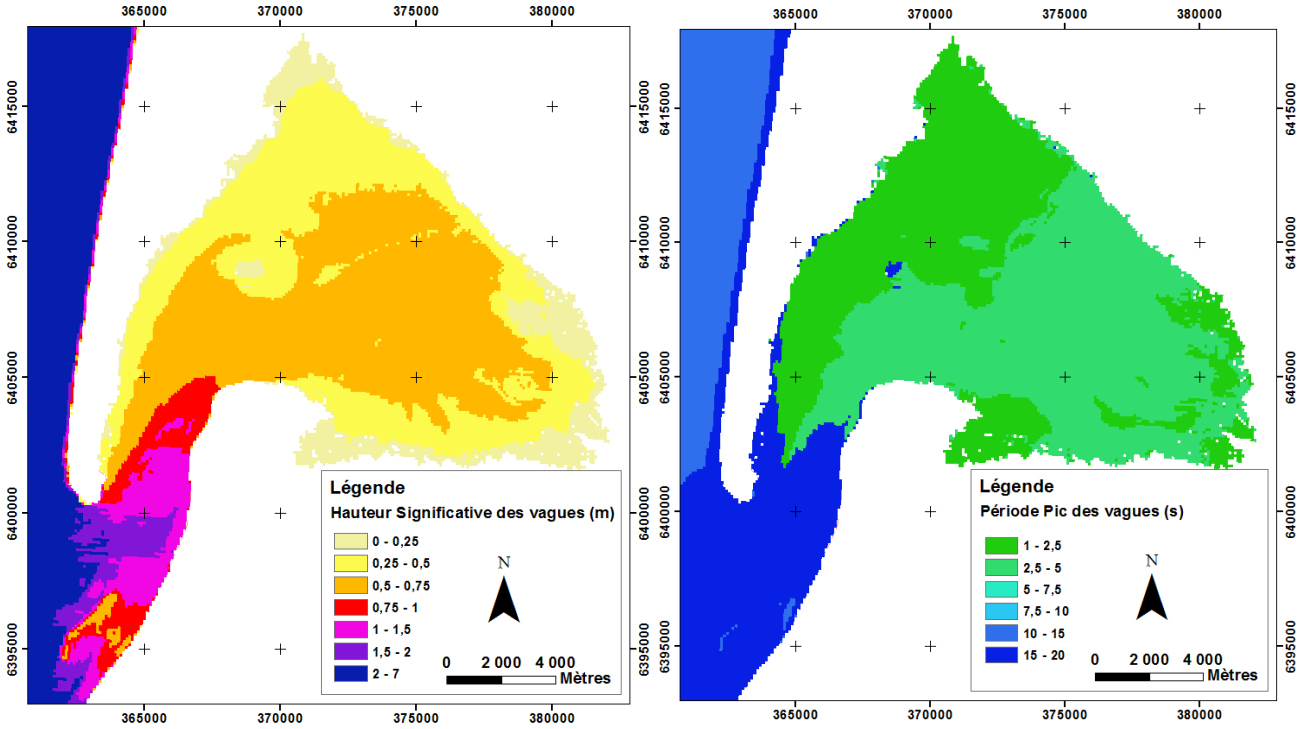


Figure 70 : Hauteur significative et période pic des vagues à l'intérieur du Bassin d'Arcachon pour l'évènement de référence.

Cependant, bien que les 25 m recommandés par le guide méthodologique (MEDDE, mai 2014) paraissent surestimés, aucun élément ne permet de déterminer précisément la largeur de l'impact des chocs mécaniques liés aux vagues. **C'est pourquoi, après concertation avec le SIBA et les élus, la DDTM de la Gironde a choisi d'appliquer une bande de sécurité de 10 mètres (depuis le sommet de l'ouvrage – perrés ou enrochements) à l'embouchure du**

Bassin rives Sud et Nord ainsi qu'une bande comprise entre les 2 rangs de murets à Andernos-Les-Bains (Figure 71)**.**

Cette bande qui correspond à un aléa très fort se superpose à l'aléa de référence. Elle n'est pas appliquée aux aléas des autres scénarios.

Figure 71 : Carte de localisation des bandes de sécurité (chocs mécaniques des vagues).

7.3. BANDE DE PRECAUTION LIEE AUX STRUCTURES DE PROTECTION COTIERE

Le guide méthodologique du MEDDE (2014) prévoit l'application d'une bande de précaution en arrière des structures de protection contre la submersion marine afin de prendre en compte les « suraléas » générés par leur éventuelle défaillance. En effet, en cas de rupture de la structure, des vitesses d'écoulement très fortes peuvent se produire. La bande de précaution permet de prendre en compte cette forte dynamique quel que soit le (ou les) point(s) de surverse ou de rupture.

Cette bande exprimant un aléa très fort vient se superposer à l'aléa de référence. Elle n'est pas appliquée aux aléas issus des autres scénarios.

La largeur de la bande de précaution est déterminée selon les consignes du guide méthodologique pour chaque structure de protection. Elle correspond à la hauteur, multipliée par 100, comprise entre le pied de l'ouvrage côté terre et :

- soit l'altitude du plan d'eau (c'est-à-dire le niveau marin de l'évènement de référence au droit de l'ouvrage) ;

- soit l'arase de l'ouvrage s'il y a surverse.

Cependant, la bande de précaution est à minima de 50 m et ne peut s'appliquer lorsque l'altitude du terrain naturel dépasse celle du plan d'eau, même si sa largeur calculée le permettait (Figure 72).

La bande de précaution s'applique directement en arrière de l'ouvrage (c'est-à-dire que la bande est limitée sur les côtés à 90° de l'axe de l'ouvrage). Ce critère a été retenu en concertation avec le SIBA et la DDTM de la Gironde à défaut d'élément technique et d'étude de sensibilité (Annexe 7).

Enfin, la bande de précaution s'applique aux ouvrages de 1er rang mais aussi à ceux de 2nd rang selon les mêmes principes.

Bien que les cordons dunaires du Mimbeau et de La Pointe du Cap Ferret aient été considérés comme structure de protection, aucune bande de précaution n'a été appliquée car :

- pour le Mimbeau, la configuration géomorphologique avec présence d'une lagune (« conche du Mimbeau ») en arrière du cordon dunaire aurait conduit à appliquer cette bande de précaution sur l'estran (zone inondée à chaque marée par définition) ;

- pour la Pointe du Cap Ferret soit l'altitude du terrain naturel en arrière du cordon est supérieure à l'altitude du plan d'eau de l'évènement de référence, soit elle est inférieure mais avec un terrain naturel caractérisé par un milieu dunaire très mobile avec des cuvettes boisées.

Chacune des étapes mises en œuvre pour l'application de bandes de précaution en arrière de chaque structure de protection identifiée sur le Bassin d'Arcachon est détaillée en Annexe 7.

La localisation des bandes de précaution est présentée Figure 73.

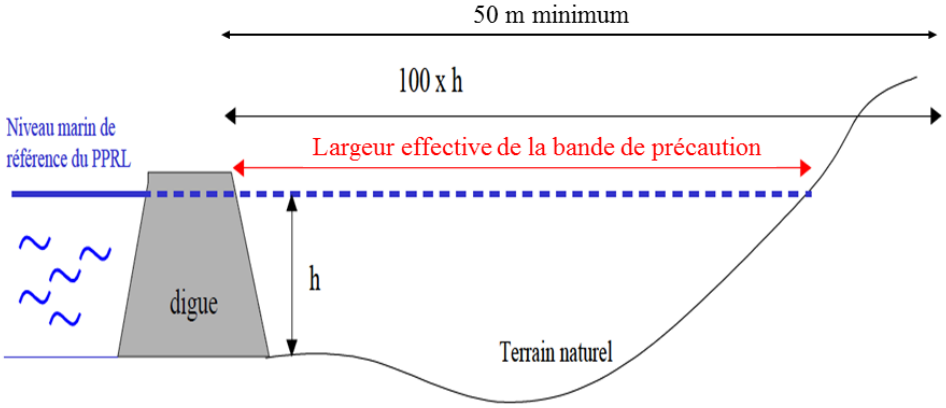


Figure 72 : Principe de détermination de la bande de précaution en arrière des structures de protection contre la submersion marine (modifié d'après le guide méthodologique, MEDDE, 2014).

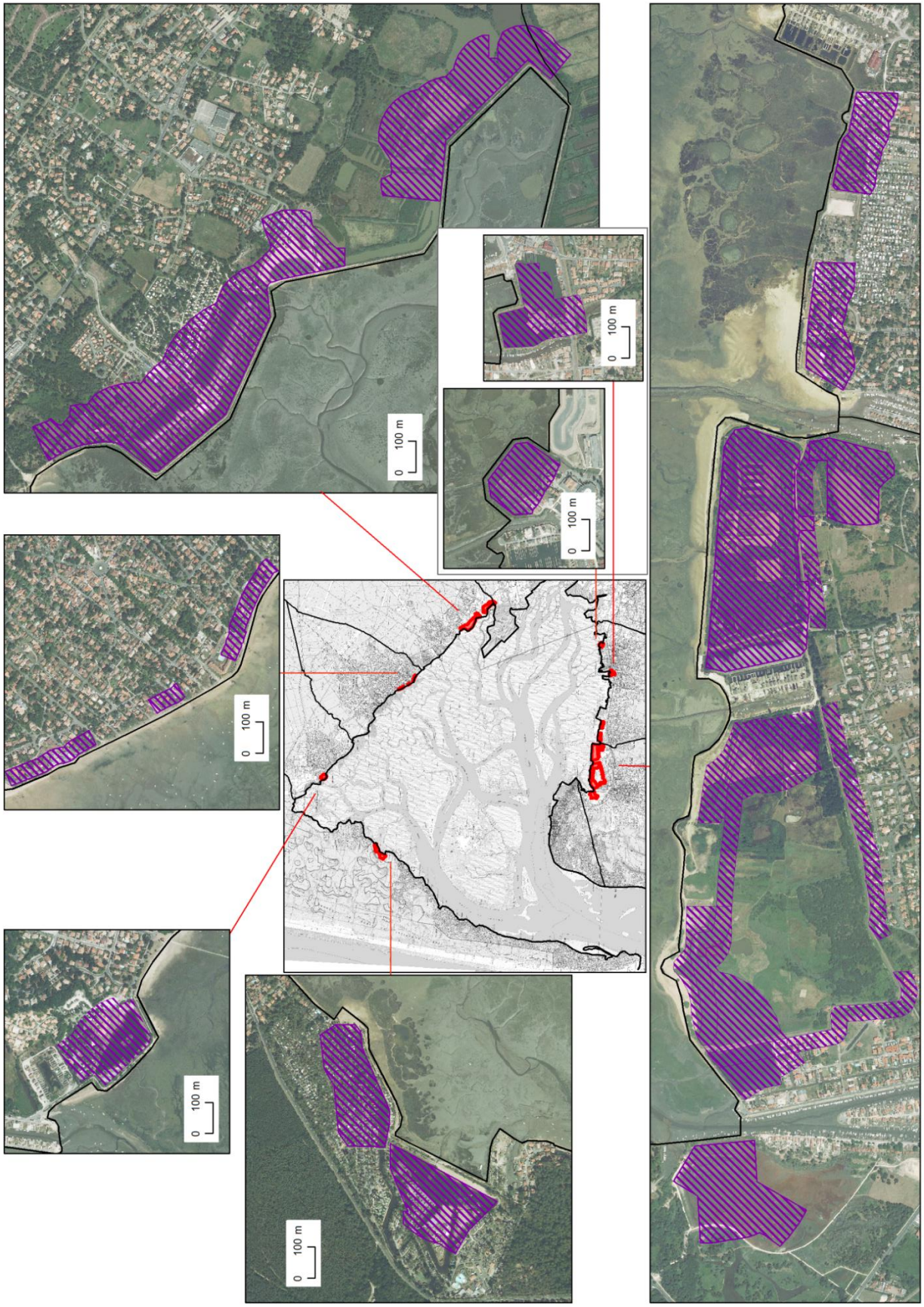


Figure 73 : Carte de localisation des bandes de précaution en arrière des structures de protection côtière.

7.4. ANALYSE D'EXPERT

A l'issue de la phase de modélisation numérique (cf. Chapitre 6), la phase cartographique comprend notamment l'analyse à dires d'expert des résultats des modèles telle que prévue dans le guide méthodologique du MEDDE (2014). Il s'agit d'ajuster voire de retravailler les résultats bruts afin d'intégrer les effets locaux potentiellement non représentés, ceci en se basant sur la connaissance historique, la connaissance terrain et l'analyse critique des données et outils utilisés.

Les informations qualitatives mises en évidence par l'approche historique (paragraphe 2.6) ont notamment permis d'avoir une meilleure connaissance des évènements passés et des processus locaux.

La connaissance terrain du BRGM relative au Bassin d'Arcachon résulte notamment d'une visite spécifique sur tout le pourtour du Bassin d'Arcachon du 5 au 8 novembre 2012 et des études et expertises réalisées dans différents cadres et contextes.

7.4.1. Analyse basée sur la connaissance historique

La connaissance historique a notamment contribué à déterminer la méthode et les outils pour calculer l'évènement naturel de référence, caractériser l'aléa et les hypothèses de défaillance des structures de protection côtières.

Elle a également permis d'identifier l'effet des vagues (non reproduits par la modélisation sur certains secteurs) à savoir les chocs mécaniques nécessitant une bande de sécurité ainsi que les franchissements de paquets de mer (cf. paragraphes 7.2 et 7.4.2).

Enfin, les résultats de modélisation ont été ajustés à dires d'expert basés sur la connaissance historique. L'emprise de l'aléa de référence a par exemple été comparée à celle de la submersion générée par la tempête Xynthia. Très localement sur certains secteurs (village ostréicole du Mimbeau sur la commune de Lège – Cap Ferret, quartier du Mauret sur la commune d'Andernos-Les-Bains, Prés salés Ouest de La-Teste-de-Buch), l'emprise de Xynthia dépasse celle de l'aléa de référence (Figure 74). Ce constat s'explique par les limites de la modélisation liées entre autre à l'échelle de calcul (mailles de 12 m), aux données topographiques utilisées (le LIDAR 2005 présente une précision de ± 25 cm et un bruitage présenté dans le rapport BRGM/RP-62187-FR) et probablement à la prise en compte de la rugosité du sol.

De ce fait, l'emprise de l'aléa a été élargie à celle de l'emprise de Xynthia en tant que de besoin. La classe d'aléa attribuée à cette extension est « faible » (Figure 74). Les hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement ne peuvent être calculées sur ces secteurs.

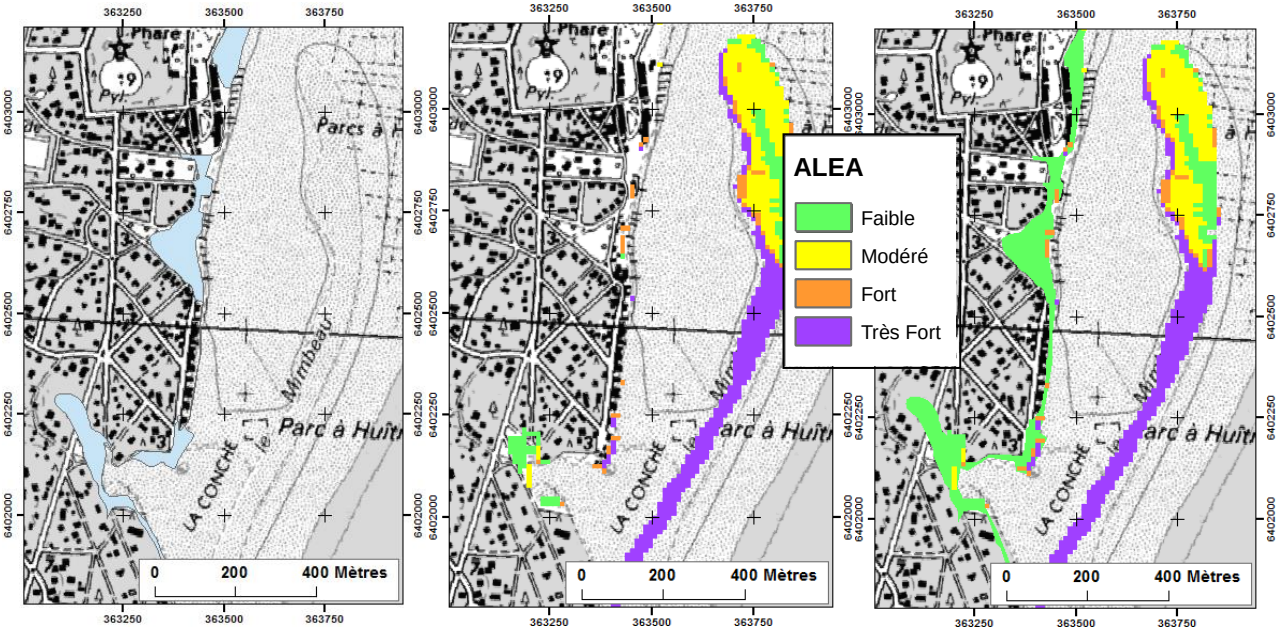


Figure 74 : Illustration de l'analyse historique sur le site du Mimbeau (Lège – Cap Ferret).
A gauche : cartographie de l'emprise de la submersion lors de la tempête Xynthia,
Au centre : résultats bruts du modèle pour l'évènement naturel de référence et le scénario « ruine généralisée »,
A droite : résultats bruts complétés par l'analyse historique.

7.4.2. Franchissements de paquets de mer sur le front de mer

La méthode de modélisation numérique mise en œuvre a permis de représenter la submersion marine générée par un débordement du plan d'eau qui a été considéré comme le type de submersion le plus impactant à l'échelle du Bassin. Elle s'appuie, pour rappel, sur l'utilisation des modèles numériques MARS-2DH et SWAN[18].

Un autre modèle numérique SWASH a été employé à l'échelle du quartier du Mauret à Andernos-Les-Bains afin de reproduire la submersion marine générée par les franchissements de paquets de mer qui représente un phénomène connu dans ce quartier. Les submersions marines survenues lors des tempêtes Klaus et Xynthia résultent de franchissements de paquets de mer.

Ailleurs sur le Bassin d'Arcachon, la connaissance historique et l'analyse à dires d'expert conduisent à considérer que tout le front de mer du Bassin est également exposé à des franchissements de paquets de mer mais dans une moindre mesure qu'à Andernos-Les-Bains. **Ces franchissements limités aux premiers mètres du front de mer sont susceptibles de générer des vitesses d'eau très importantes (>> 2m/s) et donc un aléa très fort.**

Les modèles MARS-2DH et SWAN ne permettent pas de calculer les paramètres (hauteur d'eau et vitesse d'écoulement) des franchissements de paquets de mer. Le modèle SWASH ne peut être employé qu'à une échelle locale et non à celle de l'ensemble du Bassin d'Arcachon. **Cet aléa très fort qui ne concerne que les premiers mètres du front de mer sera donc**

[18] Des formules hydrauliques de seuil ont par ailleurs été employées afin de représenter les brèches dans les ouvrages : localisation des brèches, choix du moment au quel démarrer la brèche (moment de la surverse, niveau du plan d'eau atteint, …).

représenté par un figuré spécifique (Figure 75) **au niveau du trait de côte sur les cartes d'aléa uniquement.**

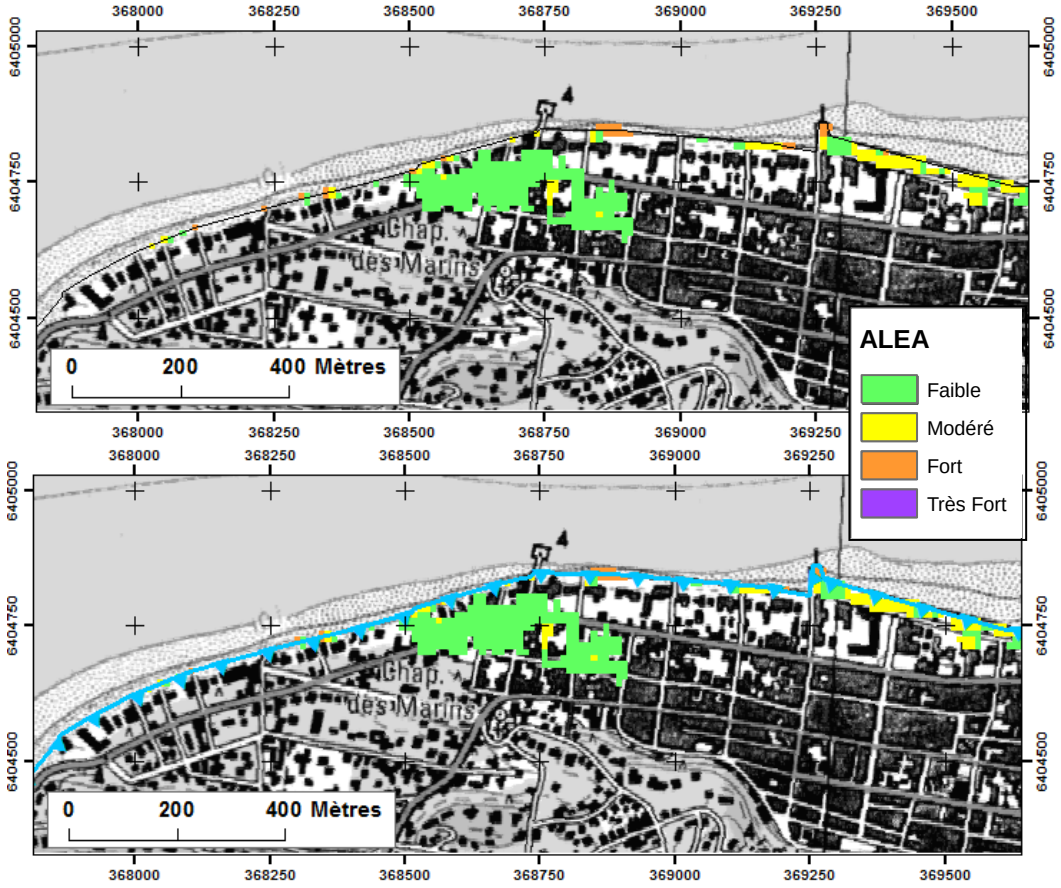


Figure 75 : Illustration de l'analyse d'expert pour les franchissements de paquets de mer à Arcachon, <u>En haut</u> : résultats bruts de modélisation,
<u>En bas</u> : résultats bruts complétés par l'analyse d'expert (triangles bleu pour les franchissements de paquets de mer).

7.4.3. Cas des seuils topographiques

Les 4 seuils topographiques identifiés dans la 1ère phase de l'étude (sur la commune de Lège – Cap Ferret : Piraillan, l'Herbe, La Vigne, la Pointe, cf. rapport BRGM/RP-62187-FR) constituent une séparation topographique entre le front de mer et une zone basse ou cuvette en arrière susceptible d'être inondée par franchissements de paquets de mer (Figure 76 et Figure 77). Dans cette présente 2nde phase de l'étude, il a été analysé l'intérêt de caractériser plus en détail l'aléa submersion marine dans ces zones à partir d'une modélisation numérique telle que celle mise en œuvre pour le quartier du Mauret à Andernos-Les-Bains (modèle SWASH). L'analyse a notamment porté sur une vérification de la topographie du seuil à partir de données DGPS en complément des données LIDAR 2005. Ces données DGPS ont une précision centimétrique alors que celles du LIDAR ont une précision de ± 25 cm. **Cette analyse topographique associée à l'exposition des seuils topographiques aux vagues** (détails en Annexe 8)**, a permis de convenir avec la DDTM de la Gironde et le SIBA que :**

- **une approche plus fine basée sur une modélisation numérique n'était pas justifiée pour les seuils de Piraillan, de La Vigne et de L'Herbe.** Ils ont tous une largeur de plus de 50 m et les données DGPS mettent en évidence une altitude plus élevée du seuil que les

données LIDAR 2005. Cependant, pour le seuil de l'Herbe, ces données DGPS n'ont pas permis de vérifier très précisément la fiabilité du LIDAR 2005 mais l'occupation du sol (bâti + forêt) ainsi que l'absence de connaissance d'évènement de submersion marine historique a conduit à considérer inutile la mise en place d'une méthode plus fine ;

- **l'aléa submersion marine serait caractérisé par une analyse à dires d'expert à la Pointe du Cap Ferret** (cf. paragraphe 7.4.4) au regard des faibles volumes d'eau susceptibles de pénétrer à terre.

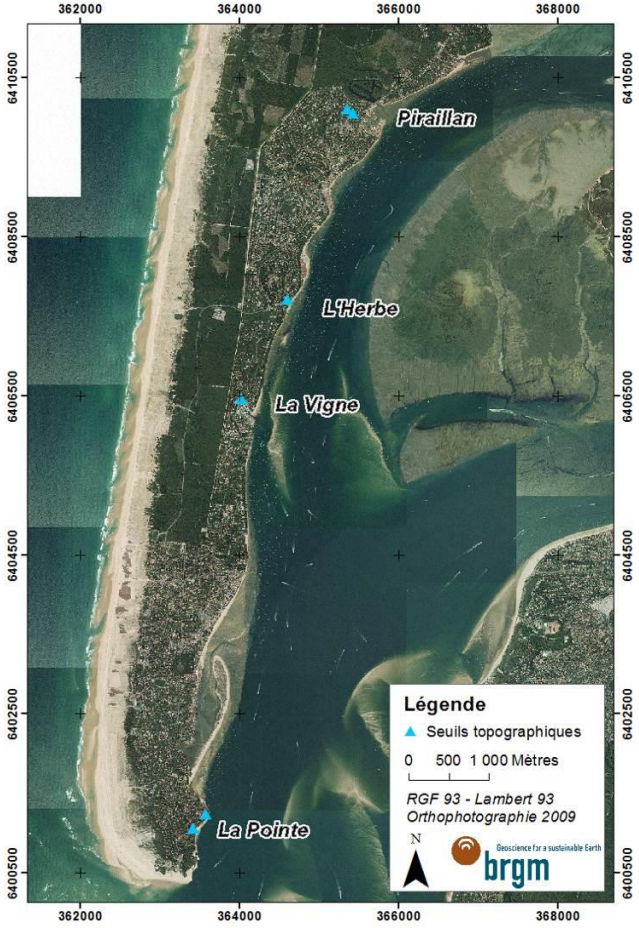


Figure 76 : Seuils topographiques de La Pointe, La Vigne, l'Herbe et Piraillan (commune de Lège-Cap-Ferret).

Figure 77 : Exemple de seuil topographique à la Pointe avec une zone basse en arrière sur le secteur des 44 hectares (commune de Lège-Cap-Ferret).

7.4.4. Cas de la Pointe du Cap Ferret

La Pointe de la flèche sableuse du Cap Ferret est un secteur qui connaît une forte évolution géomorphologique et topographique induite par des phénomènes naturels mais aussi par des actions anthropiques. En effet, ce secteur est soumis à une érosion marine chronique qui a conduit à de nombreux réaménagements (remblais par exemple) et à l'édification de protections côtières (enrochements par exemple).

Outre la complexité des phénomènes naturels (conjonction des effets des courants de marée, de la dérive littorale et de la houle), cette forte évolution géomorphologique et topographique a conduit le BRGM, la DDTM de la Gironde et le SIBA à convenir d'une approche basée sur une analyse à dires d'expert pour caractériser l'aléa submersion marine sur ce secteur. Les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement de l'eau ne peuvent pas être calculées par cette approche.

Cette analyse à dire d'expert a pour objectif de prendre en compte l'effet des vagues non représenté par la modélisation numérique, l'effet du seuil topographique de la rue du Tram et un scénario de défaillance du cordon dunaire. Elle s'appuie sur une analyse de la topographie au regard des niveaux marins simulés au droit de la Pointe ainsi que sur la connaissance historique et les témoignages des riverains.

Scénario de défaillances ponctuelles

La localisation du cordon dunaire concerné par une hypothèse de défaillance ainsi que la position des brèches sont présentées Figure 79, Annexe 4 et Figure 101. Comme précisé paragraphe 5.4, le scénario de référence retenu sur ce secteur est un scénario de défaillances ponctuelles. Le scénario de ruine généralisée a été écarté car le cordon dunaire est suffisamment large et haut sur une grande partie de son linéaire. Les brèches ont donc été positionnées au niveau des points bas et au droit de « cuvettes ». Les témoignages des riverains et les évènements passés (notamment les tempêtes de l'hiver 2013-2014) appuient les hypothèses de défaillance (Figure 78).

Figure 78 : Photos de la brèche du cordon dunaire sur la propriété de M. Bartherotte lors des tempêtes de l'hiver 2013-2014 (mars 2014).
A gauche : photos M. Bartherotte ; A droite : photos Observatoire Côte Aquitaine.

Identification des zones basses et entrées d'eau préférentielles

A la Pointe du Cap Ferret, les zones basses (c'est-à-dire d'altitude inférieure au niveau marin de référence, 3,6 m/NGF) sont localisées sur la Figure 79.

La zone basse n°1 est relativement éloignée de la façade océanique et protégée d'une submersion marine par un cordon dunaire suffisamment large (> 15 m) et haut (> 5 m/NGF). En revanche, cette zone basse est « connectée » au Bassin par la rue du Tram qui bien que possédant à son extrémité un seuil topographique (un point haut) est régulièrement inondée et représente une entrée d'eau préférentielle. La zone basse n°1 est donc exposée à des submersions marines par des entrées d'eau au niveau de la rue du Tram. Comme en témoigne la Figure 80 qui illustre une submersion lors des forts coefficients (113) d'octobre 2015, les vitesses d'écoulement peuvent être rapides dans la rue du Tram même avec des faibles hauteurs d'eau. A noter, que les conditions d'agitation étaient relativement calmes lors de ces marées de forts coefficients par rapport à celles de l'évènement naturel de référence.

Les témoignages oraux des riverains faisant état de nombreuses inondations par le passé dans ce secteur, le substrat sableux et la proximité de la nappe d'eau superficielle laissent également supposer l'exposition de ce secteur à des phénomènes de remontée de nappes. Associés à des vitesses d'écoulement rapides dans la rue du Tram, ces phénomènes sont susceptibles d'avoir un effet défavorable sur la vitesse de remplissage de cette zone basse n°1 et sur la durée de l'inondation. C'est pourquoi l'aléa dans la rue du Tram et dans cette zone basse n°1 est globalement qualifié de fort.

La zone basse n°2 est exposée à une submersion marine uniquement en cas de brèche du cordon dunaire. De par sa localisation à l'extrême Pointe du Cap Ferret, les vitesses de remplissages de cette cuvette peuvent être relativement rapides. C'est pourquoi, l'aléa dans cette zone est globalement qualifié de fort.

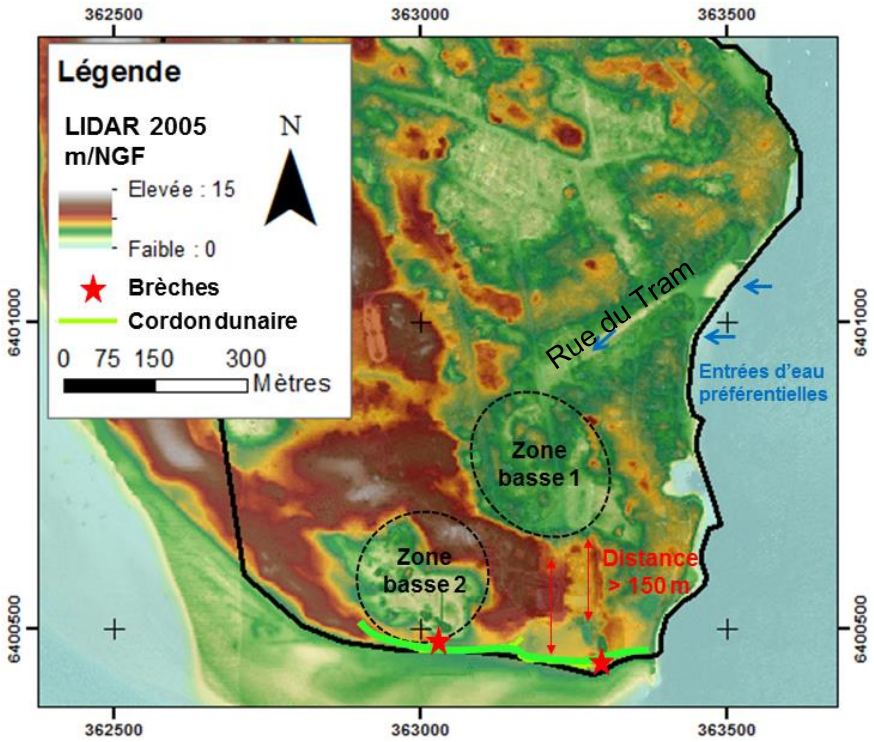


Figure 79 : Cartes des zones basses et entrées d'eau préférentielles à la Pointe du Cap Ferret.

Figure 80 : Entrée d'eau dans la rue du Tram lors des forts coefficients de marée (113) d'octobre 2015 (©Sophie Juby).

7.4.5. Traitement pour pallier les incohérences ponctuelles (résultats bruts) liées à la résolution de la modélisation

A l'échelle de restitution des cartes 1 / 10 000, certaines irrégularités (« trous ») ou sous-estimation dans les résultats bruts du modèle sont visibles et liées à la résolution du modèle (taille de la maille). Ce paragraphe traite uniquement des irrégularités **situées sur le front de mer** (et exposées aux effets du clapot) qui nécessitent d'être régularisées (comblées par une valeur d'aléa) pour éviter toute erreur d'interprétation. Il s'agit par exemple de la plate-forme du club de voile d'Arcachon que le modèle ne calcule pas en aléa alors que l'expertise terrain conduit à la considérer submersible du fait de sa configuration (présence d'un plan incliné, Figure 81).

L**es 10 irrégularités identifiées sont comblées par un aléa fort à minima** en raison de leur configuration (plate-forme des jetées par exemple) et de leur exposition sur le front de mer (Figure 82) : c'est la valeur de l'aléa des pixels situés à proximité qui est choisi sauf pour la plate-forme du club de voile d'Arcachon où l'aléa est très fort en raison de la topographie plus basse que celle du quai longeant le port (Figure 81).

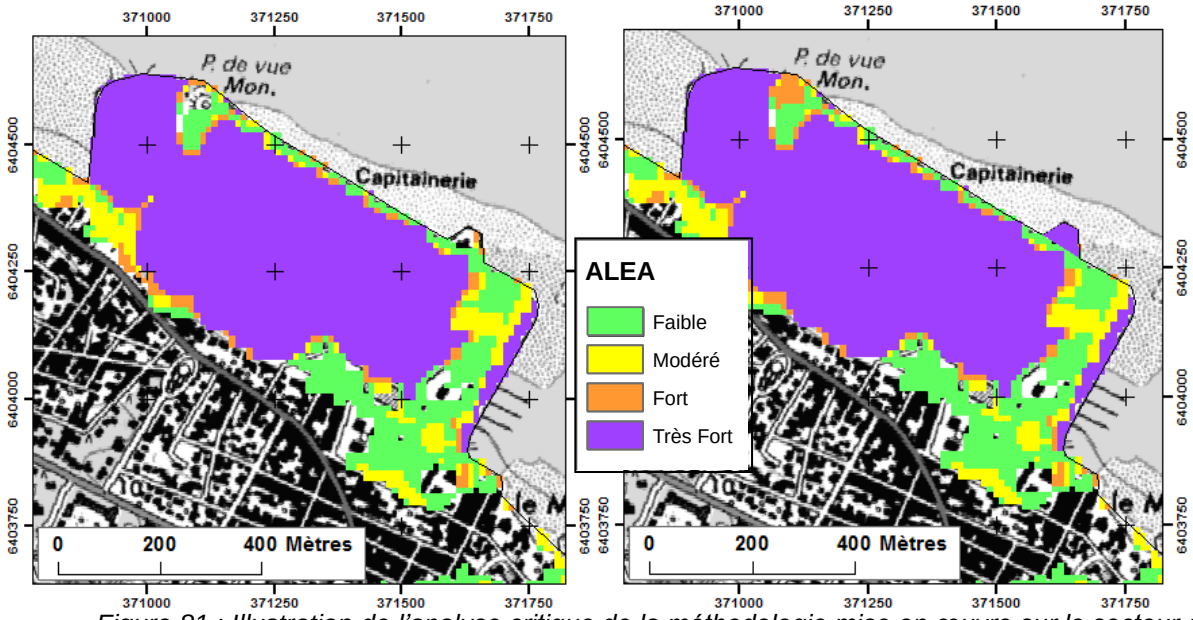


Figure 81 : Illustration de l'analyse critique de la méthodologie mise en œuvre sur le secteur du Port d'Arcachon. A gauche : résultats bruts du modèle, à droite : résultats bruts complétés par l'analyse critique.

Figure 82 : Extraits de cartes d'aléa localisant les comblements des 10 irrégularités des résultats de modélisation.

7.5. PRODUCTION DU SIG

Les traitements SIG ont été effectués à l'aide des logiciels ArcGis 10 (ESRI) et QGis 2.0.1.

Ceux-ci ont permis de compiler l'ensemble des résultats des modélisations en jeux de données conformes aux attentes du cahier des charges et de fournir un fichier SIG par résultats projetés en Lambert 93.

En effet, la modélisation a été réalisée à l'aide de trois grilles de calcul emboitées (cf. paragraphe 6.3) et fournit des résultats en WGS84.

Selon les types de résultats, le cahier des charges prévoyait des restitutions exploitables sous SIG, aux formats raster (Aléa, Vitesse, Hauteur, Isocotes) et vectorielle (Aléa à dires d'expert). Des Atlas pdf ont par ailleurs également été produits à l'aide d'ArcGis.

Les traitements SIG ont ainsi consisté à :

- Combiner les 3 résultats de modèles en grilles raster homogènes
- Nettoyer les valeurs nulles
- Découper les résultats selon le trait de côte
- Projeter en Lambert 93
- Vérifier la cohérence des résultats
- Editer des Atlas

Tous les fichiers du SIG ont été restitués et accompagnés d'un descriptif (métadonnée).

La mise en forme de l'Atlas a fait l'objet de nombreux échanges avec la DDTM de la Gironde afin de définir la mise en page et les emprises de chaque carte (calepinage). Ce fichier de calepinage est également fourni afin de reproduire les Atlas en conservant la cohérence de ceux fournis.

8. Analyse des résultats

8.1. EMBOUCHURE – RIVE DE LA-TESTE-DE-BUCH

A l'embouchure du Bassin d'Arcachon, la rive sud du quartier du Pyla-sur-Mer (commune de La-Teste-de-Buch) présente une topographie assez élevée par rapport au niveau marin de référence. Par conséquent, la submersion est très limitée sur ce secteur que ce soit pour l'évènement actuel ou à échéance 100 ans.

En revanche, les premiers mètres du front de mer de ce secteur sont particulièrement exposés aux effets des vagues. Les franchissements de paquets de mer peuvent induire un aléa très fort du fait de très fortes vitesses (> 2m/s).

De plus, une bande de sécurité liée aux chocs mécaniques induits par le déferlement des vagues a été retenue. Elle est de 10 m appliquée à partir du sommet des perrés.

Les cartes qui présentent les résultats (aléa, hauteur et vitesse) sur ce secteur sont les cartes n° 1 et 2 présentées dans le dossier cartographique.

8.2. SECTEURS SUD – D'ARCACHON AU TEICH

De par sa morphologie de zone relativement basse et plane, le quartier de l'Aiguillon sur la commune d'Arcachon ainsi que les communes de La-Teste-de-Buch et Gujan-Mestras sont particulièrement exposées à l'aléa submersion marine par débordement.

L'extension de la zone inondée et les hauteurs d'eau y sont relativement importantes. Hormis au droit des brèches dans les digues où elles sont fortes, les vitesses d'écoulement sont globalement faibles à modérées.

D'autre part, les nombreux ports représentent des entrées d'eau préférentielles et les digues ne représentent qu'une protection limitée (hormis au niveau des Prés-Salés à La-Teste-de-Buch) en raison de leur surverse par l'évènement de référence et de leur configuration (dimension, géométrie). Attention, aucun diagnostic géotechnique des ouvrages n'a été effectué par le BRGM. Il est bien fait référence ici à la topographie actuelle des ouvrages sans présumer de leur résistance.

Les cartes qui présentent les résultats (aléa, hauteur et vitesse) sur ce secteur sont les cartes n° 3 à 8 présentées dans le dossier cartographique.

La Figure 83 met en évidence les différences entre les 2 scénarios (fournis à titre informatif) de ruine généralisée et d'état fonctionnel des structures de protection côtières sur la commune de La-Teste-de-Buch : il est constaté que la topographie des ouvrages permet de limiter l'emprise de la submersion marine et les classes d'aléa. D'autre part, quel que soit le scénario, les entrées d'eau se font préférentiellement au niveau des zones portuaires.

En revanche, la Figure 84 permet de constater qu'il n'y a quasiment pas de différence entre les 2 scénarios de prise en compte des structures de protection (hormis au niveau de l'ouvrage du Lycée de la Mer à Gujan-Mestras) car tous les ouvrages sont submergés (Digue de La Hume à Meyran et digues des malines de l'Ascol et d'Ostréa Edulis).

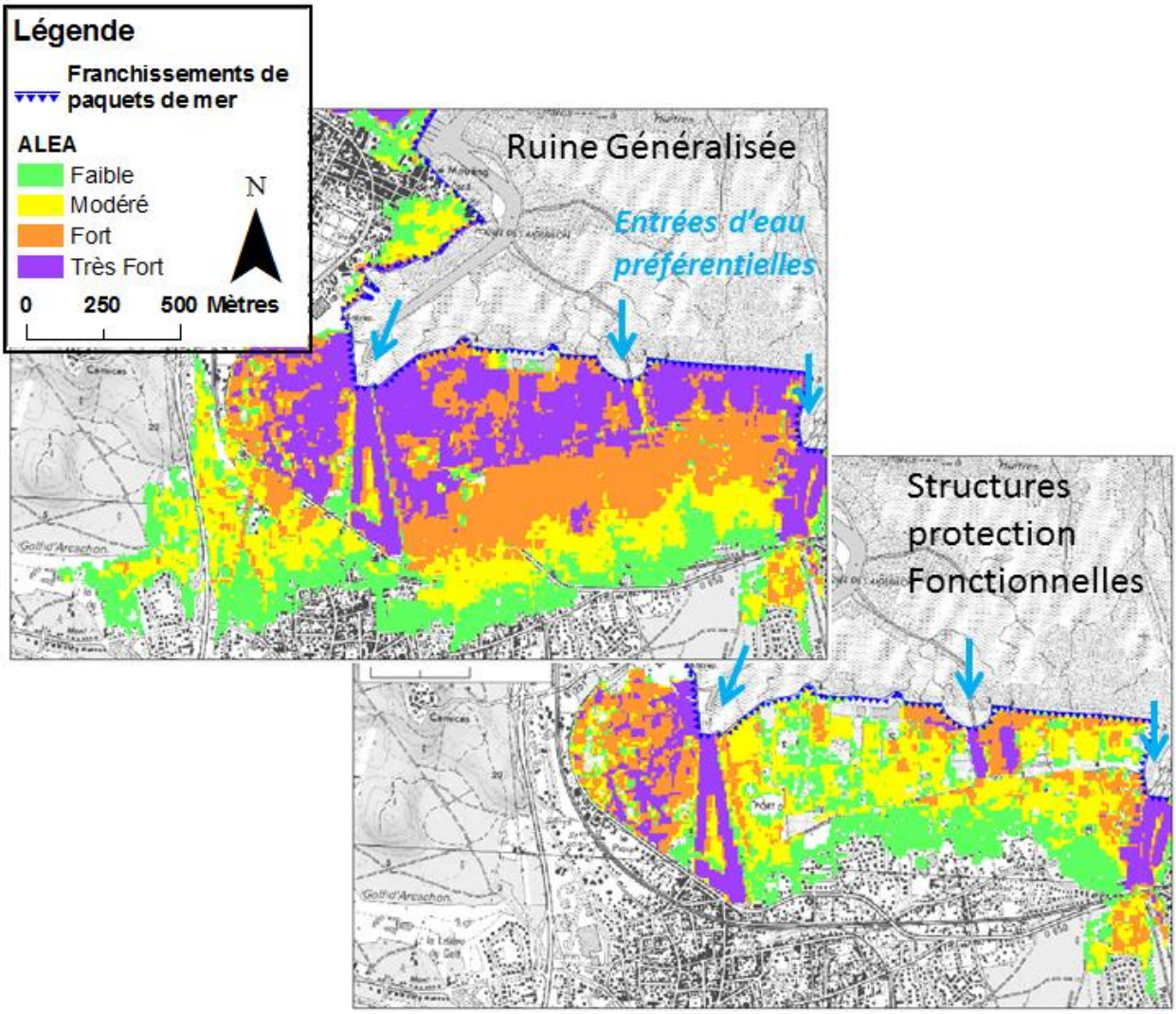


Figure 83 : Comparaison de l'aléa de l'évènement naturel actuel pour les scénarios de ruine généralisée et d'état fonctionnel des structures de protection côtière sur la commune de La-Teste-de-Buch.

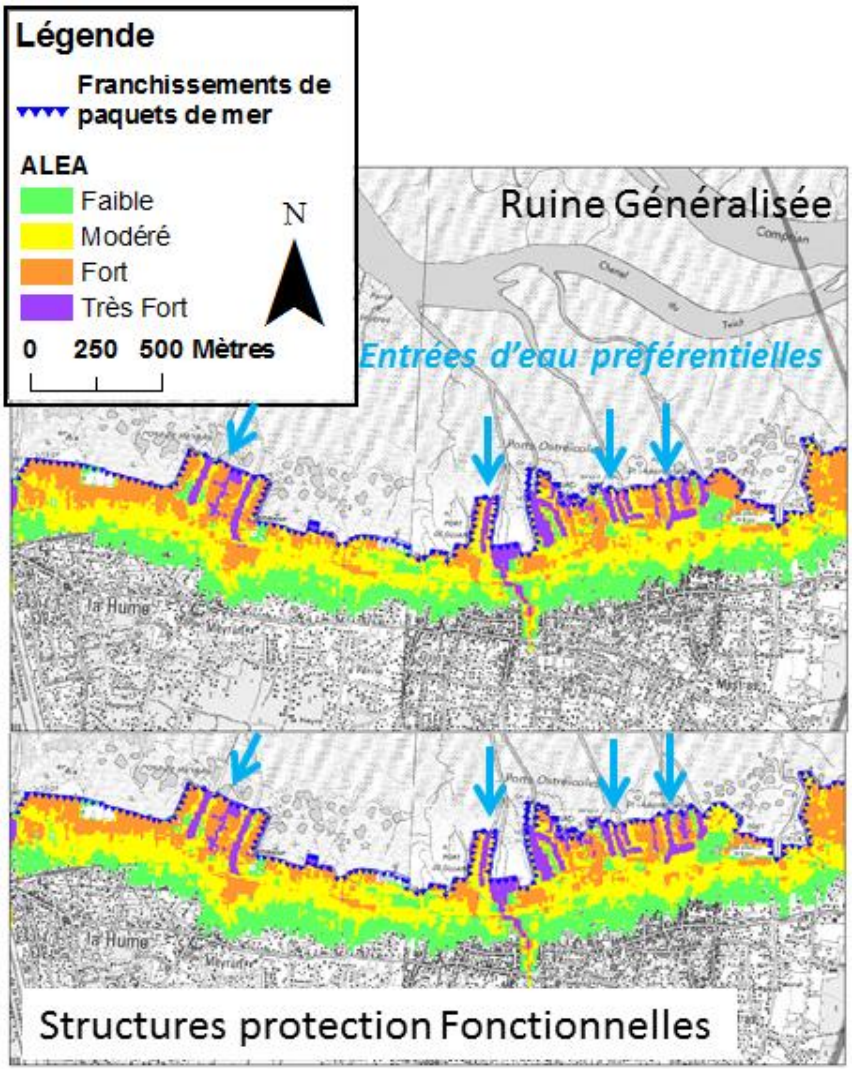


Figure 84 : Comparaison de l'aléa de l'évènement actuel pour les scénarios de ruine généralisée et d'état fonctionnel des structures de protection côtière sur les communes de Gujan-Mestras et de Le Teich.

8.3. AMONT DE LA LAGUNE - DELTA DE L'EYRE – DU TEICH A LANTON

L'amont de la lagune comprend notamment le delta de L'Eyre qui se caractérise par une configuration géomorphologique complexe en raison des différents bras du cours d'eau (réseau de chenaux et de bancs de sable) et des bassins endigués ainsi que par une végétation variée (forêt, prairie, prés salés, etc., cf. orthophotographie, Figure 85). De ce fait, la caractérisation de la dynamique de propagation de la submersion et la validation terrain demeurent complexes et incertaines sur ce secteur (zone encadré rouge). D'autre part, la cartographie de la tempête historique Xynthia sur ce secteur a été considérée trop approximative pour être prise en compte (hormis dans la zone urbanisée du Teich) et aucune analyse à dire d'expert n'a été de ce fait réalisée.

Les cartes qui présentent les résultats (aléa, hauteur et vitesse) sur ce secteur sont les cartes n° 8 à 13 présentées dans le dossier cartographique.

Si l'emprise de la submersion est assez large, les classes d'aléa fort et très fort sont essentiellement liées à des hauteurs d'eau > 1 m dans les zones les plus basses (bassins endigués, marais, …) que ce soit pour l'évènement actuel ou pour l'événement à échéance 100

ans. Les cours d'eau induisent d'une part des entrées d'eau préférentielles à leur embouchure et permettent également une pénétration de la submersion plus à l'intérieur des terres (Figure 86). Hormis dans les bassins endigués où elles peuvent être moyennes, les vitesses d'écoulement sont globalement faibles.

Ce secteur est exposé à des problématiques d'inondation fluviale et de remontée de nappe que la DDTM de la Gironde n'a pas souhaité prendre en compte pour la caractérisation de l'aléa submersion marine notamment en raison de l'absence d'une bonne connaissance du fonctionnement hydraulique de ce cours d'eau (mesures de débits insuffisantes, méconnaissance de la contribution de la nappe).

A noter également que les bassins endigués du Teich à Audenge ont fait l'objet d'un programme BARCASUB (2009-2012) réunissant 6 équipes de recherche (UMR PRODIG, EPOC et LGP, le BRGM, l'EA et le PRISM) et 4 gestionnaires (SIBA, Conservatoire du littoral, Conseil Général de la Gironde et Conseil Régional Aquitaine) et portant sur la gestion du risque submersion marine par dépoldérisation (c'est-à-dire réouverture des polders à la mer par des moyens divers tels que la gestion des écluses, les brèches ou les démantèlements de digues, Figure 87). Dans ce cadre, des cartes de submersion marine ont, entre autre, été élaborées pour différents types d'évènements naturels. Elles permettent d'avoir une estimation de l'étendue de l'inondation pour différentes valeurs de niveaux marins (4,44m /NGF et 4,69 m/NGF) et à partir de différentes méthodes de projection autres que celles recommandées pour l'élaboration des PPRL. Elles n'avaient donc pas pour objectif la caractérisation de la dynamique de la propagation de la submersion à terre pour un évènement de référence centennal tel que nécessaire pour les PPRL. Ce programme a en revanche permis d'apporter des pistes de gestion du risque de submersion marine (notamment par la dépoldérisation) en appui aux politiques publiques (Goeldner-Gianella et al., juillet 2013, Rapport final BARCASUB).

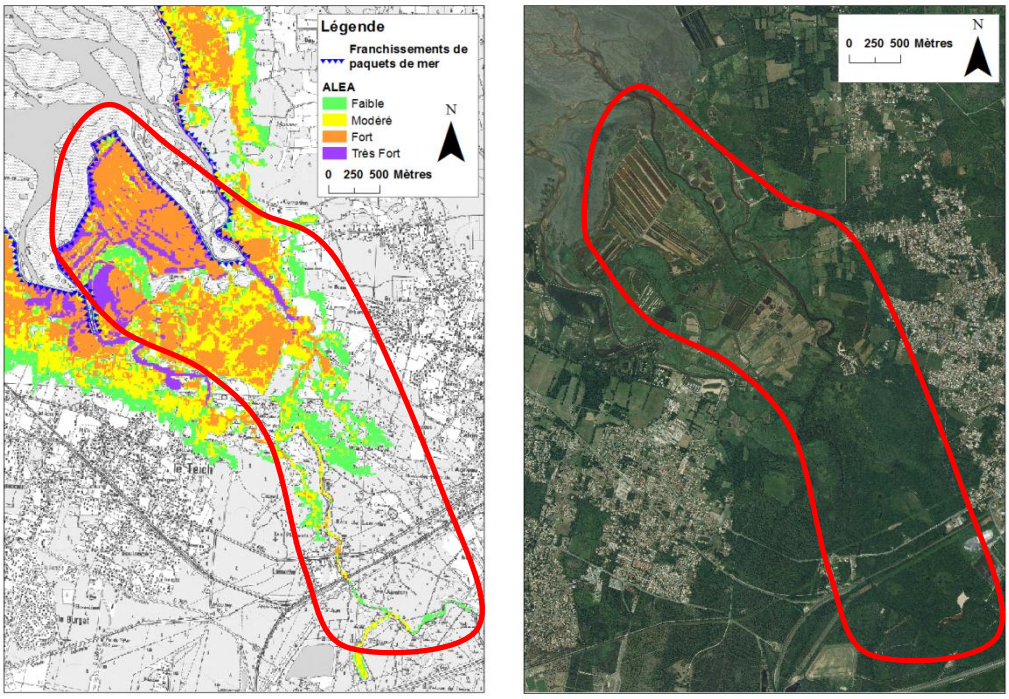


Figure 85 : Illustration de l'aléa de référence et orthophotographie 2009 de l'IGN sur le secteur L'Eyre (communes de Le Teich et de Biganos).

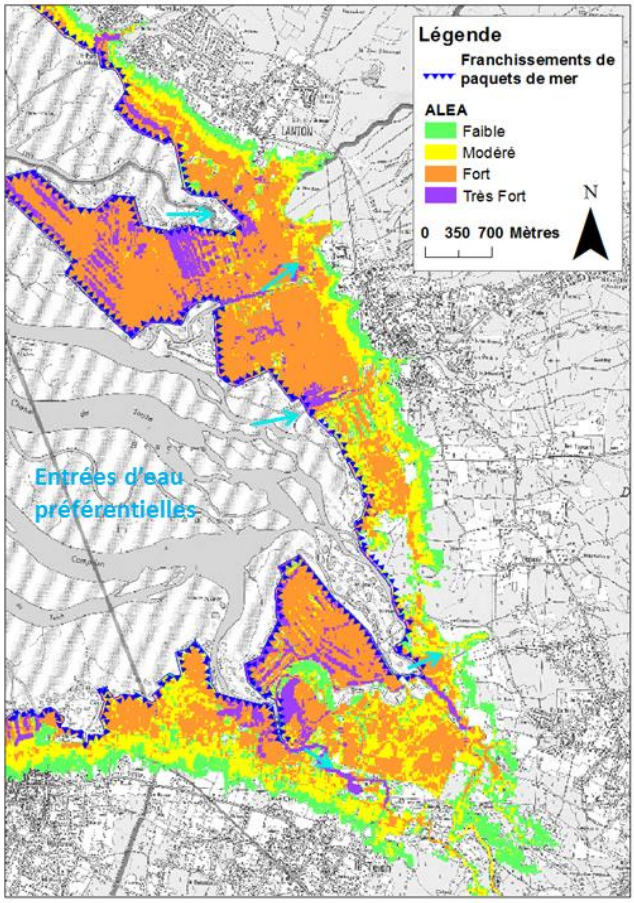


Figure 86 : Illustration des entrées d'eau préférentielles dans le secteur amont sud du Bassin d'Arcachon

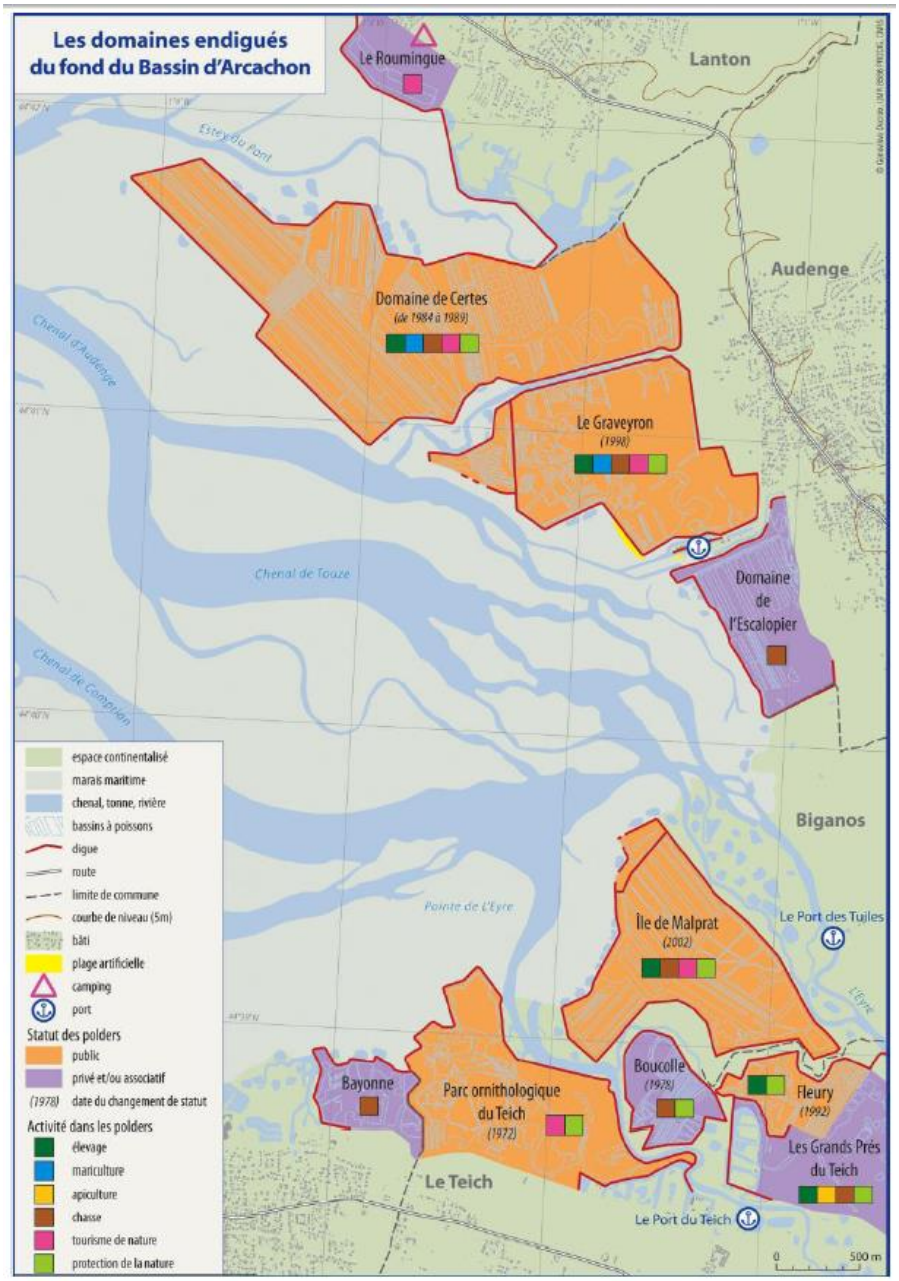


Figure 87 : Emprise du programme BARCASUB et cartes des usages (Rapport final BARCASUB, Goeldner-Gianella et al., juillet 2013).

8.4. AMONT DE LA LAGUNE - DELTA D'ARES – DE LANTON A CLAOUEY

Sur les communes de Lanton et d'Andernos-Les-Bains, l'aléa est globalement faible voire modéré. Il peut être fort à très fort au niveau des bassins endigués (Pointe des Quinconces), zones portuaires (Port ostréicole, Fontainevieille, Le Betey, Cassy, Taussat) et des cours d'eau. Quoi qu'il en soit, les classes d'aléa fort et très fort sont essentiellement liées à des hauteurs d'eau importantes (> 1 m). Les vitesses demeurent faibles (<0,2m/s) voire modérées (0,2 – 0,5 m/s).

A noter qu'à la limite communale entre Andernos-Les-Bains et Arès, le ruisseau de Cires représente une entrée d'eau préférentielle avec une large pénétration de la submersion à l'intérieur des terres associée à un aléa fort dans le secteur de Saint Brice.

Sur la commune d'Arès, c'est sur le secteur de la réserve des prés salés (depuis le nord du centre de vacances jusqu'à la limite communale avec Lège – Cap Ferret) que l'emprise de la submersion est la plus vaste. La zone des réservoirs étant une zone humide les hauteurs d'eau y sont assez importantes (1 à 2 m). Les vitesses y sont globalement faibles (< 0,2 m/s) voire modérées (0,2 – 0,5 m/s).

Le linéaire entre Lanton et Arès est particulièrement exposé à l'effet du clapot comme en témoignent par exemple les dégâts sur certains ouvrages (murs à Arès, perrés à Fontainevieille, …) et l'érosion de digue (Pointe des Quinconces) observés par le passé. Outre les chocs mécaniques, le clapot a pu contribuer significativement à des submersions marines dans le passé (Klaus et Xynthia par exemple) par franchissements de paquets de mer. A noter donc que cet effet du clapot est pris en compte dans la cartographie de l'aléa de référence par :

- une bande de sécurité en aléa très fort liée aux chocs mécaniques entre les 2 rangs d'ouvrage à Andernos-Les-Bains ;
- un figuré spécifique (triangles bleus) pour les franchissements de paquets de mer pouvant générer des vitesses très importantes et donc également un aléa très fort sur les premiers mètres du front de mer.

Les cartes qui présentent les résultats (aléa, hauteur et vitesse) sur ce secteur sont les cartes n° 13 à 19 présentées dans le dossier cartographique.

8.5. FAÇADE INTERNE DE LA FLECHE DU CAP FERRET

Sur la commune de Lège – Cap Ferret, hormis dans la partie Est de la réserve des prés salés d'Arès, la submersion marine pénètre peu à l'intérieur des terres du fait de l'altitude du terrain assez élevée par rapport au niveau marin de référence. En lien avec l'histoire de son édification, la flèche du Cap Ferret présente de nombreux points hauts correspondant à des dunes fixées boisées et/ou urbanisées et quelques cuvettes dans lesquelles se sont installés des quartiers ostréicoles notamment. Les secteurs les plus exposés sont donc Claouey (de Jane de Boy à Petit Piquey), les villages ostréicoles de Piraillan et de l'Herbe, ainsi que la zone portuaire de La Vigne et la zone urbaine de Bélisaire.

Les hauteurs d'eau sont globalement faibles à moyennes mais peuvent être supérieures à 1 m par endroits. En revanche, les vitesses d'écoulement demeurent faibles (< 0,2 m/s) au-delà des premiers mètres du front de mer exposés à des franchissements de paquets de mer impliquant des vitesses très fortes (> 2m/s).

La façade interne de la flèche du Cap Ferret est particulièrement exposée à l'effet des vagues (houle et clapot) de la Pointe jusqu'au village de l'Herbe comme en témoignent les dégâts dans les ouvrages. De ce fait, une bande de sécurité liée aux chocs mécaniques des vagues (largeur de 10 m) a été arrêtée par la DDTM de la Gironde au niveau de la zone la plus exposée : de la Pointe à la racine du Mimbeau.

Pour rappel, l'extrême Pointe du Cap Ferret a fait l'objet d'une caractérisation de l'aléa par une approche à dires d'expert. Les vitesses et hauteurs ne sont donc pas fournies sur ce secteur. Comme précisé dans le paragraphe 7.4.4, la rue du Tram représente une entrée d'eau préférentielle pour inonder une large zone basse.

Les cartes qui présentent les résultats (aléa, hauteur et vitesse) sur ce secteur sont les cartes n° 19 à 24 présentées dans le dossier cartographique.

9. Conclusion

La première phase de la caractérisation de l'aléa submersion marine pour l'élaboration des PPRL du Bassin d'Arcachon a débuté en 2012 par des analyses statistiques afin de déterminer un évènement naturel de référence, c'est-à-dire un évènement météo-marin centennal (ou ayant une probabilité de 0,01 de se produire chaque année, cf. rapport BRGM/RP-61408-FR). Elle a été complétée par une première estimation de l'emprise de la submersion pour cet évènement naturel de référence sans prise en compte du bâti (c'est-à-dire de l'occupation du sol) ni des structures de protection côtière. Pour cela c'est une approche dite « statique » qui avait été mise en œuvre (projection du niveau marin ou du volume d'eau sur la topographie) et qui a permis de produire des cartes informatives à une échelle 1/25 000 (cf. rapport BRGM/RP-62187-FR).

A l'issue de cette 1ère phase, la précision des consignes ministérielles (publication du guide méthodologique du MEDDE en mai 2014), la meilleure connaissance des mécanismes de submersion à l'échelle du Bassin et la mise en place de la concertation au sein d'un groupe de travail incluant le BRGM la DDTM de la Gironde et le SIBA ont permis de développer une approche plus fine de caractérisation de l'aléa submersion marine. L'intérêt majeur de cette approche dite « dynamique » est la représentation de la dynamique de la propagation de la submersion en tenant compte de l'occupation du sol (urbanisation plus ou moins dense, type de végétation, etc.) et du comportement des structures de protection côtière (ruine ou brèche des digues par exemple). **Les cartes d'aléa, hauteur d'eau et vitesse d'écoulement ont ainsi été produites à l'échelle 1/10 000. Ces cartes ne peuvent être exploitées à une échelle inférieure sous peine de fausser les résultats.**

Ce présent rapport avait donc pour objectif de rappeler les résultats de la phase 1 exploités dans cette seconde et dernière phase et de détailler la méthode et les résultats finaux pour l'élaboration des cartes d'aléa réglementaires du PPRL du Bassin d'Arcachon.

Pour rappel, la méthode de détermination de l'évènement naturel de référence a spécifiquement été développée pour l'élaboration des PPRL en Aquitaine (Bulteau et al., 2012). Cette méthode a été recommandée dans le guide méthodologique du MEDDE (mai 2014).

Les modèles numériques ont été mis en œuvre à une échelle adaptée à la configuration géomorphologique du Bassin d'Arcachon. Ils ont été calibrés et validés grâce à des mesures de terrain et des études antérieures.

La représentation du terrain (topographie, bathymétrie, occupation du sol, structures de protection côtières et connexions hydrauliques) a notamment été déterminée avec l'appui technique du SIBA et en concertation avec la DDTM de la Gironde. De même, les hypothèses de défaillance des structures de protection côtière et des connexions hydrauliques ont été définies en concertation avec la DDTM de la Gironde et le SIBA.

Ainsi le scénario de référence retenu pour représenter l'aléa de référence combine 1/ une hypothèse de ruine généralisée des digues d'Arès, de Lanton, de Gujan-Mestras et du camping des Viviers à Lège – Cap Ferret ainsi que des 2 rangs de murets à Andernos-Les-Bains et du cordon dunaire du Mimbeau à Lège – Cap Ferret ; **2/ des hypothèses de défaillances ponctuelles** des digues de La-Teste-de-Buch et du cordon dunaire de La Pointe à Lège – Cap Ferret.

Conformément aux consignes ministérielles, **l'aléa à échéance 100 ans** a également été caractérisé avec la même méthodologie que celle de l'aléa de référence, avec les mêmes hypothèses du comportement des structures de protection côtière mais avec l'ajout d'une élévation de 60 cm au niveau moyen de la mer au large pour la prise en compte du changement climatique (dont 20 cm sont déjà intégrés au niveau marin de l'évènement naturel de référence).

Outre la caractérisation de l'aléa, c'est-à-dire la transcription spatiale à terre des impacts d'un évènement naturel météo-marin, l'élaboration d'un PPRL requiert la caractérisation des enjeux, c'est-à-dire des usages, du bâti, des personnes, etc., susceptibles d'être exposés à l'aléa. Le croisement de l'aléa et des enjeux permet ensuite de définir le risque sur lequel est basée la réglementation du PPRL.

Dans le cadre des PPRL du Bassin d'Arcachon, le BRGM a été chargé par l'État de caractériser l'aléa. Les étapes de caractérisation des enjeux, de détermination du risque puis de conception du règlement sont réalisées par l'État, la DDTM de la Gironde en l'occurrence.

10. Bibliographie

Allard J., Bertin X., Chaumillon E. et Pouget, F. (2008) **-** Sand spit rhythmic development : A potential record of wave climate variations ? Arçay Spit, western coast of France, Marine Geology, 253 (3–4), 107–131

Allard J., Chaumillon E. et Fenies H. (2009) – A synthesis of morphological evolutions and Holocen stratigraphy of a wave dominated estuary: The Arcachon lagoon, SW France. *Continental Shelf Research,* 29, 957-969.

Booij N., Ris R.C. and Holthuijsen L.H., (1999) - A third-generation wave model for coastal regions, Part I: Model description and validation, *J. Geophys. Res.,* **104**, C4, 7649-7666.

Bouchet JM. (1968) - *Etude océanographique des chenaux du Bassin d'Arcachon (Gironde)*. Thèse Faculté des Sciences de l'Université de Bordeaux, 2 vol., 306 p.

Bouchet JM. (1974) - Le Bassin d'Arcachon. Evolution, hydrologie, écologie du Bassin. *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine*, Bordeaux, 15, 15-30.

Bouchet JM., Deltreil JP., Manaud F., Maurer D. Trut G. et al. (1997) – Etude intégrée du Bassin d'Arcachon. Tome 1 - Rapport IFREMER R.INT.DEL/97.09/ARCACHON.

Brown J. D., Spencer T., and Moeller I.: Modelling storm surge flooding of an urban area with particular reference to modelling uncertainties: a case study of Canvey Island, United Kingdom, Water Resour. Res., 43, W06402, doi:10.1029/2005WR004597, 2007.

Bulteau T., Delvallée E., Thiébot J., Pédreros R. (2012) - Retour d'expérience sur l'utilisation des probabilités conjointes pour la caractérisation de niveaux marins à la côte. XIIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Cherbourg, 12-14 juin 2012, DOI:10.5150/jngcgc.2012.001-B

Bulteau T., Mugica J., Mallet C., Garnier C., Rosebery D., Maugard F., Nicolae Lerma A., Nahon A. avec la collaboration de Millescamps B. (2014) - Évaluation de l'impact des tempêtes de l'hiver 2013-2014 sur la morphologie de la Côte Aquitaine. BRGM/RP-63797-FR, 68 p., 138 fig., 8 tab., 2 ann.

Bulteau T., Mugica J., Paris F., Pedreros R. (2013) - Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre des PPRL dans les Landes. Détermination de l'évènement naturel centennal. BRGM/RP-62043-FR, 68 p.

Bunya S., Dietrich J.C., Westerink J.J., Ebersole B.A., Smith J.M., Atkinson J.H., et al., (2010) - A high resolution coupled riverine flow, tide, wind, wind wave and storm surge model for southern Louisiana and Mississippi: Part I — model development and validation. Monthly Weather Review 138, 345–377.

Caspari E. (1872). *Rapport sur l'exploration des passes d'Arcachon*, Dépôt des cartes et plans de la marine, France, 32 p.

Castelle B. et Bonneton P. (2002). Wave-induced currents over the Aquitanian coast sand bars. 8th International Symposium on Oceanography of the Bay of Biscay.

Castelle B., Bonneton P., Dupuis H., Senechal N. (2007) - Double bar beach dynamics on the high-energy meso-macrotidal French Aquitanian coast : a review, Marine Geology, 245, 141-159.

CEREMA (2015) – Fiches synthétiques de mesure des états de mer. ISBN : 978-2-37180-005-2, 567 pages.

CETE SO (2012) - Submersions marines sur le Bassin d'Arcachon. Etude historique. Rapport de novembre, version 2, 47 p.

Dubreuil J. et al. (1995) - Dynamique d'un comblement continental néogène et quaternaire : l'exemple du bassin d'Aquitaine. *Géologie de la France*, 4, p. 3-26.

Dupuis H., Michel D., Sottolichio A. (2006) - Wave climate evolution in the Bay of Biscay over two decades, Journal of Marine Systems, 63 (3-4), 105-114.

Durst P. (2009) – Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine – Géologie et hydrogéologie des réservoirs plio-quaternaires dans le secteur du Bassin d'Arcachon. Module 1 – Année 1 – Rapport BRGM/RP-57807-FR, 90 p., 33 fig., 5 tab., 3 ann.

Feniès H. (1984) - *Faciès, séquences et géométrie des dépôts de chenaux de Marée du Bassin d'Arcachon : une lagune mésotidale*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, 278 p.

Gassiat L. (1989) - *Hydrodynamique et évolution sédimentaire d'un système lagune-flèche littorale*, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I, 276 p.

Goeldner-Gianella et al., (2013) - Rapport final BARCASUB.

Goutx D. et Ladreyt S. (2001) - Hydraulique des cours d'eau. La théorie et sa mise en pratique, CETMEF (CEREMA) NR25,

Hawkes P.J., Gouldby B.P., Tawn J.A., Owen M.W. (2002) - The joint probability of waves and water levels in coastal engineering design. Journal of Hydraulic Research, Vol. 40, n° 3, pp 241-251. doi:10.1080/00221680209499940.

Kingebiel A., Platel J-P (2001) – Histoire géologique et structures profondes du triangle landais. Actes du colloque de Brocas (mars 2000). Travaux et Colloques scientifiques, PNR Landes de Gascogne, edt, n°3 p11-33.

L'Yavanc J. (1995).- Evolutions bathymétriques et morphologiques du Bassin d'Arcachon. Rapport interne, Ifremer DEL/95-12.

Lazure P. et 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.

LCHF (1979) - Etude en nature de la côte Aquitaine, rapport général.

LE ROY R. et SIMON B. (2003) - Réalisation et validation d'un modèle de marée en Manche et dans le Golfe de Gascogne. Application à la réalisation d'un nouveau programme de réduction des sondages bathymétriques. Rapport technique, EPSHOM, Rapport n°002/03.

Mallet C., Idier D., Thiébot J., Le Nindre Y.M., Mugica J., Roche A. (2009) - Submersions marines à Andernos-Les-Bains (Gironde) et aménagements de protection. Avis et recommandations. BRGM/RP-57462-FR, 20 ill., 10 tab., 52 p.

Mauroux B., Capdeville JP Ducasse G. (2007) – Gestion des eaux sousterraines en région Aquitaine. Géologie et hydrogéologie des réservoirs plio-quaternaires dans le secteur du Bassin d'Arcachon – Module 1 – Année 3 – BRGM/RP-55239-Fr, 56p., 24 fig., 3 ann.

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

MEDDTL (2011) - Circulaire du 27 juillet 2011 relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux. NOR : DEVP1119962C, BO 2011/15 du 25 août 2011.

MEDDTL (2011) - Premiers éléments méthodologiques pour l'élaboration des PPRL Analyse et cartographie des aléas littoraux. Version 11 de novembre 2011, 90 p.

Michel D., Howa H. (1997) **-** Morphodynamic behaviour of a tidal inlet system in a mixed-energy environment, *Physics and Chemistry of the Earth*, 22(3–4), 339–343.

Mugica J. et Mallet C. (2009) - Ouvrages de protection contre la submersion marine à Andernos-Les-Bains (33). Avis et recommandations. Rapport BRGM/RP-57902-FR, 17 p., 3 fig.

Mugica J., Bulteau T., Paris F., Pedreros R., Delvallée E. (2014) **-** Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre du Bassin d'Arcachon (Gironde), Détermination de l'évènement naturel de référence. BRGM/RP-61408-FR, 73 p., 2 ann.

Mugica J., Delvallée E., Pédreros 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., 64 fig., 14 tab., 6 ann.

Mugica J., Pedreros R., Paris F., Garcin M., Oliveros C. (2014) - Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre des PPRL du Bassin d'Arcachon (Gironde). Approche statique à titre informatif pour la cartographie des aléas actuel et 2100 sans ouvrage. BRGM/RP-62187-FR, 71 p., 6 ann.

Muteau L. (2014) - « Caractérisation des seiches portuaires le long du littoral français ». Stage encadré par André G. au SHOM, Rapport technique final du projet NIVEXT N° 36 SHOM/DOPS/HOM/HDC/NP, SHOM.

Pedreros R., Dupuis H. et al (2005) - Evaluation du potentiel de l'imagerie SPOT5 dans le secteur du Bassin d'Arcachon. BRGM/RP-54004-FR, 54 p., 3 tb., 18 fig., 2 ann.

Pineau-Guillou, (2010) - Caractérisation des niveaux marins et modélisation des surcotes pendant la tempête Xynthia. XIèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil Les Sables d'Olonne, 22-25 juin 2010, DOI:10.5150/jngcgc.2010.073-P

Plus M., Dumas, F. Stanisière, J.-Y. et Maurer, D. (2006) **-** Caractérisation des composantes hydrodynamiques d'une lagune mésotidale, le Bassin d'Arcachon. Rapport Ifremer Nov. 2006 – RST/LER/AR/06.007, 54p.

SHOM (2012) - Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique). Rapport SHOM, 144 p., 2 ann.

SHOM (2014) **-** Références Altimétriques Maritimes. Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée, 114 p.

SHOM, CETMEF (2012) - Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantiques), 160 p.

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

Annexe 1

Fiche de synthèse de la station de mesure de débits de L'Eyre à Salles

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE

L'Eyre à Salles

SYNTHESE : données hydrologiques de synthèse (1967 - 2016)

Calculées le 08/02/2016 - Intervalle de confiance : 95 %

Code Station : S2242510 **Producteur :** DREAL Aquitaine

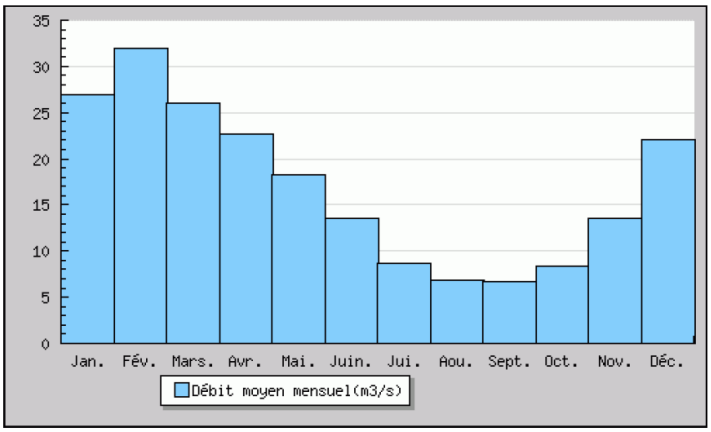
Bassin versant : 1650 km² **E-mail :** Bernard.GAILLARD@developpement-durable.gouv.fr

Ecoulements mensuels (naturels) - données calculées sur 50 ans

	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
Débits (m3/s)	26.90 #	32.00 #	26.00 #	22.70 #	18.20 #	13.60 #	8.720 #	6.900 #	6.690 #	8.380 #	13.60 #	22.10 #	17.10
Qsp (l/s/km2)	16.3 #	19.4 #	15.7 #	13.8 #	11.0 #	8.3 #	5.3 #	4.2 #	4.1 #	5.1 #	8.2 #	13.4 #	10.3
Lame d'eau (mm)	43 #	48 #	42 #	35 #	29 #	21 #	14 #	11 #	10 #	13 #	21 #	35 #	327

Qsp : débits spécifiques

Codes de validité d'une année-station :
. + : au moins une valeur d'une station antérieure à été utilisée
. P : le code de validité de l'année-station est provisoire
. # : le code de validité de l'année-station est validé douteux
. ? : le code de validité de l'année-station est invalidé
. (espace) : le code de validité de l'année-station est validé bon



Codes de validité d'une donnée, d'un calcul:
. ! : valeur reconstituée par le gestionnaire et jugée bonne
. # : valeur 'estimée' (mesurée ou reconstituée) que le gestionnaire juge incertaine
. E : la valeur retenue est une valeur estimée (à partir du rapport QIX/QJ)
. L : une estimation a eu lieu (à cause d'une lacune dans la période étudiée) mais une valeur mesurée s'est révélée supérieure à l'estimation: la valeur mesurée a été retenue.
. > : valeur inconnue forte
. < : valeur inconnue faible
. (espace) : valeur bonne

Modules interannuels (naturels) - données calculées sur 50 ans

Module (moyenne)
17.10 [15.90;18.20]

Fréquence	Quinquennale sèche	Médiane	Quinquennale humide
Débits (m3/s)	13.00 [12.00;14.00]	17.00 [15.00;20.00]	21.00 [20.00;23.00]

Les valeurs entre crochets représentent les bornes de l'intervalle de confiance dans lequel la valeur exacte du paramètre estimé a 95% de chance de se trouver.

eaufrance

L'Eyre à Salles

Basses eaux (loi de Galton - janvier à décembre) - données calculées sur 50 ans

Fréquence	VCN3 (m3/s)	VCN10 (m3/s)	QMNA (m3/s)
Biennale	5.600 [5.300;5.800]	5.700 [5.500;6.000]	6.000 [5.800;6.300]
Quinquennale sèche	4.800 [4.600;5.100]	4.900 [4.700;5.200]	5.200 [4.900;5.400]
Moyenne	5.650	5.780	6.110
Ecart Type	0.931	0.949	1.050

Crues (loi de Gumbel - septembre à août) - données calculées sur 48 ans

Fréquence	QJ (m3/s)	QIX (m3/s)
Xo	56.800	57.200
Gradex	27.600	28.000
Biennale	67.00 [61.00;74.00]	67.00 [61.00;75.00]
Quinquennale	98.00 [90.00;110.0]	99.00 [90.00;110.0]
Décennale	120.0 [110.0;140.0]	120.0 [110.0;140.0]
Vicennale	140.0 [120.0;160.0]	140.0 [130.0;160.0]
Cinquantennale	160.0 [150.0;190.0]	170.0 [150.0;200.0]
Centennale	Non calculée	Non calculée

Maximums connus (par la banque HYDRO)

Débit instantané maximal (m3/s)	128.0 #	11/11/2000 13:46
Hauteur maximale instantanée (cm) *	420	30/01/2014 21:00
Débit journalier maximal (m3/s)	125.0 #	11/11/2000

** la synthèse étant effectuée sur la chronique complète de données (station ET stations antérieures comprises s'il en existe), la hauteur maximale connue affichée peut provenir d'une station antérieure*

Débits classés données calculées sur 17568 jours

Fréquences	0.99	0.98	0.95	0.90	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01
Débit (m3/s)	78.50	67.00	49.50	36.40	24.10	18.20	14.30	11.20	9.050	7.540	6.750	5.790	5.240	4.720	4.470

Stations antérieures utilisées

Pas de station antérieure

Annexe 2

Tests de sensibilité au vent

L'analyse statistique a montré que pour l'évènement de référence, les vents associés sont de 13,2 m/s de direction 270-275°N. Toutefois, l'impact de vent d'intensités inférieures et supérieures et de directions différentes a été testé afin de caractériser leurs influences sur la submersion marine.

Le chainage du modèle SWAN/MARS-2DH (emprise R0) et l'emboitement du modèle d'inondation (R1 Sud) ont été utilisés pour simuler l'évènement naturel actuel. Cette configuration a été rejouée 4 fois en faisant varier la vitesse du vent et la direction (°Nord) comme suit : (10 m/s et 260°N) ; (10m/s et 280°N) ; (15m/s et 260°N) ; (15m/s et 280°N). Les autres paramètres de forçages (niveau marin et vagues) restent identiques à ceux de la simulation d'évènement naturel actuel (combinaison n°7 – cf. 3.2.2).

Les résultats de ces tests montrent que :

- les différences sur les niveaux d'eau à l'intérieur du Bassin sont inférieures à 5 cm,
- le scénario vent 15 m/s direction 260°N est le plus pénalisant en terme de surface totale inondée,
- le scénario vent 10 m/s direction 280°N est le plus optimiste en terme de surface totale inondée,

A l'issue des tests on constate que :

- la sensibilité aux conditions testées est faible sur l'extension de l'inondation (+3,2 % d'augmentation)
- la sensibilité aux conditions testées est faible sur l'augmentation des aléas (+6.8 % d'augmentation pour l'aléa fort)

Ces augmentations ou réductions des zones inondées sont considérées comme faibles au regard des surfaces inondées lors du scénario de référence. Les différences sont dues aux très faibles dénivelés dans certains secteurs et au dépassement de valeur seuil lors de la classification sous forme d'aléa.

Scénario de vent testé (couple vitesse / direction) =>	REF : Vent 13,2 m/s et 270°N	Vent 10 m/s et 260°N	Vent 10 m/s et 280°N	Vent 15 m/s et 260°N	Vent 15 m/s et 280°N
Surface en aléa faible (en Ha)	441	1.5%	1.7%	-0.8%	1.6%
Surface en aléa moyen (en Ha)	568	1.7%	2.0%	-4.2%	-1.6%
Surface en aléa fort (en Ha)	1380	-7.3%	-9.6%	6.8%	3.1%
Surface en aléa très fort (en Ha)	34	-22.2%	-28.6%	31.6%	9.2%
Surface totale inondée (en Ha)	2423	-3.8%	-5.1%	3.2%	1.8%

Tableau 8 : Différences en surface selon les scénarios, par rapport aux conditions de l'évènement de référence.

Annexe 3

Comparaison des niveaux de période de retour centennale à Arcachon-Eyrac (SHOM vs BRGM)

Dans son rapport de 2012 « Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France », le SHOM a calculé à partir des mesures à différents marégraphes (dont celui d'Arcachon-Eyrac) les niveaux marins de différentes périodes de retour (5, 10, 20, 50, 100 ans).

La méthode d'analyse statistique du SHOM-CETMEF a été comparée à celle du BRGM (Bulteau et al., 2012). Pour cela, le même jeu de données issu du marégraphe d'Arcachon-Eyrac a été utilisé. Cette comparaison a permis de déduire un écart de seulement 5 cm entre les 2 méthodes (Tableau 9 et Figure 88). D'autre part, à partir de ce Tableau 9, la période de retour du niveau marin maximal mesuré lors de la tempête Xynthia au marégraphe a pu être estimée entre 20 et 50 ans (Tableau 9).

Niveaux extrêmes de pleines mers (en m) à Arcachon-Eyrac exprimés en référence au zéro de l'IGN (rattachement effectué à partir des Références Altimétriques Maritimes de 2011)					
Périodes de retour (années)	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
Niveaux SHOM-CETMEF	**3.22**	**3.31**	**3.40**	**3.51**	**3.60**
valeur sup.inter.de confiance à 95%	*3.34*	*3.45*	*3.56*	*3.73*	*3.88*
Niveaux BRGM	***3.28***	***3.37***	***3.45***	***3.56***	***3.65***
valeur inf.interv.de confiance à 95%	*3.23*	*3.30*	*3.37*	*3.44*	*3.50*

Tableau 9 : Comparaison des niveaux marins de différentes périodes de retour issus des méthodes de calcul du SHOM et du BRGM appliquées aux mesures du marégraphe d'Arcachon-Eyrac.

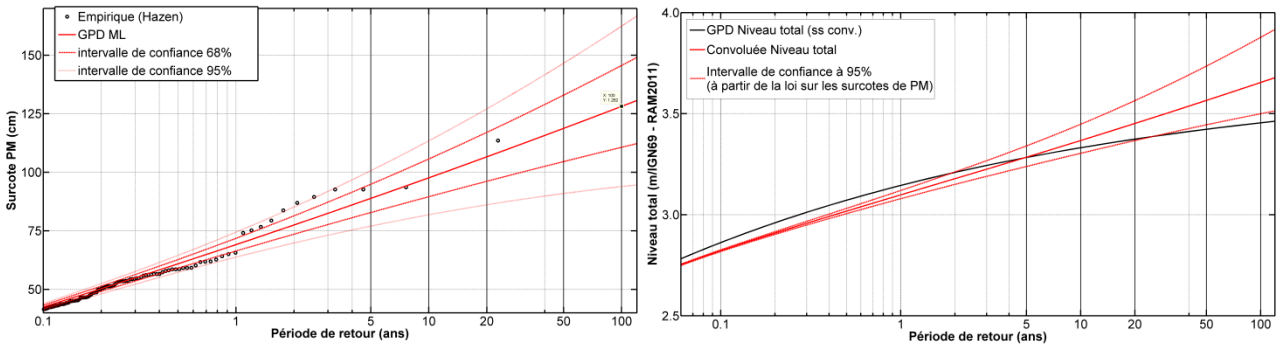


Figure 88 : A gauche : ajustement statistique d'une loi GPD aux données de surcote marine issues des mesures du marégraphe d'Arcachon-Eyrac ; à droite : loi de probabilité sur les niveaux totaux issue de la convolution surcote-marée.

Annexe 4

Identification des structures de protection côtière et modalités de leur prise en compte dans le PPRL du Bassin d'Arcachon

Digues sur la commune de La-Teste-de-Buch

Le scénario de référence retenu pour ces ouvrages est un scénario de défaillances ponctuelles (brèches + ruine de certains tronçons).

Un scénario de ruine généralisée ainsi qu'un scénario avec les ouvrages fonctionnels ont été réalisés à titre informatif.

Figure 89 : Digue Johnston (©Observatoire de la Côte Aquitaine).

Figure 90 : Digues des Prés Salés Est (Olivier Chaldebas, ULM Sud Bassin, 2014).

Figure 91 : Digues des Prés Salés de la Hume et digue Safran (Olivier Chaldebas, ULM Sud Bassin, 2014).

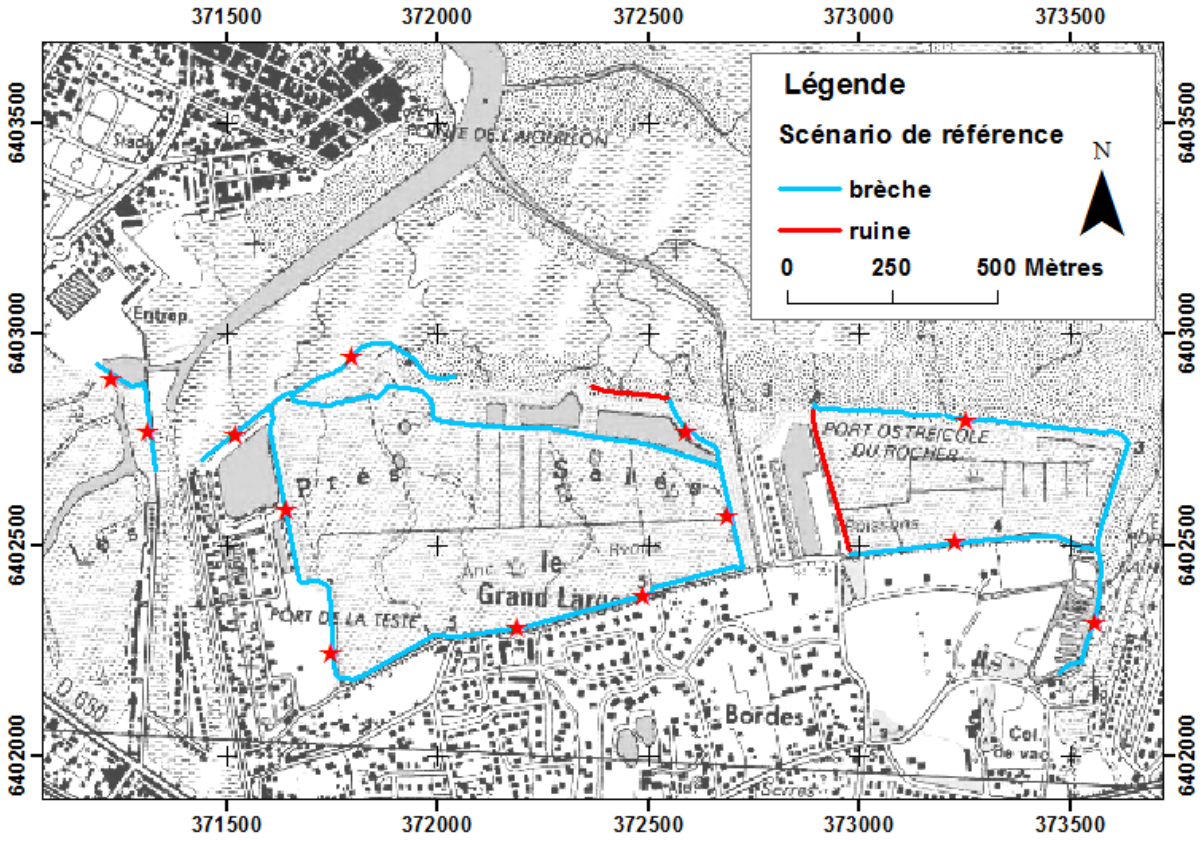


Figure 92 : Hypothèses de défaillances pour le scénario de référence (étoiles rouge : localisation des brèches).

Digues sur la commune de Gujan-Mestras

Le scénario de référence retenu pour ces ouvrages est un scénario de ruine généralisée.

Un scénario de défaillances ponctuelles (brèches) a été réalisé à titre informatif pour la digue du Lycée de la Mer.

Figure 93 : Digue de La Hume à Meyran (Olivier Chaldebas, ULM Sud Bassin, 2014).

Figure 94 : Digue des malines de l'Ascol et d'Ostrea Edulis à gauche (orthophotographie 2009, IGN), digue du Lycée de la Mer à droite (Olivier Chaldebas, ULM Sud Bassin, 2014).

Digues sur la commune de Lanton

Le scénario de référence retenu pour ces ouvrages est un scénario de ruine généralisée.

Un scénario de défaillances ponctuelles (3 brèches) a été réalisé à titre informatif.

Figure 95 : Digue du camping du Roumingue et Bassins endigués (Olivier Chaldebas, ULM Sud Bassin, 2014).

Murets sur la commune d'Andernos-Les-Bains

Le scénario de référence retenu pour ces ouvrages est un scénario de ruine généralisée.

Un scénario de défaillances ponctuelles (brèches) a été réalisé à titre informatif.

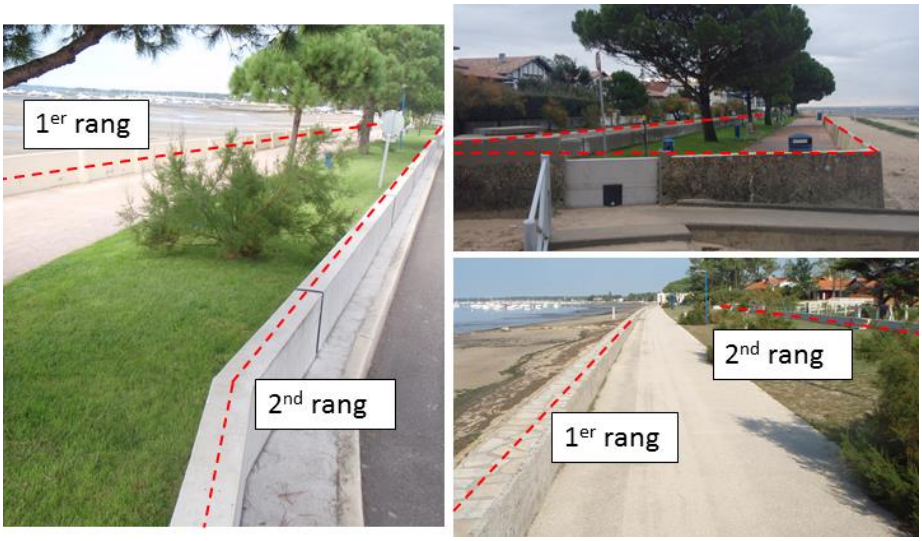


Figure 96 : Deux rangs de murets sur la promenade du quartier du Mauret (©BRGM, octobre 2013).

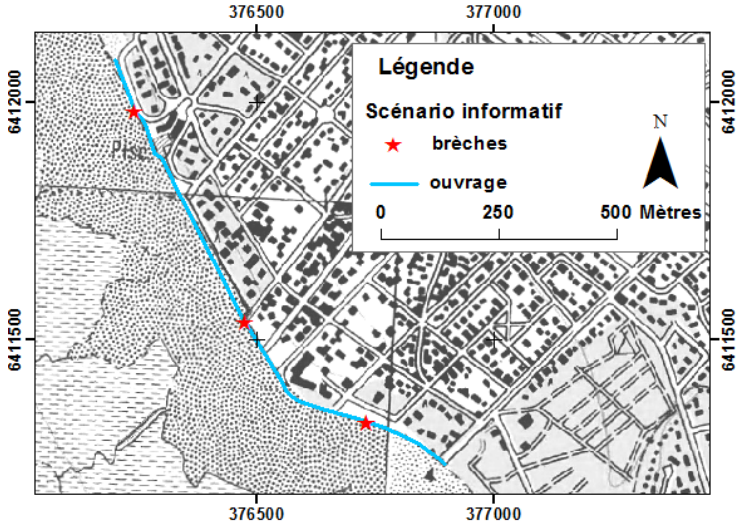


Figure 97 : Scénario de défaillances ponctuelles réalisé à titre informatif.

Digues sur la commune d'Arès

Le scénario de référence retenu pour ces ouvrages est un scénario de ruine généralisée.

Figure 98 : Digue du CCAS (Olivier Chaldebas, ULM Sud Bassin, 2014).

Digues et cordon dunaire sur la commune de Lège-Cap Ferret

Le scénario de référence retenu pour la digue du camping des Viviers et le cordon dunaire du Mimbeau est un scénario de ruine généralisée (Figure 99 et Figure 100).

Pour le cordon dunaire de la Pointe c'est un scénario de défaillances ponctuelles (2 brèches) qui a été retenu comme scénario de référence (Figure 101).

Un scénario de défaillances ponctuelles a été réalisé pour le cordon dunaire du Mimbeau : il comporte 4 brèches de 60 à 100 m de largeur (Figure 102) définie à partir des brèches constatées et mesurées lors des tempêtes de l'hiver 2013-2014 par l'Observatoire de la Côte Aquitaine (Figure 99, Rapport BRGM/RP-63182-FR).

Figure 99 : Digue du camping des Viviers et cordon dunaire du Mimbeau (©Observatoire de la Côte Aquitaine, février 2015, Olivier Chaldebas, ULM Sud Bassin, 2014).

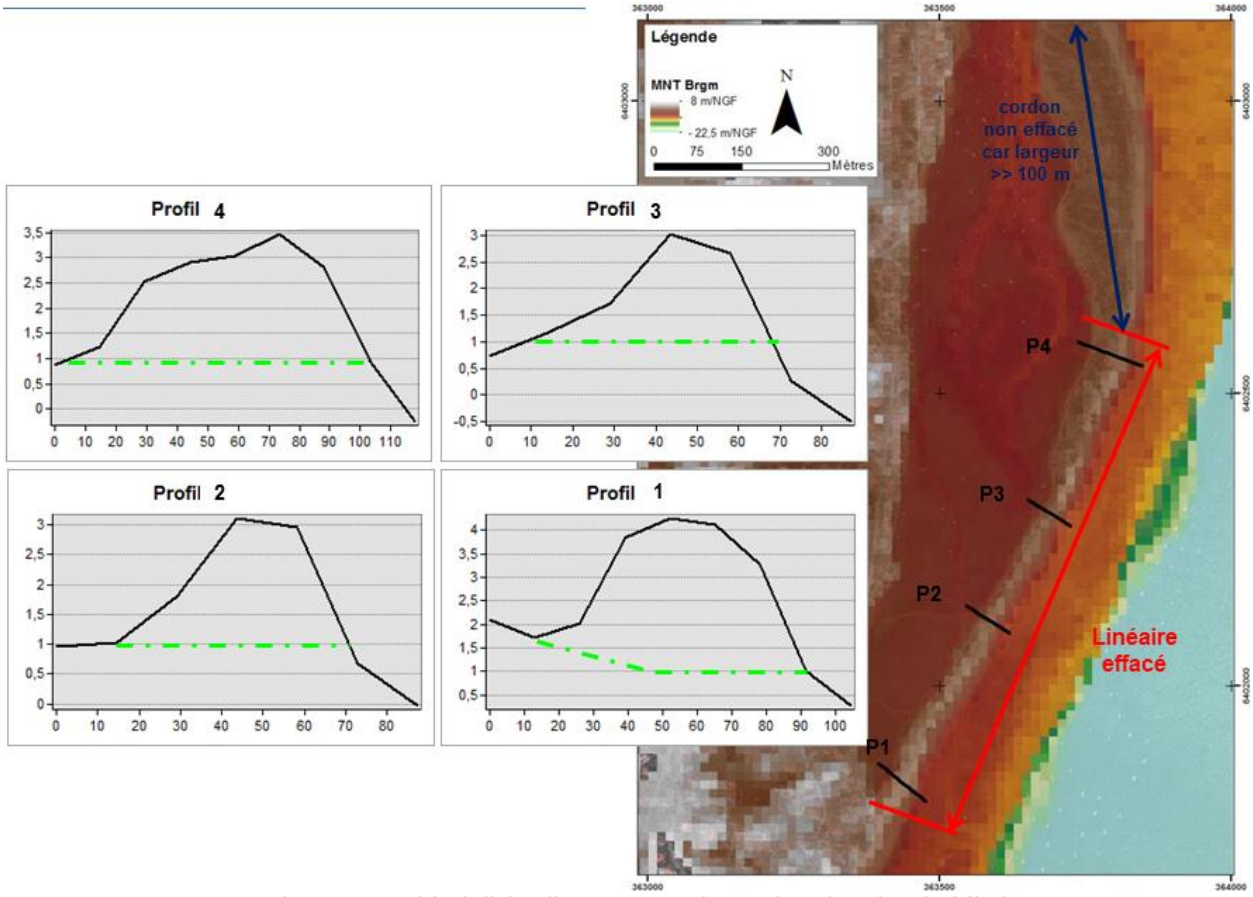


Figure 100 : Modalités d'arasement du cordon dunaire du Mimbeau.

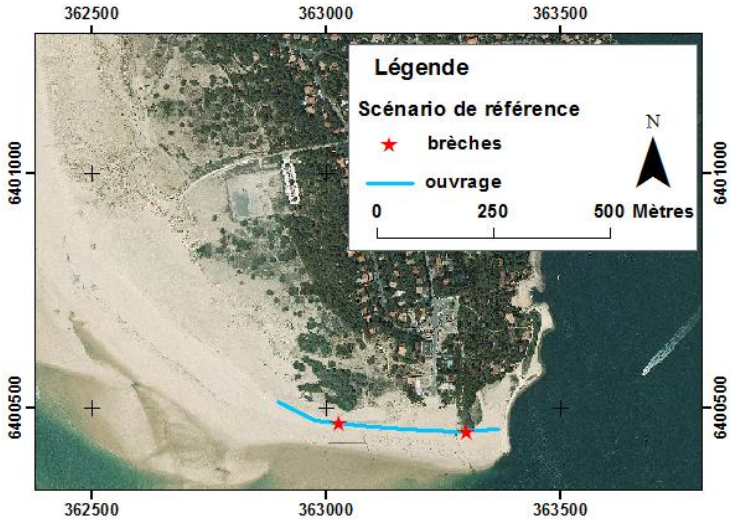
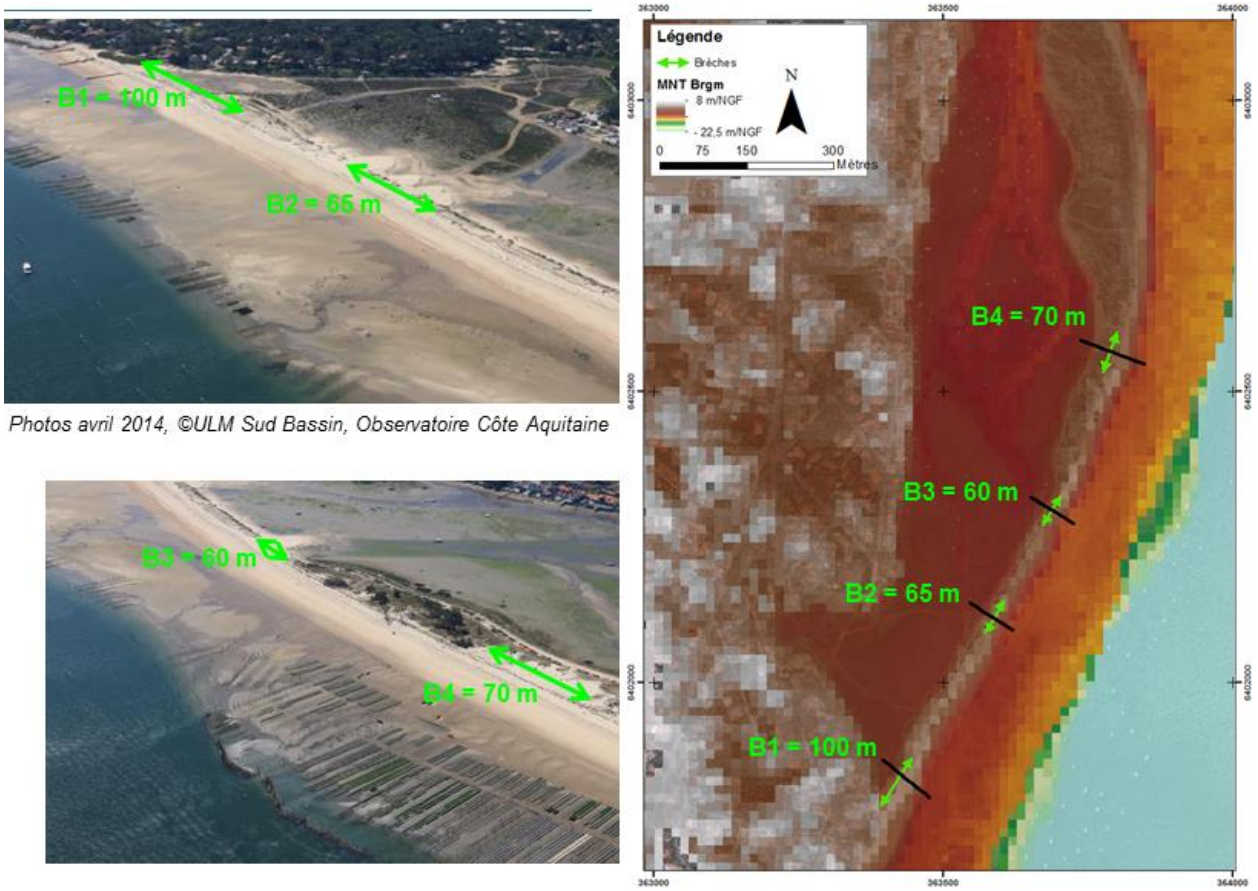


Figure 101 : Cordon dunaire de la Pointe (Olivier Chaldebas, ULM Sud Bassin, 2014).



Photos avril 2014, ©ULM Sud Bassin, Observatoire Côte Aquitaine

Figure 102 : Hypothèses de brèches pour le scénario de défaillances ponctuelles sur le cordon dunaire du Mimbeau réalisé à titre informatif.

Annexe 5

Description et paramétrisation des codes de modélisation NUMERIQUE

Le code de calcul MARS (Lazure et Dumas, 2007)

Le modèle MARS-2DH résout les équations de Saint-Venant qui régissent les écoulements à surface libre en deux dimensions sur le plan horizontal, après une intégration verticale des équations de Navier Stokes. La résolution des équations est réalisée par discrétisation spatiale et temporelle selon une méthode aux différences finies. Ceci revient à calculer sur un maillage régulier en longitude et latitude, les grandeurs physiques (niveau d'eau et vitesse/direction du courant), en chaque point et à chaque pas de temps.

Pour l'action du vent, la paramétrisation de la tension du vent de surface utilisée dans le modèle numérique est celle de Moon et al. (2007).

Des paramétrisations spécifiques du modèle pour l'amélioration de la propagation et du recouvrement / découvrement des zones inondables (bancs découvrants, zones intertidales, etc.) sont utilisées. Il est tenu compte implicitement d'un remplissage (respectivement vidange) partiel des mailles en prenant en compte la fraction de maille qui est réellement mouillée (fixée à 5 % de la surface totale de la maille dans les simulations).

Par ailleurs, des seuils de hauteurs d'eau minimales, fixées à 1 cm dans les simulations, pour que les mailles soient considérées comme sèches, humides ou partiellement humides ont été définies : tant que $H < 1$cm la maille est considérée comme sèche, dès que $H > 1$cm la maille est considérée en eau et les écoulements peuvent être calculés.

Le code de calcul SWAN (Booij et al., 2004)

SWAN est basé sur l'équation spectrale de conservation de l'action de la houle qui est résolue suivant un schéma implicite en différences finies.

Lors des simulations, la paramétrisation utilisée est de type GEN3 avec une discrétisation des conditions de vagues en sortie du modèle de 2 à 20 secondes en fréquence et de 10° en direction.

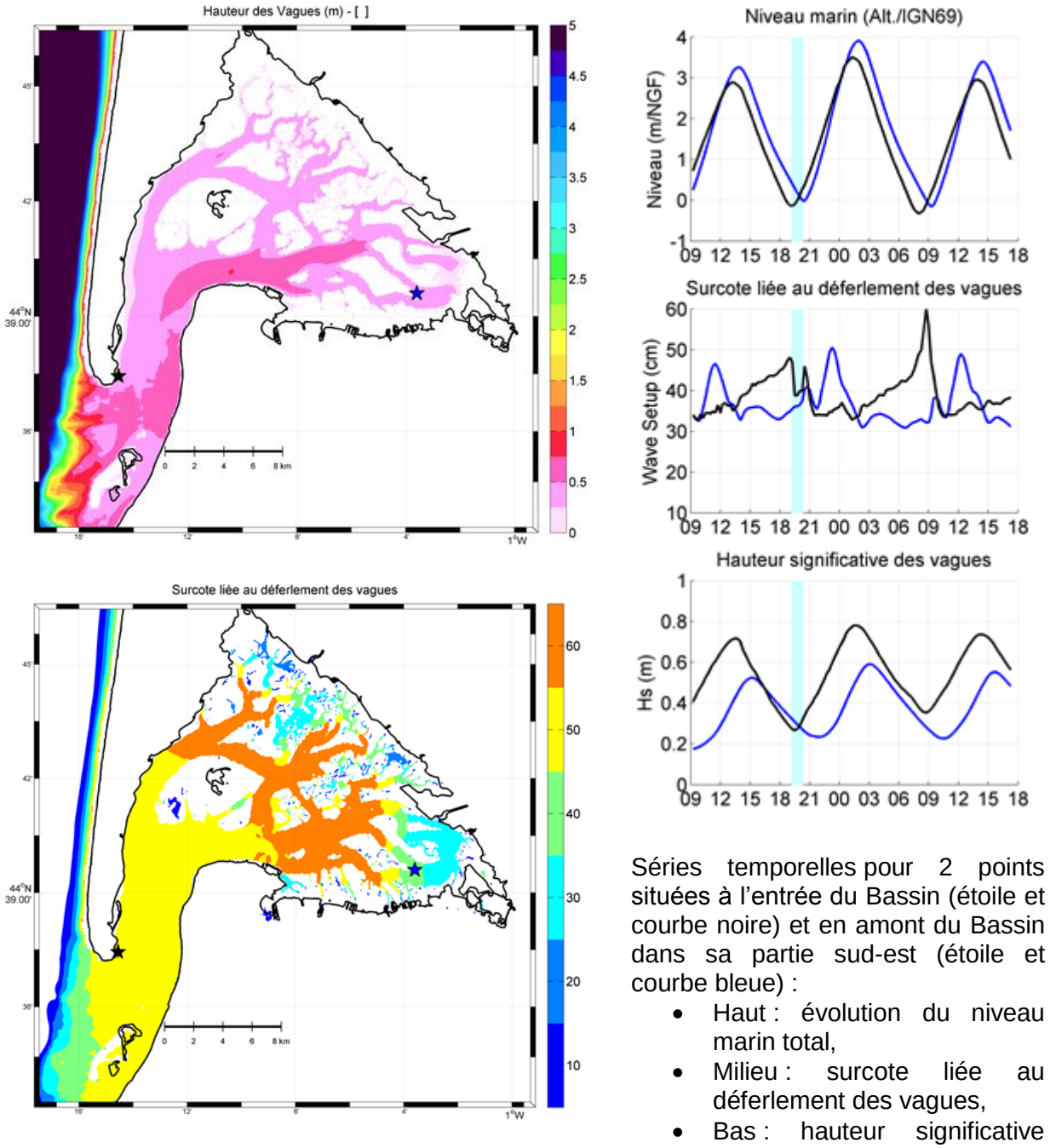
Le code de calcul SWASH (Zijlema et al. 2011).

SWASH résout les équations de Saint-Venant non linéaires (*non linear shallow water*) en incluant les termes non-hydrostatiques de la pression.

Lors de simulation le modèle a été utilisé en configuration 2DV, soit en mode multicouches, non hydrostatique.

Annexe 6

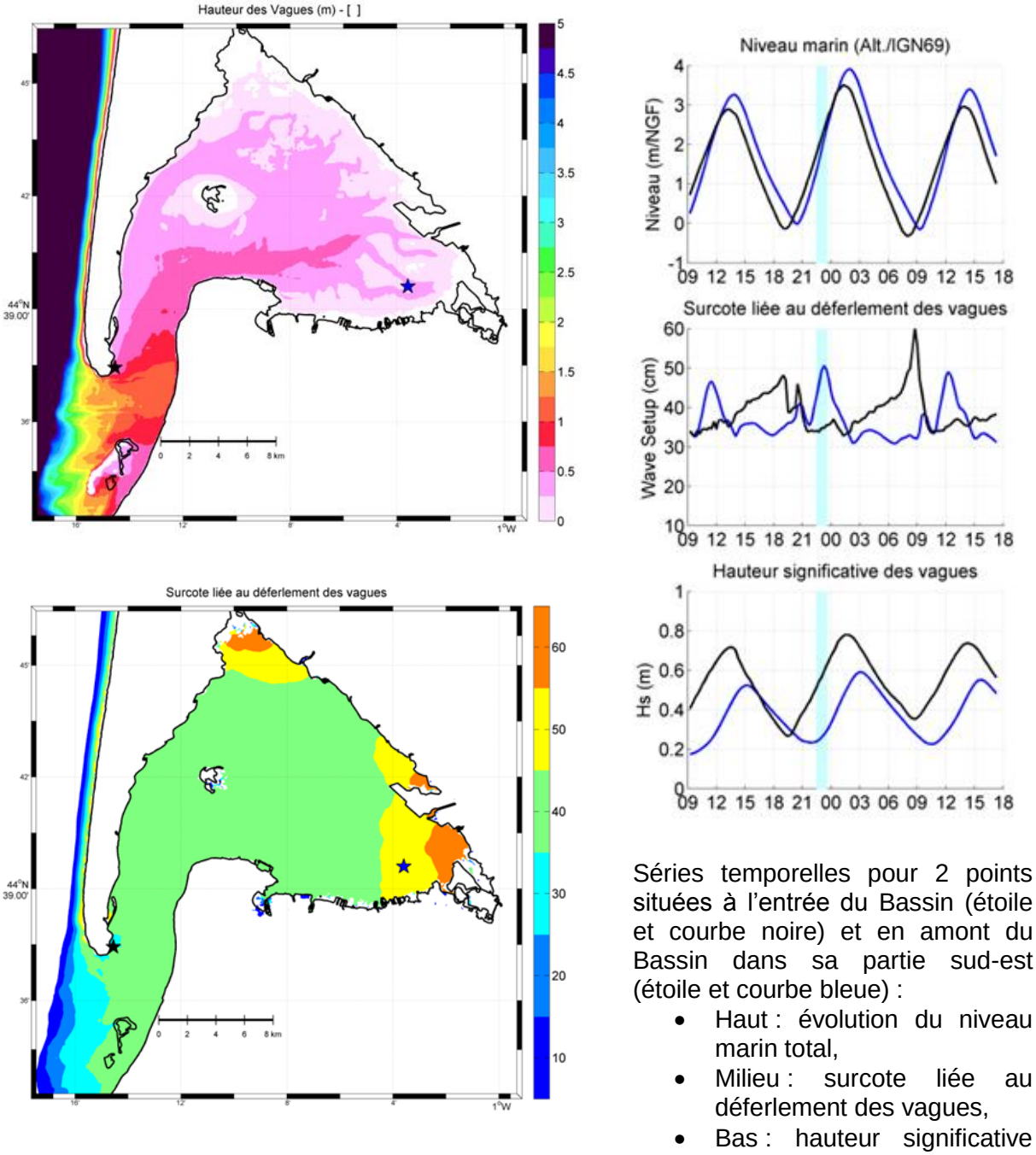
Resultats de modélisation à l'échelle du Bassin d'Arcachon



Séries temporelles pour 2 points situées à l'entrée du Bassin (étoile et courbe noire) et en amont du Bassin dans sa partie sud-est (étoile et courbe bleue) :

- Haut : évolution du niveau marin total,
- Milieu : surcote liée au déferlement des vagues,
- Bas : hauteur significative des vagues

*Figure 103 : Cartes des hauteurs significative des vagues (haut) et des surcotes liées au déferlement des vagues (bas) à l'échelle du Bassin d'Arcachon à **marée-basse**.*



Séries temporelles pour 2 points situées à l'entrée du Bassin (étoile et courbe noire) et en amont du Bassin dans sa partie sud-est (étoile et courbe bleue) :

- Haut : évolution du niveau marin total,
- Milieu : surcote liée au déferlement des vagues,
- Bas : hauteur significative des vagues.

*Figure 104 : Cartes des hauteurs significative des vagues (en haut) et des surcotes liées au déferlement des vagues (en bas) à l'échelle du Bassin d'Arcachon à **mi-marée**.*

Annexe 7

Modalités de détermination des bandes de précaution en arrière des structures de protection côtière

Conformément aux consignes méthodologiques du MEDDE (mai 2014), la détermination des bandes de précaution repose sur le calcul d'une largeur forfaitaire puisqu'il n'existe pas :

- d'élément technique disponible à la date de réalisation de cette étude, sur les ouvrages ;

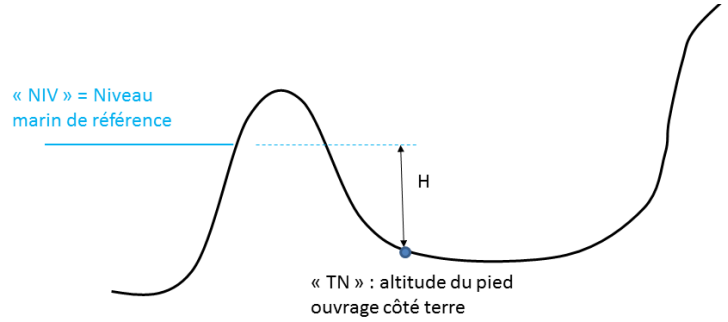
- d'étude de sensibilité (c'est-à-dire pas d'analyse itérative basée sur la simulation de plusieurs scénarios de défaillance des ouvrages).

Comme défini en concertation avec la DDTM de la Gironde et le SIBA, les bandes de précaution répondent aux conditions suivantes :

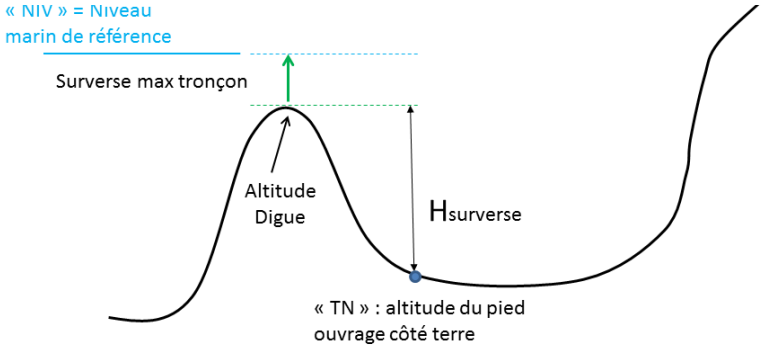
- prise en compte de la variation d'altitude du terrain naturel en arrière de l'ouvrage ;
- pas d'extension sur les terrains d'altitude supérieure au niveau marin au rivage (cas des Viviers par exemple) ;
- largeur minimale de 50m ;
- s'appliquent uniquement au droit de l'ouvrage (c'est-à-dire que la bande est limitée sur les côtés à 90° de l'axe de l'ouvrage. Ce critère est retenu à défaut d'élément technique sur l'ouvrage et d'étude de sensibilité.

Le calcul de la largeur forfaitaire de la bande de précaution suit les étapes suivantes :

- Etape 1 : la hauteur « H » comprise entre le niveau marin de référence (« NIV ») et la cote du Terrain Naturel (« TN ») est calculée au niveau de chaque pied d'ouvrage identifié ;



- Etape 2 : lorsqu'il y a surverse d'un tronçon (également identifié précédemment), une hauteur forfaitaire de surverse (« Surverse ») est prise en compte pour tout le tronçon. Elle correspond au maximum de surverse du tronçon ;



- Etape 3 : à chaque pied d'ouvrage, la hauteur retenue correspond à « H » s'il n'y a pas surverse ou à «$H_{surverse}$ = H – Surverse » s'il y a surverse sur le tronçon.
- Etape 4 : la largeur forfaitaire correspond à « rayon » = « H » x 100 ou « $H_{surverse}$ » x 100.

Exemple de détermination des bandes de précaution de 1er rang *(*Figure 105 *et* Figure 106*).*

- Etape 1 : Calcul de la largeur de la bande tel que présenté ci-dessus pour chaque pied d'ouvrage et tracé des cercles de rayon H x100 ou $H_{surverse}$.x100 ;
- Etape 2 : Tracé de la bande à ± 90° de son axe et à partir des pieds d'ouvrage de chaque tronçon d'ouvrage
- Etape 3 : Compilation des bandes de chaque tronçon et ajustement manuel. La bande de précaution finale est illustrée dans l'encadré rouge sur les Figure 105, Figure 106 *et* Figure 107.

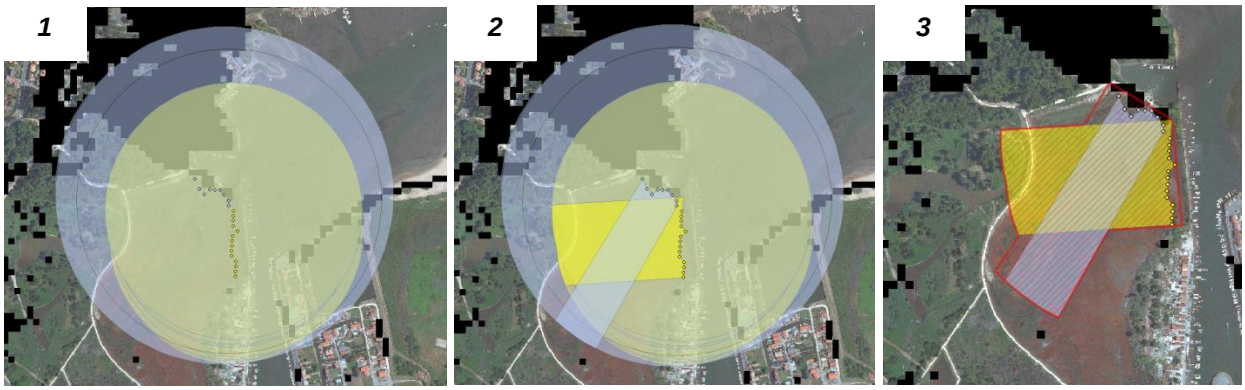


Figure 105 : Exemple du tracé de la bande de précaution pour la digue Johnston (La-Teste-de-Buch). En noir : altitude du terrain supérieure au niveau marin de référence.

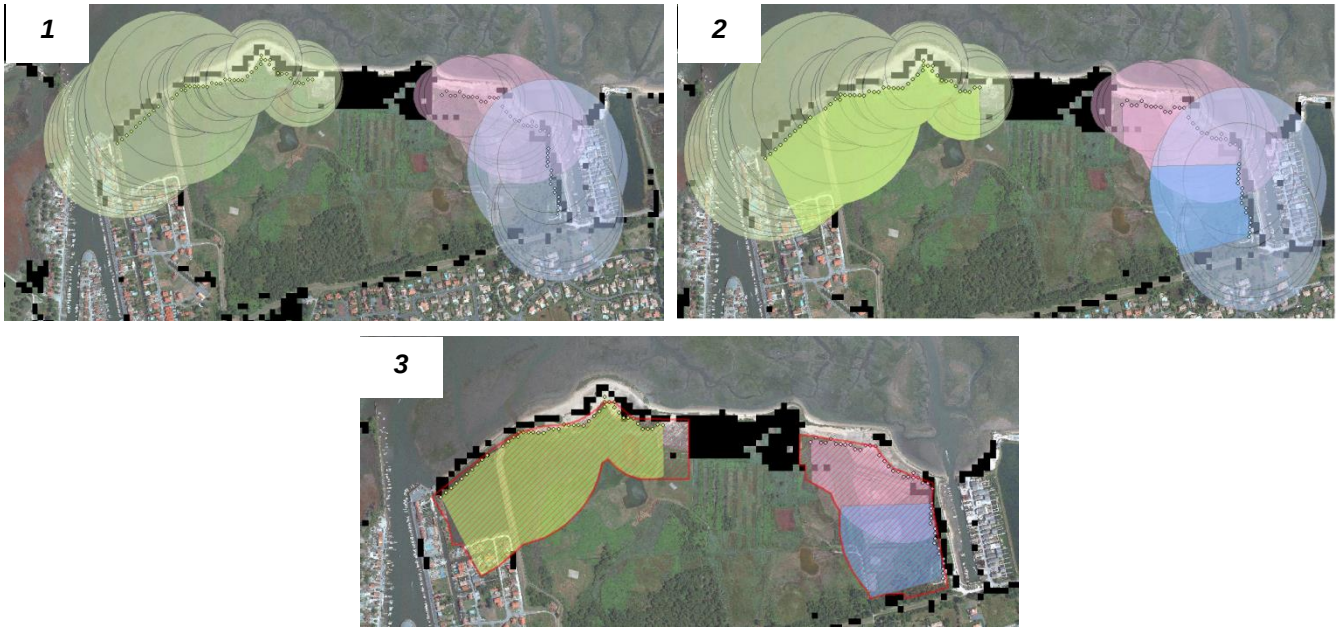


Figure 106 : Exemple du tracé de la bande de précaution pour la digue des Près Salés (La-Teste-de-Buch). En noir : altitude du terrain supérieure au niveau marin de référence.

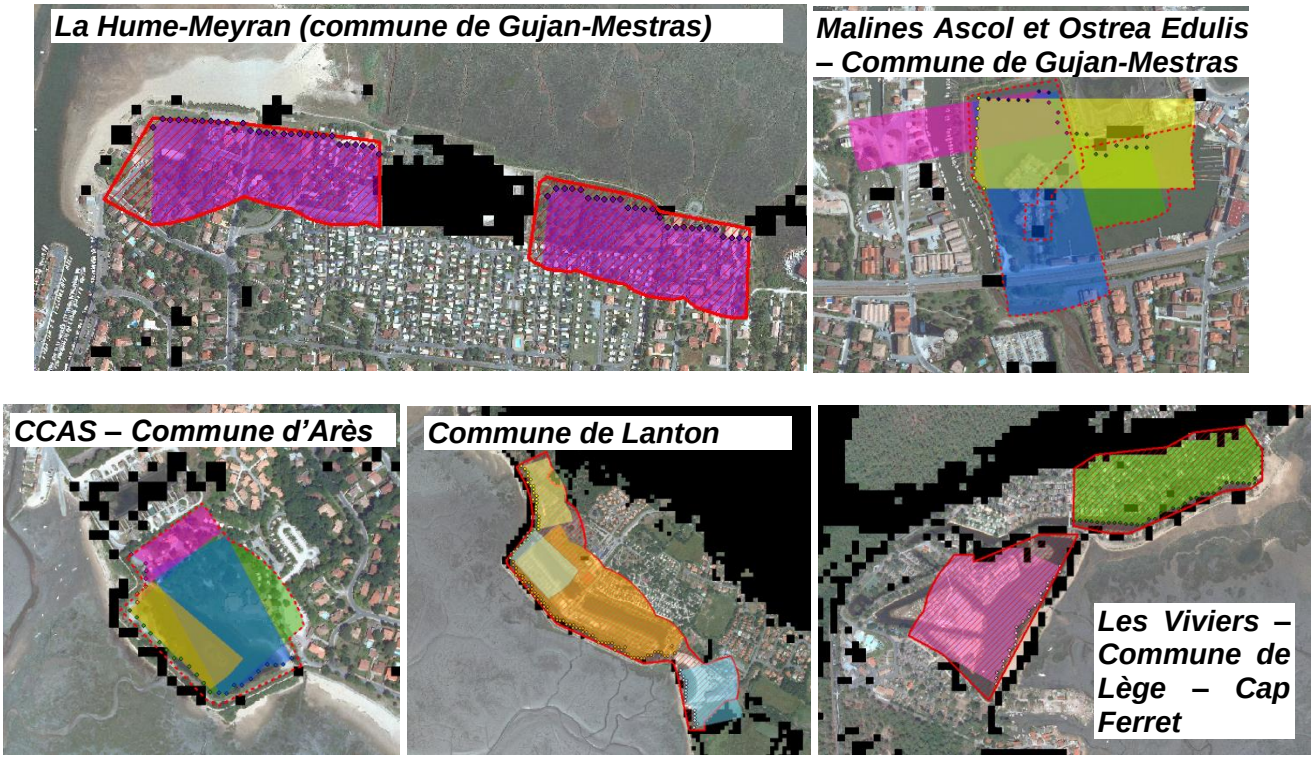


Figure 107 : Illustration des bandes de précaution sur différents secteurs (encadré rouge). En noir : altitude du terrain supérieure au niveau marin de référence.

Cas des ouvrages de 2nd rang sur La-Teste-de-Buch

Il n'est pas possible d'appliquer la même méthode de calcul de la largeur de la bande de précaution aux ouvrages de 2nd rang car pour cela, conformément aux recommandations méthodologiques (MEDDE, mai 2014), il faudrait connaître le niveau marin au droit de ces ouvrages en état fonctionnel dans le cas de défaillances des ouvrages de 1er rang (ruine ou brèche). Ce scénario n'ayant pas été simulé, la DDTM de la Gironde en concertation avec le SIBA a arrêté une largeur de bande de 50 m (hachurés bleu, Figure 108).

Cette Figure 108 illustre également l'effet de la topographie. Les bandes de précaution sont interrompues lorsque l'altitude du terrain naturel est supérieure au niveau marin de référence (cercles jaunes).

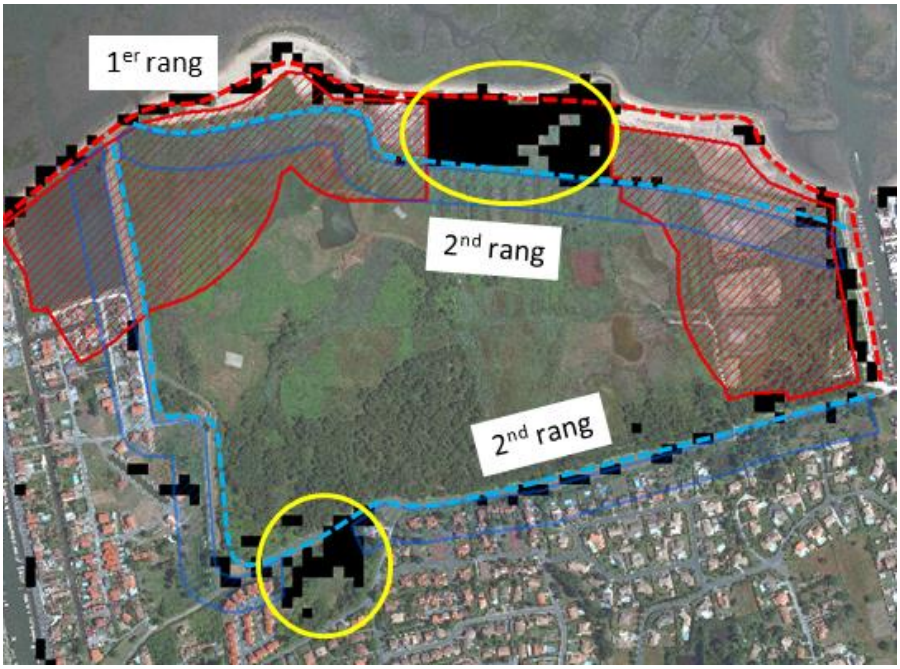


Figure 108 : Illustration des bandes de précaution des différents rangs de digues des Près Salés à La-Teste-de-Buch.
En Noir : altitude du terrain naturel supérieure au niveau marin de référence

Cas des ouvrages à Andernos-Les-Bains

Pour la bande de précaution des murets d'Andernos-Les-Bains, ce sont les pieds d'ouvrage mesurés au DGPS par le BRGM (octobre 2013 et novembre 2014) qui ont été utilisés. Ces mesures mettent en évidence une hauteur de muret de l'ordre de 50 cm environ. La DDTM de la Gironde a donc retenu une bande de précaution de 50 m sur ce secteur. Elle est également interrompue lorsque l'altitude du terrain naturel est supérieure au niveau marin de référence (cercles jaune, Figure 109).

Figure 109 : Bandes de précaution des ouvrages d'Andernos-Les-Bains.
En Noir : altitude du terrain naturel supérieure au niveau marin de référence

Annexe 8

Prise en compte des seuils topographiques

Dans le cadre de la phase 1 de l'étude PPRL (cf. rapport BRGM/RP-62187-FR), des seuils topographiques (points hauts du front de mer) ont été identifiés en raison de leur susceptibilité à être submergés par des franchissements de paquets de mer exposant ainsi les zones basses situées en arrière (cuvette par exemple) à des submersions marines.

Dans le cadre de cette présente phase 2 de l'étude PPRL, des investigations de terrain complémentaires ont été menées afin de caractériser plus précisément ces seuils topographiques et de déterminer l'intérêt de mettre en place une méthode spécifique de prise en compte des franchissements de paquets de mer pour caractériser l'aléa submersion marine sur ces secteurs (modélisation numérique de type SWASH ou formules empiriques par exemple). Les investigations de terrain complémentaires reposent notamment sur des mesures topographiques au DGPS (précision altimétrique de ±1 cm) afin de vérifier la fiabilité des données LIDAR 2005 (précision altimétrique de ± 25 cm) au niveau de ces seuils.

Seuil topographique de Piraillan

La comparaison des données LIDAR de 2005 avec les données DGPS a mis en évidence un écart relativement faible entre ces 2 jeux de données, de l'ordre de 5 à 10 cm. L'altitude du seuil topographique de l'ordre de 4 m/NGF est confirmée, alors que le niveau marin de référence est de 3,7 m/NGF sur ce secteur. Etant donné que la largeur de ce seuil est supérieure à 100 m, que l'occupation du sol est relativement dense (habitations, petits murets, clôtures) et qu'il est situé au fond du port ostréicole de Piraillan (et donc pas directement exposé aux vagues), son exposition aux franchissements de paquets de mer est considéré négligeable (Figure 110 et Figure 111). Aucune méthode spécifique n'a donc été mise en place pour caractériser l'aléa submersion marine induit par les franchissements de paquets de mer sur ce secteur.

Seuil topographique de l'Herbe

La comparaison des données LIDAR de 2005 avec les données DGPS a mis en évidence un écart assez important entre ces 2 jeux de données, de l'ordre de ± 30 cm. Il est à noter que les relevés topographiques n'ont pu être effectués exactement au niveau du seuil topographique qui se trouve dans une propriété privée. En revanche, cet écart induit un doute sur la fiabilité du LIDAR 2005 au niveau du seuil. Des relevés topographiques complémentaires auraient pu être effectués mais cela n'a pas été jugé nécessaire par la DDTM de la Gironde en concertation avec le SIBA compte tenu de la largeur du seuil de 50 m (Figure 112 et Figure 113), de l'occupation du sol susceptible de freiner l'écoulement de l'eau (bâti et forêt) et de l'absence de connaissance d'évènement historique de submersion marine. Aucune méthode spécifique n'a donc été mise en place pour caractériser l'aléa submersion marine induit par les franchissements de paquets de mer sur ce secteur.

Figure 110 : Localisation du seuil topographique de Piraillan

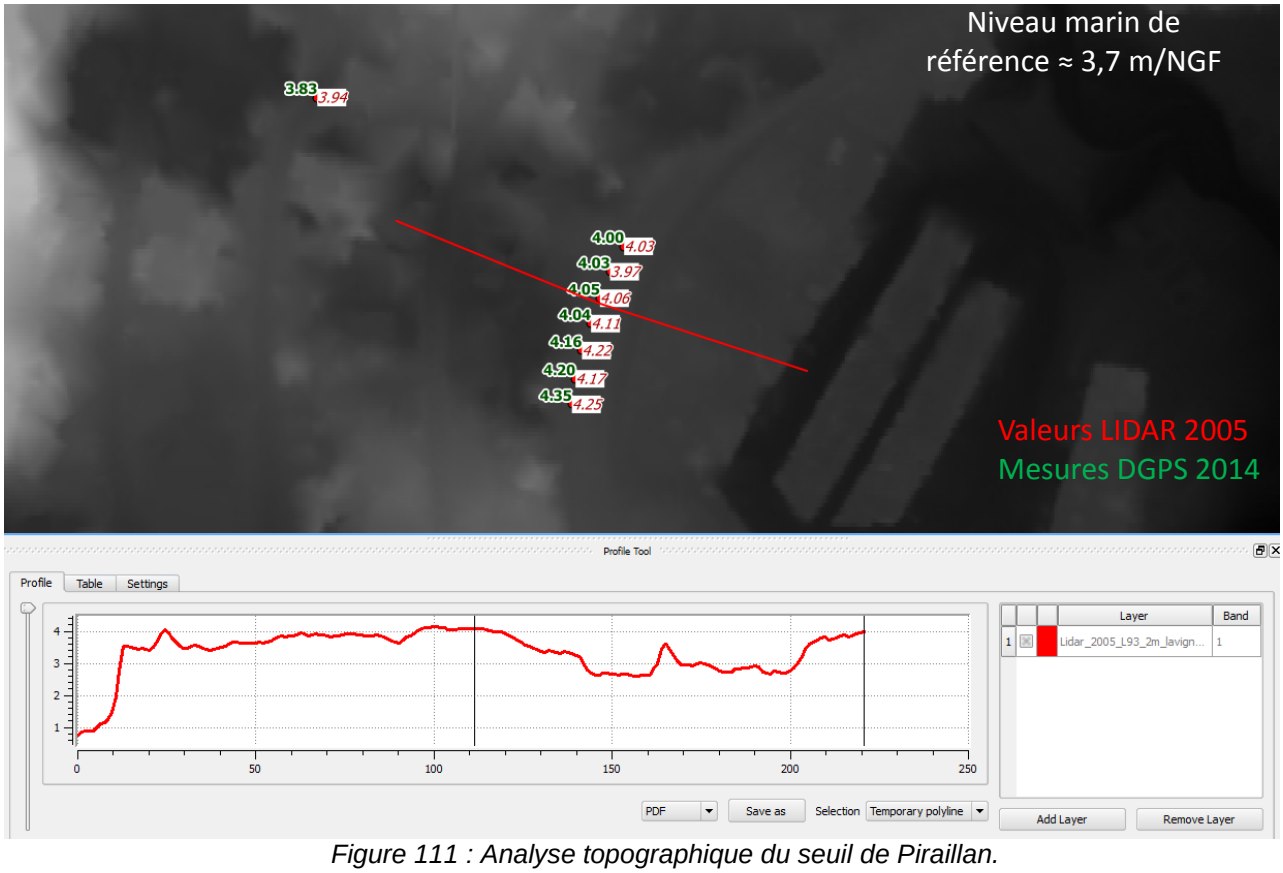


Figure 111 : Analyse topographique du seuil de Piraillan.

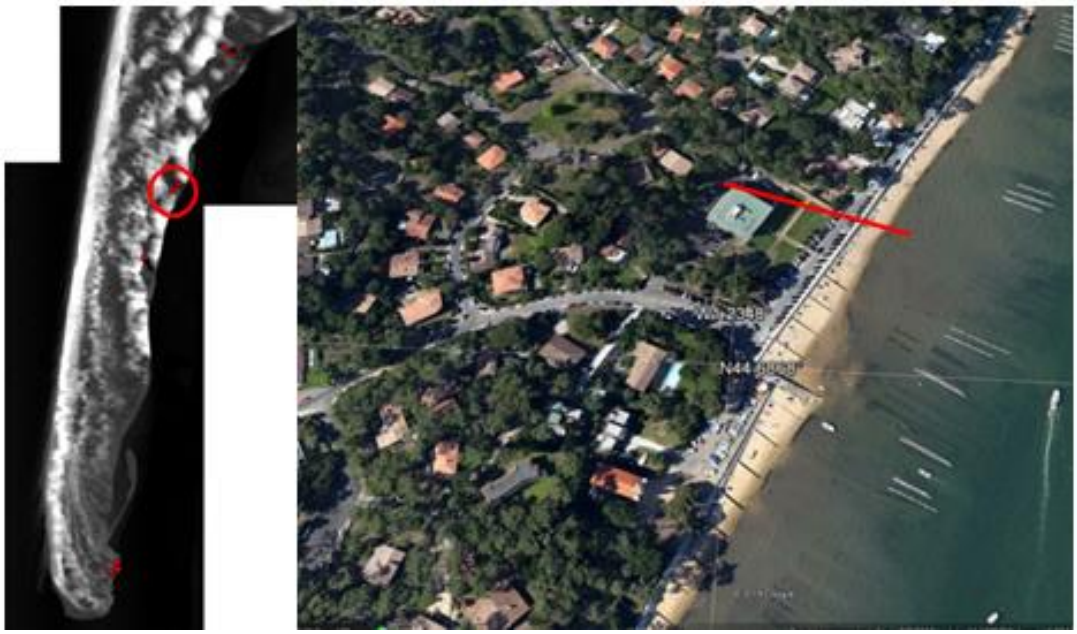


Figure 112 : Localisation du seuil topographique de l'Herbe.

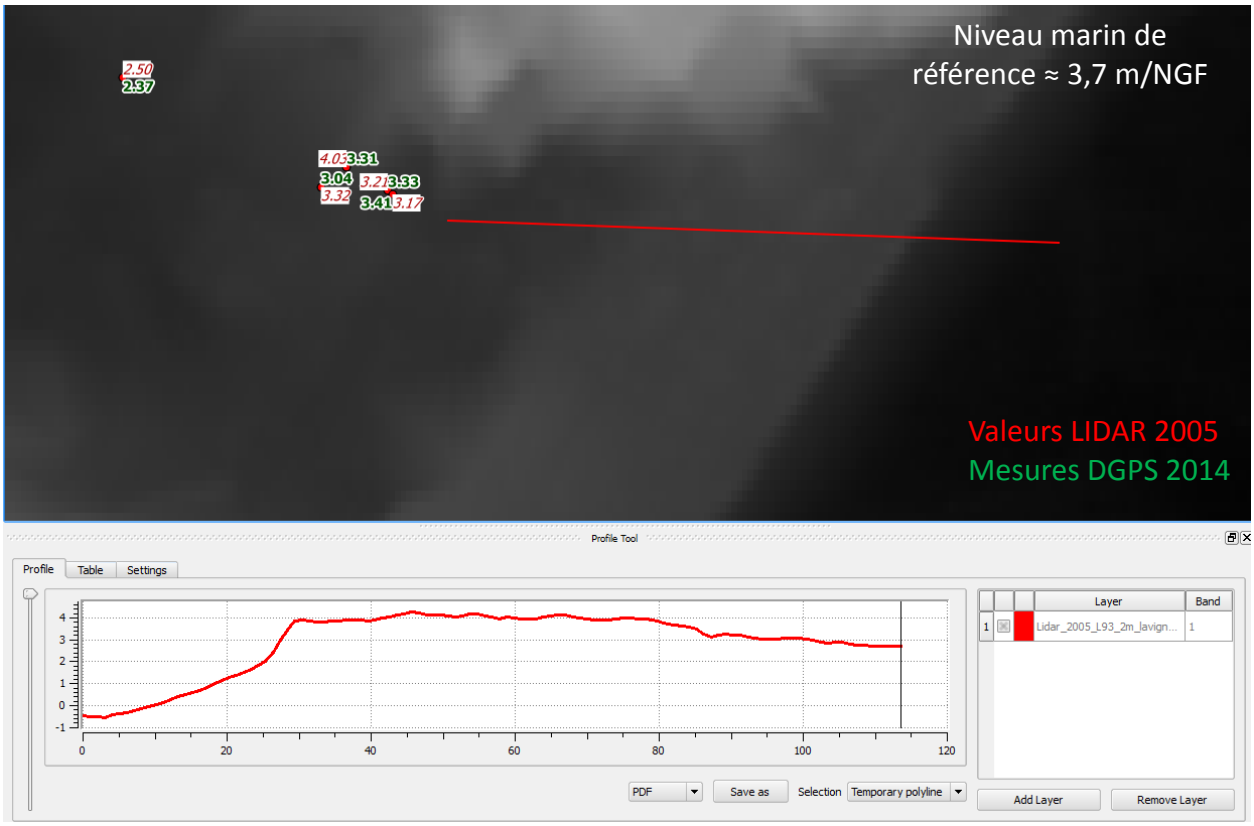


Figure 113 : Analyse topographique du seuil de l'Herbe.

Seuil topographique de La Vigne

La comparaison des données LIDAR de 2005 avec les données DGPS a mis en évidence un écart assez important entre ces 2 jeux de données, de l'ordre de 30 cm au niveau du seuil. Le LIDAR 2005 sous-estime l'altitude de ce seuil de 10 à 30 cm. Les données DGPS permettent de constater que l'altitude de ce seuil est comprise entre 4,38 m/NGF et 4,60 m/NGF alors que le niveau marin de référence est de 3,6 m/NGF sur ce secteur. En raison de cet écart de l'ordre de 1 m ; la localisation du seuil au fond du port de La Vigne et sa largeur supérieure à 150 m, il a été jugé inutile de mettre en place une méthode spécifique pour caractériser l'aléa submersion marine induit par les franchissements de paquets de mer sur ce secteur (Figure 114 et Figure 115).

Seuils topographiques de la Pointe du Cap Ferret

La comparaison des données LIDAR de 2005 avec les données DGPS a mis en évidence un écart assez important entre ces 2 jeux de données, de ± 30 cm au niveau des 2 seuils (Figure 116 et Figure 117).

Au niveau du seuil le plus au nord (Hortense), bien que le LIDAR 2005 présente une sur-estimation de l'ordre de 30 cm, l'altitude demeurant supérieure à 5,3 m/NGF avec un niveau marin de référence de 3,6 m/NGF à la Pointe, permet de considérer inutile la mise en place d'une méthode spécifique pour caractériser l'aléa submersion marine induit par les franchissements de paquets de mer sur ce secteur

Au niveau du seuil le plus au sud (n°2, rue du Tram), le LIDAR 2005 sur-estime également l'altitude qui est de l'ordre de 4 m/NGF avec une largeur de 10 à 20 m. Ce secteur étant particulièrement exposé aux vagues, leur effet est susceptible de se propager au-delà de plusieurs dizaines de centimètres au-dessus du niveau marin de référence qui est de 3,6 m/NGF et de générer une submersion marine dans la zone basse via la rue du Tram. Il a donc été considéré indispensable de mettre en place une méthode spécifique de caractérisation de l'aléa submersion marine sur ce secteur de l'extrême Pointe du Cap Ferret (cf. paragraphe 7.4.4 et Annexe 4).

Figure 114 : Localisation du seuil topographique de La Vigne.

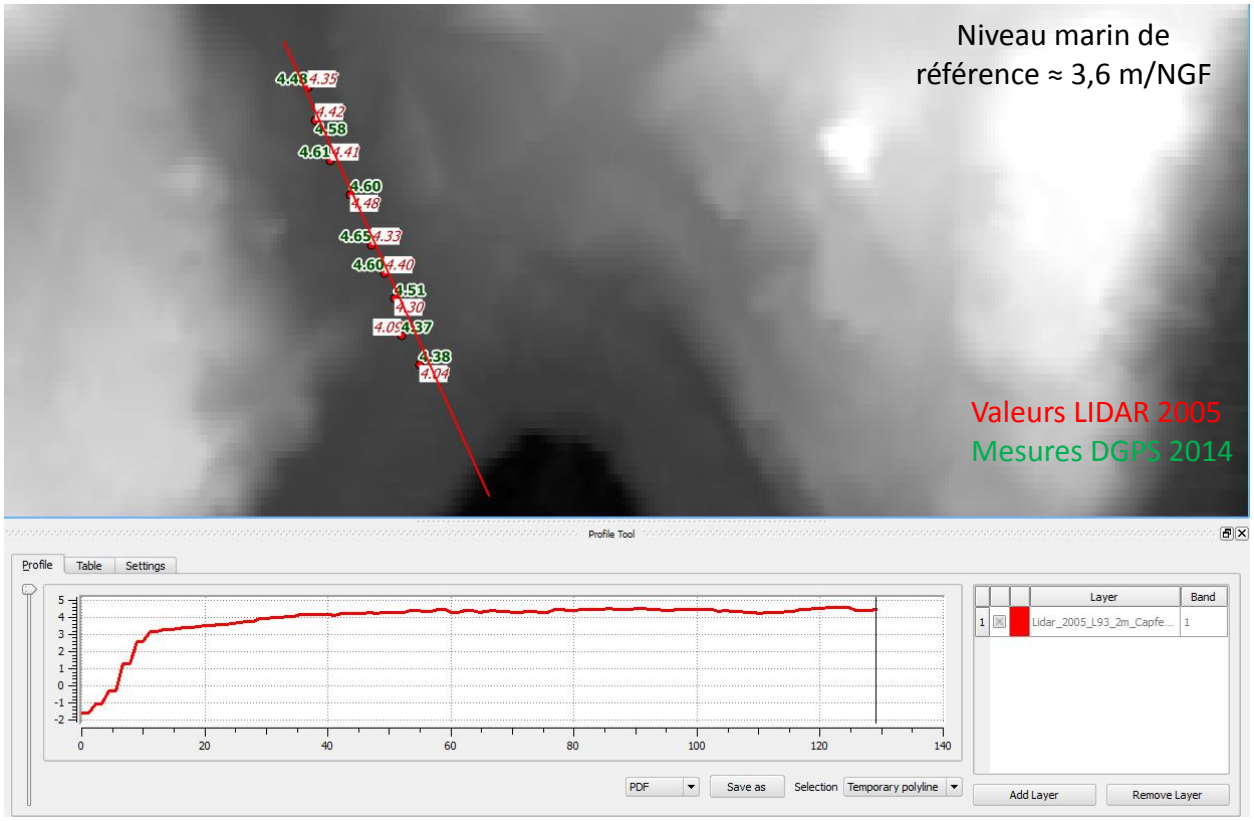


Figure 115 : Analyse topographique du seuil de La Vigne.

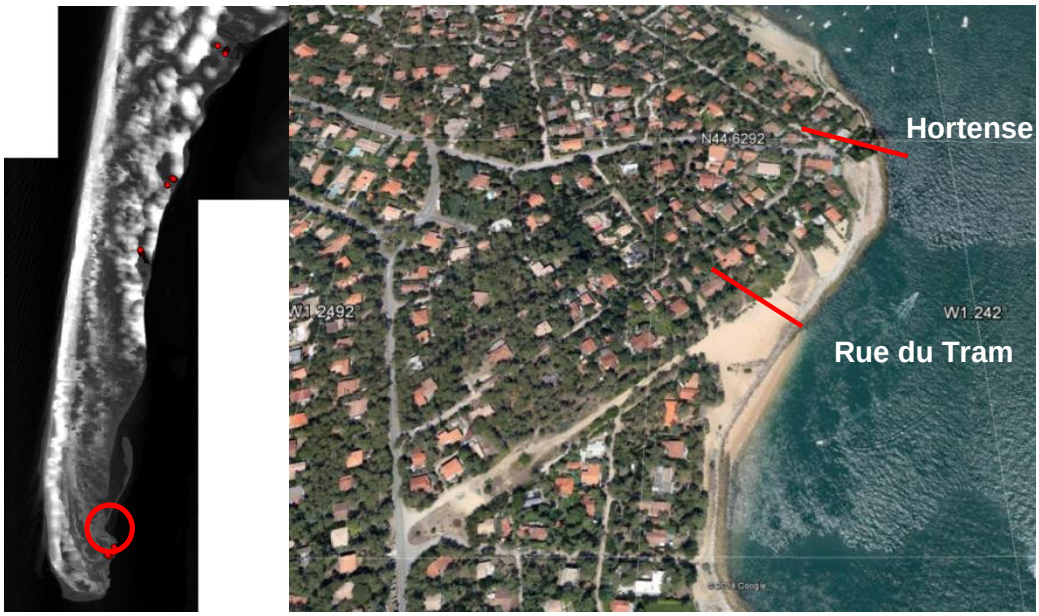


Figure 116 : Localisation des seuils topographiques de La Pointe du Cap Ferret.

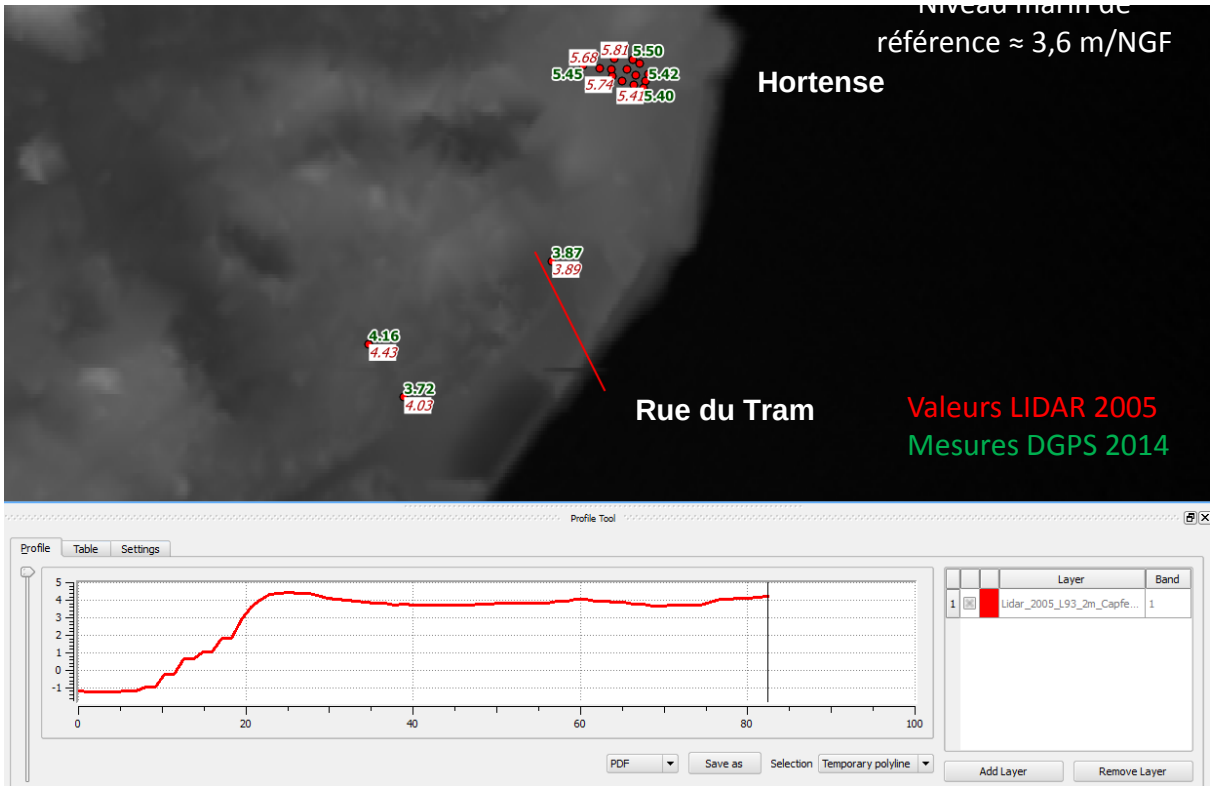


Figure 117 : Analyse topographique des seuils de La Pointe du Cap Ferret.

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

Direction régionale Aquitaine Limousin Poitou-Charentes
Parc Technologique Europarc
24, avenue Léonard de Vinci
33600 – Pessac – France
Tél. : 05 57 26 52 70