



# Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre du PPRL du secteur d'Hendaye (Pyrénées-Atlantiques)

Cartographie des aléas « actuel » et « 2100 »  
Actualisation de l'étude sur la zone des Joncaux  
Rapport final

BRGM/RP-66349-FR  
Décembre 2016

**Document approuvé du 19/10/2017**





# Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre du PPRL du secteur d'Hendaye (Pyrénées-Atlantiques)

Cartographie des aléas « actuel » et « 2100 »  
Actualisation de l'étude sur la zone des Joncaux

Rapport final

**BRGM/RP-66349-FR**  
Décembre 2016

Étude réalisée dans le cadre des opérations  
de Service public du BRGM AP16AQI044

**Mugica J., Pedreros R., Mallet C., Nicolae Lerma A.,**  
avec la collaboration de **Dugor J. et Rihouey D.**

**Vérificateur :**

Nom : C. OLIVEROS

Date : 19/12/2016

Signature :



**Approbateur :**

Nom : N. PEDRON  
Directeur du BRGM Aquitaine par  
intérim

Date : 20/12/2016

Signature :



## 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.*

*Cette étude a été réalisée en l'état des connaissances actuelles et avec les outils et données opérationnels. Elle s'est appuyée sur les recommandations méthodologiques du rapport provisoire du MEDDTL de novembre 2011 (v11) ainsi que de version finale du guide méthodologique du MEDDE de mai 2014.*

**Mots-clés** : PPRL, submersion marine, aléa, surcote, cartographie, évènement de référence, baie, estuaire, Hendaye, zone des Joncaux

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

**Mugica J., Pedreros R., Mallet C., Nicolae Lerma A., avec la collaboration de Dugor J. et Rihouey D.** (2016) – Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre du PPRL du secteur d'Hendaye (Pyrénées-Atlantiques). Cartographie des aléas « actuel » et « 2100 ». Actualisation de l'étude sur la zone des Joncaux. Rapport final. BRGM/RP-66349-FR, 86 p., 53 fig., 15 tabl., 33 ann., 1 CD

## Synthèse

Comme suite à la prescription des Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) entre novembre 2010 et février 2011 en Aquitaine, le BRGM a été chargé par la DDTM des Pyrénées Atlantiques en association avec la DREAL Aquitaine de caractériser l'aléa submersion marine sur les secteurs de Saint-Jean-de-Luz et d'Hendaye. Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une première convention entre le BRGM et la DDTM des Pyrénées Atlantiques (signée le 05/04/2012) et a fait l'objet d'une première version en 2012 qui a été réactualisée en 2016 dans le cadre d'une nouvelle convention (signée le 20/07/2016).

**Dans ce présent rapport, seul le secteur d'Hendaye comprenant la baie d'Hendaye ainsi que l'estuaire de la Bidassoa et la baie de Txingudi sur les communes d'Hendaye et d'Urrugne sont traités.**

Les PPRL devant être établis dans un délai de 3 ans à partir de leur prescription, l'aléa a été caractérisé dans l'état actuel des connaissances, avec les outils opérationnels et données existantes et en s'appuyant sur les documents de référence du MEDDE : Circulaire du 27 juillet 2011, rapport méthodologique provisoire de novembre 2011 et guide méthodologique final de mai 2014.

Certaines étapes de cette étude ont été réalisées par le BRGM avec la collaboration de CASAGEC Ingénierie dans le cadre d'un contrat de sous-traitance. Ce rapport final d'étude reprend le rapport BRGM/RP-62563-FR (Mugica et *al.*, 2014) et présente une synthèse des rapports techniques du BRGM/RP-61416-FR (Bulteau et *al.*, 2013) et de CASAGEC Ingénierie (Dugor et *al.*, 2013, Dugor et *al.*, 2016). Il rappelle :

1. les résultats de l'étude historique au travers du recensement des événements marquants connus et de l'analyse du fonctionnement et des défaillances des systèmes de défense contre la mer lors des tempêtes ;
2. la méthode d'analyses statistiques dites de « probabilités conjointes » pour la détermination d'événements centennaux au large composés par l'association des conditions de vagues (hauteur significative, période et direction pic) et de niveaux d'eau (marée + surcote atmosphérique) ;
3. le modèle utilisé pour la propagation des événements centennaux depuis le large vers le rivage afin de calculer le niveau marin statique au rivage, c'est-à-dire le niveau marin qui intègre le niveau de marée astronomique, la surcote atmosphérique ainsi que l'élévation du plan d'eau générée par le déferlement des vagues ;
4. la propagation à terre à partir de formules empiriques pour calculer les volumes franchissants (action du jet de rive) et à partir de modèles numériques pour prendre en compte l'effet d'une concomitance avec une crue décennale de la Bidassoa ;
5. le complément d'étude sur la zone des Joncaux basé sur une actualisation des données topographiques pour une meilleure représentation du terrain naturel ainsi que sur l'utilisation d'un modèle hydrodynamique mieux adapté aux conditions estuariennes.

La cartographie a été réalisée pour les aléas :

- « **actuel** » qui intègre une surcote de 20 cm rajoutée au large pour une première prise en compte de l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique ainsi qu'une marge liée à l'incertitude de la méthode estimée à 15 cm ;
- « **2100** » qui intègre une surcote de 60 cm rajoutée au large pour la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique ainsi qu'une marge liée à l'incertitude de la méthode estimée à 15 cm.

**Les résultats des simulations ont montré que pour des évènements centennaux, il n'y avait pas de submersion marine par débordement sur le secteur d'Hendaye, sauf en cas de brèche dans les ouvrages de protection côtière, car le niveau marin au rivage est inférieur à la cote d'arase des ouvrages.** En concertation avec la DDTM des Pyrénées Atlantiques, le Conseil Général et les services techniques des communes, des hypothèses de défaillance des ouvrages ont donc été déterminées afin de simuler 2 scénarios de propagation de la submersion : un scénario « sans ouvrage » (ruine généralisée, arasement des ouvrages, réalisé à titre informatif) et un scénario de « défaillance » avec 2 brèches au niveau du perré de la plage d'Hendaye (Est et Ouest du casino) et une ruine d'un tronçon de la promenade de la zone des Joncaux qui fait office de structure de protection. En pratique, ces 2 scénarios reviennent à la même simulation et donc aux mêmes résultats.

D'autre part, les résultats des simulations ont montré que **des franchissements par paquets de mer sur le front de mer d'Hendaye pouvaient générer une submersion marine** avec des entrées d'eau préférentielles au droit de la rue d'Irun à proximité du Casino.

La cartographie des aléas dits « actuel » et « 2100 » représente 4 niveaux d'aléas (de faible à très fort) obtenus à partir du croisement des hauteurs d'eau et des vitesses de l'écoulement de l'eau.

Une bande de sécurité en aléa fort d'une largeur de 25 à 35 m a été appliquée sur le front de mer d'Hendaye afin de prendre en compte l'effet des vagues. Dans le secteur des Joncaux, la bande de précaution relative aux ouvrages de protection a été appliquée en aléa fort sur une largeur de l'ordre de 50 m en arrière du tronçon de la promenade côtière faisant office de structure de protection.

**Les zones particulièrement exposées à la submersion marine sur le secteur d'Hendaye sont :**

- un « couloir » qui relie le Casino à la baie de Txingudi par la rue d'Irun et le rond-point des Palmiers ;
- la zone en arrière du quai de la Floride ;
- la zone des terrains de sport par la rue des Rosiers depuis la baie de Txingudi (uniquement pour l'aléa 2100) ;
- la zone des Joncaux.

**Sur le secteur d'Hendaye, l'étendue de la submersion est globalement la même pour l'aléa « actuel » et l'aléa « 2100 ». Les valeurs de vitesses et de hauteur d'eau sont légèrement plus importantes pour l'aléa « 2100 ».**

## Sommaire

<b>1. Contexte et objectifs de l'étude</b> .....	<b>11</b>
1.1. CADRE DE L'ETUDE.....	11
1.2. CONTEXTE REGLEMENTAIRE .....	11
1.3. DEROULEMENT ET SUIVI DE L'ETUDE .....	12
<b>2. Principe de la méthodologie</b> .....	<b>15</b>
2.1. NOTIONS THEORIQUES - RAPPEL DES PROCESSUS ETUDIES .....	15
2.2. PRINCIPE DE LA METHODOLOGIE GLOBALE .....	17
2.3. SCENARIOS ETUDIES .....	18
<b>3. Présentation générale du secteur d'étude</b> .....	<b>21</b>
3.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIE GENERALE .....	21
3.2. CARACTERISTIQUES OCEANOGRAPHIQUES.....	22
<b>3.2.1.</b> Marée .....	22
<b>3.2.2.</b> Vagues .....	24
3.3. CARACTERISTIQUES METEOROLOGIQUES .....	25
<b>3.3.1.</b> Climat général.....	25
<b>3.3.2.</b> Les Vents.....	26
3.4. CARACTERISTIQUES D'HYDROLOGIE CONTINENTALE.....	26
<b>4. Données topographiques et bathymétriques</b> .....	<b>29</b>
4.1. TOPOGRAPHIE.....	29
<b>4.1.1.</b> Données LIDAR GUIPUZCOA .....	29
<b>4.1.2.</b> Autres données altimétriques.....	29
<b>4.1.3.</b> Points de niveau fournis par le BRGM .....	30
<b>4.1.4.</b> Points de niveau fournis par le CASAGEC.....	30
<b>4.1.5.</b> Données LIDAR RGE ALTI® .....	30
4.2. BATHYMETRIE .....	33
4.3. MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN (MNT).....	34
<b>5. Étude historique</b> .....	<b>37</b>
5.1. OBJECTIFS DE L'ETUDE HISTORIQUE.....	37
5.2. RECENSEMENT DES EVENEMENTS HISTORIQUES DE TEMPETE .....	37
5.3. CONDITIONS LES PLUS DEFAVORABLES OBSERVEES .....	39
5.4. DESCRIPTION DE LA TEMPETE DU 8, 9 ET 10 NOVEMBRE 2010 .....	40
<b>6. Modalités de prise en compte des ouvrages de protection côtière</b> .....	<b>43</b>
6.1. OUVRAGES DE PROTECTION COTIERE IDENTIFIES .....	43

6.2. HYPOTHESES DE DEFAILLANCE RETENUES.....	44
<b>7. Détermination de l'évènement naturel de référence.....</b>	<b>47</b>
7.1. PRINCIPE DE LA METHODE.....	47
7.2. DETERMINATION D'EVENEMENTS NATURELS CENTENNAUX AU LARGE .....	48
<b>7.2.1.</b> Données utilisées .....	48
<b>7.2.2.</b> Étapes de la méthode d'analyse statistiques .....	49
<b>7.2.3.</b> Synthèse des résultats .....	51
7.3. PROPAGATION DES EVENEMENTS CENTENNAUX DEPUIS LE LARGE VERS LE RIVAGE.....	52
<b>7.3.1.</b> Conditions de forçage.....	52
<b>7.3.2.</b> Description du modèle numérique .....	53
<b>7.3.3.</b> Résultats .....	54
<b>7.3.4.</b> Conclusion et comparaison avec l'évènement historique.....	57
<b>8. Détermination de l'évènement de référence : propagation à terre .....</b>	<b>59</b>
8.1. CALCUL DES DEBITS FRANCHISSANTS LES OUVRAGES DE PROTECTION.....	59
8.2. ESTIMATION DES NIVEAUX DE CRUE DE LA BIDASSOA.....	60
8.3. MODELISATION NUMERIQUE DES ECOULEMENTS A SURFACE LIBRE .....	61
<b>8.3.1.</b> Front de mer d'Hendaye et Baie de Txingudy.....	61
<b>8.3.2.</b> Zone des Joncaux .....	63
8.4. EVENEMENT DE REFERENCE RETENU .....	67
<b>9. Cartographie des aléas.....</b>	<b>69</b>
9.1. QUALIFICATION DE L'ALEA .....	69
9.2. PARTICULARITES DE LA CARTOGRAPHIE .....	71
9.3. VERIFICATION DE TERRAIN .....	72
9.4. RESULTATS DE LA CARTOGRAPHIE.....	73
<b>9.4.1.</b> Hendaye plage .....	73
<b>9.4.2.</b> Zone des Joncaux .....	75
<b>10. Conclusion .....</b>	<b>81</b>
<b>11. Bibliographie.....</b>	<b>83</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Localisation de la zone des Joncaux faisant l'objet de la réactualisation de l'étude du PPRL de la commune d'Hendaye.....	14
Figure 2: Synthèse des processus contribuant au niveau de la mer lors d'une tempête.....	16
Figure 3 : Les trois types de submersion (source CETMEF 2009). .....	17

Figure 4 : Niveaux marins à prendre en compte pour la caractérisation des aléas submersion marine (Rapport MEDDTL, v11, novembre 2011).	19
Figure 5 : Situation du secteur d'étude d'Hendaye.	21
Figure 6 : Carte lithologique simplifiée de la Côte Basque (Genna et al., 2005).	22
Figure 7 : Caractéristiques des vagues au point 44°N 2,5°W (WW3 période 1997-2007) - Rose des vagues (Hs,direction, fréquence).	24
Figure 8 : Diagramme bivarié (Tp, Hs).	24
Figure 9 : Diagrammes ombrothermiques.	26
Figure 10 : Série temporelle des données de débits moyens journaliers ( $m^3.s^{-1}$ ) à Endarlaza.	27
Figure 11 : Modules interannuels du débit calculé sur 36 ans.	27
Figure 12 : Visualisation du MNT issu de données LIDAR.	29
Figure 13 : Nuage de points issu du levé topographique sur la zone d'activité des Joncaux.	30
Figure 14 : Comparaison entre le levé DGPS Pinatel et Bigourdan (2012) et le levé LIDAR de l'IGN RGE ALTI® (2012). Vue en plan des points (échelle de couleur: Différence LIDAR - Levé DGPS).	31
Figure 15 : Comparaison entre le levé DGPS PINATEL BIGOURDAN (2012) et le levé LIDAR RGE ALTI®.	32
Figure 16 : Représentation de la donnée LIDAR du RGE ALTI® sur la zone des Joncaux (résolution 1m).	33
Figure 17 : Données bathymétriques mono faisceau sur le secteur d'Hendaye.	33
Figure 18 : MNT de la 1 <sup>ère</sup> version de l'étude, utilisée sur le secteur d'Hendaye, excepté sur la zone des Joncaux.	34
Figure 19 : Profil en long de la promenade des Joncaux faisant apparaître la donnée du LIDAR du RGE ALTI® abaissé de 10cm, les points DGPS et le MNT employé dans la modélisation (avec ou sans ruine).	35
Figure 20 : Nouvelle version du MNT construite pour caractériser l'aléa submersion marine sur la zone des Joncaux.	36
Figure 21 : Tempête de 1951, type de submersion observable et illustration des dégâts occasionnés sur le perré.	38
Figure 22 : Carte de synthèse des secteurs touchés par des inondations au regard de l'étude historique sur le secteur d'Hendaye plage (CASAGEC, Dugor et al. (2013)).	38
Figure 23 : Carte de synthèse des secteurs touchés par des inondations au regard de l'étude historique sur la zone des Joncaux (CASAGEC, Dugor et al. (2013)).	39
Figure 24 : Dégâts occasionnés sur le perré et érosion de l'herbier de la plage d'Hendaye, durant la tempête du 9 novembre 2010.	41
Figure 25 : Dégâts causés sur le perré d'Hendaye plage lors de la tempête du 9/11/2010.	43
Figure 26 : Perré de la plage d'Hendaye.	44
Figure 27 : Promenade des Joncaux considérée comme digue sur ce tronçon.	45
Figure 28 : Localisation des tronçons de la promenade des Joncaux surélevés par rapport au terrain naturel en arrière et considérés comme ayant un rôle de digue.	45
Figure 29 : Scénarios envisagés pour la modélisation du secteur d'Hendaye	46
Figure 30 : Graphe bivarié représentant les directions pics des vagues ( $D_p$ ) en fonction des hauteurs significatives ( $H_s$ ) pour les données d'origine.	50

Figure 31 : Couples (Hs,SWL) initiaux superposées aux données simulées par JOIN-SEA (10 000 ans). .....	50
Figure 32 : Courbes d'iso-période de retour de dépassement conjoint pour Hs et SWL pour le secteur d'Hendaye. Points noir : données initiales ; points bleus : combinaisons sélectionnées. ....	51
Figure 33 : Points d'extraction des modèles pour les conditions de référence d'agitation au large et les niveaux d'eau SWL à la côte. Les rectangles rouges représentent l'emprise des modèles de propagation des vagues à la côte. ....	54
Figure 34 : Exemple de résultats de simulation réalisée avec le modèle SWAN sur le modèle de grande emprise. Hauteur significative des vagues (m).....	55
Figure 35 : Exemple de résultats de simulation réalisée avec le modèle SWAN (hauteur significative des vagues (m) et direction moyenne à gauche et wave setup induit par les vagues à droite). ....	55
Figure 36 : Modèles numériques de terrain pour la propagation des vagues devant le secteur d'Hendaye. Les profils rouges correspondent aux points d'extraction (P1 à P7) des résultats afin d'évaluer les conditions d'agitation et de setup à différents endroits. ....	56
Figure 37 - Carte de répartition des coefficients de Strickler ( $m^{1/3} s^{-1}$ ) exprimant la rugosité du sol. ....	64
Figure 38. Séries temporelles des forçages hydrauliques du modèle. Courbes de marées pour l'évènement de référence actuel (bleu) et à échéance 2100 (rouge). La courbe du débit est en noir.....	65
Figure 39 : Quartier de Behobie inondée aux abords du Pont de Santiago lors de l'évènement de février 2009. ....	66
Figure 40 : Hauteur d'eau maximale simulée dans le quartier de Béhobie lors de l'évènement de février 2009. ....	66
Figure 41 : Définition de la bande de précaution derrière un ouvrage (MEDDTL, 2011). ....	72
Figure 42 : Zone d'application de la bande de sécurité liée à l'effet des vagues sur le front de mer d'Hendaye. ....	73
Figure 43 : Zone de débordement dans l'estuaire de la Bidassoa, secteur des Joncaux (Hendaye). ....	73
Figure 44 : Aléa « actuel » sur le secteur de la plage d'Hendaye. ....	74
Figure 45 : Aléa « 2100 » sur le secteur de la plage d'Hendaye. ....	75
Figure 46 : Présentation des niveaux d'eau simulés le long de la promenade des Joncaux comparativement aux niveaux des crues passées (2009 et 2011). ....	76
Figure 47 : Aléa « actuel » sur le secteur de la zone des Joncaux. ....	78
Figure 48 : Aléa « 2100 » sur le secteur de la zone des Joncaux. ....	79
Figure 49 : Parcelles du RGE ALTI® présentant une anomalie topographique (encadrées en bleu) liée à l'effacement du bâtiment. ....	141
Figure 50 : Résultat brut de modélisation numérique mettant en évidence les zones hors aléa au niveau des parcelles présentant une anomalie topographique. ....	142
Figure 51 : Ajustement manuel de l'aléa au niveau des parcelles présentant une anomalie topographique liée à la présence de bâtiment. ....	142
Figure 52 : Intégration dans la surface de submersion les surfaces isolées de moins de 50 m <sup>2</sup> . ....	143
Figure 53 : Lissage des contours avec un pas de 20 m. ....	143

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Références Altimétriques Maritimes (RAM 2011 - SHOM) pour le marégraphe de Socoa(*) Converties dans le référentiel IGN69 (m/NGF). ZH/Réf = -2.171 m. ....	23
Tableau 2 : Estimation des surcotes au niveau du marégraphe de Socoa du port de référence de Saint-Jean-de-Luz (SHOM / CETMEF, 2008). ....	23
Tableau 3 : Estimation des surcotes de pleine mer au marégraphe de Socoa du port de référence de Saint-Jean-de-Luz (CETMEF, 2013). ....	23
Tableau 4 : Synthèse des comparaisons levé Lidar du RGE ALTI® - levé DGPS. ....	32
Tableau 5 : Combinaisons (Hs, SWL) centennales au large et Tp associées, sélectionnées pour le secteur d'Hendaye. ....	52
Tableau 6 : Caractéristiques des combinaisons de période de retour 100 ans au large. ....	53
Tableau 7 : Niveau d'eau total (m/NGF) statique (SWL + Surcote 20 cm + wave setup + Incertitude 15 cm) - Aléa actuel. ....	56
Tableau 8 : Niveaux d'eau total (m/NGF) statique (SWL+ Surcote 60 cm + wave setup + Incertitude 15 cm) – Aléa 2100. ....	57
Tableau 9 : Paramètres correspondant à la situation de volumes franchissants maximum. ....	60
Tableau 10 : Périodes de retour des crues de la Bidassoa (loi de Gumbel) - Données calculées sur 36 ans. Les valeurs entre crochets représentent les bornes de l'intervalle de confiance dans lequel la valeur exacte du paramètre estimé a 80% de chance de se trouver. ....	61
Tableau 11 : Comparaison des altitudes de lasses de crue mesurées et simulées pour l'évènement de février 2009. ....	66
Tableau 12 : Qualification de l'aléa en fonction des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement (guide méthodologique, MEDDE, 2014). ....	70
Tableau 13 : Classes d'aléa basées sur le croisement des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement. ....	70
Tableau 14 : Niveaux d'eau en m/NGF simulés en amont et aval de la zone des Joncaux pour les 2 évènements actuel et 2100. ....	76
Tableau 15 : Synthèse de la dynamique, des volumes, des surfaces et des débits de la submersion marine pour les 2 évènements actuel et 2100. ....	78

## Liste des annexes

Annexe 1 Compte rendu de la 1 <sup>ère</sup> réunion du comité scientifique 27/05/2011 .....	85
Annexe 2 Compte rendu de la 2 <sup>ème</sup> réunion du comité scientifique 20/09/2012 .....	91
Annexe 3 Cartes des différences topographiques entre l'ancien (1 <sup>ère</sup> version de l'étude 2012) et le nouveau (complément d'étude 2016) MNT .....	97
Annexe 4 Liste des évènements historiques de submersion marine et de leurs conséquences sur la commune d'Hendaye .....	101
Annexe 5 Compte rendu de la réunion du 11/12/2012 pour la détermination des hypothèses de défaillance des ouvrages côtiers .....	103
Annexe 6 Recensement et nature des ouvrages côtiers de la commune d'Hendaye .....	109
Annexe 7 Caractéristiques détaillées des ouvrages côtiers de la commune d'Hendaye .....	113

Annexe 8 Géométrie des ouvrages de protection côtière du front de mer d'Hendaye .....	117
Annexe 9 Scénario avec défaillance des ouvrages côtiers – géométrie de la brèche .....	121
Annexe 10 Scénario avec défaillance de la promenade des Joncaux – géométrie de la ruine .....	125
Annexe 11 Tableaux des hauteurs significative des vagues et des surcotes liées aux vagues pour l'aléa « actuel » .....	131
Annexe 12 Tableaux des hauteurs significative des vagues et des surcotes liées aux vagues pour l'aléa « 2100 » .....	135
Annexe 13 Détail de l'analyse à « dire d'expert » pour la cartographie de l'aléa .....	139
Annexe 14 Illustration de la dynamique de submersion pour l'évènement « actuel » .....	145
Annexe 15 Illustration de la dynamique de submersion pour l'évènement « 2100 » .....	151
Annexe 16 Carte des hauteurs d'eau pour l'aléa « actuel » sur le secteur d'Hendaye plage Est .....	157
Annexe 17 Carte des hauteurs d'eau pour l'aléa « actuel » sur le secteur d'Hendaye plage Ouest .....	161
Annexe 18 Carte des hauteurs d'eau pour l'aléa « actuel » sur le secteur des Joncaux .....	165
Annexe 19 Carte des vitesses de l'écoulement de l'eau pour l'aléa « actuel » sur le secteur d'Hendaye plage Est .....	169
Annexe 20 Carte des vitesses de l'écoulement de l'eau pour l'aléa « actuel » sur le secteur d'Hendaye plage Ouest .....	173
Annexe 21 Cartes des vitesses de l'écoulement de l'eau pour l'aléa « actuel » sur le secteur des Joncaux .....	177
Annexe 22 Carte de l'aléa « actuel » sur le secteur d'Hendaye plage Est .....	181
Annexe 23 Carte de l'aléa « actuel » sur le secteur d'Hendaye plage Ouest .....	185
Annexe 24 Carte de l'aléa « actuel » sur le secteur des Joncaux .....	189
Annexe 25 Carte des hauteurs d'eau pour l'aléa « 2100 » sur le secteur d'Hendaye plage Est .....	193
Annexe 26 Carte des hauteurs d'eau pour l'aléa « 2100 » sur le secteur d'Hendaye plage Ouest .....	197
Annexe 27 Carte des hauteurs d'eau pour l'aléa « 2100 » sur le secteur des Joncaux .....	201
Annexe 28 Carte des vitesses de l'écoulement de l'eau pour l'aléa « 2100 » sur le secteur d'Hendaye plage Est .....	205
Annexe 29 Carte des vitesses de l'écoulement de l'eau pour l'aléa « 2100 » sur le secteur d'Hendaye plage Ouest .....	209
Annexe 30 Carte des vitesses de l'écoulement de l'eau pour l'aléa « 2100 » sur le secteur des Joncaux .....	213
Annexe 31 Carte de l'aléa « 2100 » sur le secteur d'Hendaye plage Est .....	217
Annexe 32 Carte de l'aléa « 2100 » sur le secteur d'Hendaye plage Ouest .....	221
Annexe 33 Carte de l'aléa « 2100 » sur le secteur des Joncaux .....	225

# 1. Contexte et objectifs de l'étude

## 1.1. CADRE DE L'ETUDE

Comme suite à la prescription des Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) entre novembre 2010 et février 2011 en Aquitaine, le BRGM a été chargé par la DREAL Aquitaine et les DDTM de la Gironde, des Landes et des Pyrénées Atlantiques de caractériser l'aléa submersion marine sur les secteurs concernés. Les conditions de réalisation de cette étude font l'objet d'une convention cadre entre le BRGM et la DREAL Aquitaine signée le 19 octobre 2011 ainsi que de 3 conventions d'application entre le BRGM et les DDTM signées le 14 novembre 2011 pour la Gironde, le 29 mars 2012 pour les Landes et le 5 avril 2012 pour les Pyrénées Atlantiques (plus une convention pour le complément d'étude sur la zone des Joncaux signé le 20/07/2016).

Les secteurs faisant l'objet d'un PPRL et sur lesquels l'aléa submersion marine doit être caractérisé sont les suivants :

- En Gironde :
  - o les 10 communes bordant le Bassin d'Arcachon ainsi que la commune de Mios ;
- Dans les Landes :
  - o Secteur de Mimizan ;
  - o Secteur du courant de Soustons dont les communes de Vieux\_Boucau, Messanges, Azur, Soustons ;
  - o Secteur du Bourret Boudigau comprenant les communes de Capbreton, Soorts, Angresse, Hossegor ;
  - o A la demande de la DDTM des Landes, il sera également caractérisé l'aléa submersion marine sur le secteur de Contis (bien que ne faisant pas l'objet d'un PPRL) ainsi que l'aléa recul du trait de côte sur Contis et sur l'ensemble des secteurs concernés par un PPRL dans ce département.
- Dans les Pyrénées Atlantiques :
  - o Secteur de Saint-Jean-de-Luz dont les communes de Ciboure et d'Urrugne ;
  - o Secteur d'Hendaye dont la commune d'Urrugne.

**Dans ce présent rapport, seul le secteur d'Hendaye comprenant la baie d'Hendaye ainsi que l'estuaire de la Bidassoa et la baie de Txingudi sur les communes d'Hendaye et d'Urrugne sont traités.**

Certaines étapes de cette étude ont été réalisées avec la collaboration du bureau d'étude CASAGEC Ingénierie dans le cadre d'un contrat de sous-traitance avec le BRGM.

## 1.2. CONTEXTE REGLEMENTAIRE

Une des recommandations du Grenelle de la Mer est la révision du guide méthodologique pour l'élaboration des PPRL datant de 1997 (Garry et *al.*, 1997). Ainsi les nouveaux documents de référence diffusés par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE, ex MEDDTL) et sur lesquels s'appuie la méthodologie mise en œuvre pour cette présente étude sont :

- 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 rapport « **Premiers éléments méthodologiques pour l'élaboration des PPRL** », version 11 de novembre 2011 du MEDDTL pour la 1<sup>ère</sup> version de l'étude en 2012 ;
- le rapport « **Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux** », version finale de mai 2014 du MEDDE pour ce complément d'étude 2016.

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

La notion de bassin de risque impliquant la sélection de plusieurs évènements naturels de référence pour caractériser l'aléa de référence est également introduite (Rapport MEDDE, mai 2014).

D'autre part, 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 marin « *est caractérisé par deux paramètres au minimum, le niveau d'eau et la hauteur significative des vagues. Ces paramètres sont définis au large mais leur caractérisation à la côte est nécessaire ...* » (Rapport MEDDE, mai 2014) ;
- du rôle des ouvrages de protection côtière sur les phénomènes naturels : « *l'aléa submersion marine doit être déterminé de manière la plus réaliste possible et prendre en compte dans une certaine mesure le rôle de ces ouvrages de protection sans pour autant les considérer comme infaillibles* » (Rapport MEDDTL, v.11, novembre 2011) ;
- du changement climatique à l'horizon 2100 se manifestant en particulier par une élévation du niveau marin (sur la base des estimations du GIEC) : « *Pour l'aléa à échéance 100 ans, l'hypothèse retenue est celle d'une augmentation du niveau marin égale à 60 cm...* » (Rapport MEDDE, mai 2014).

### 1.3. DEROULEMENT ET SUIVI DE L'ETUDE

L'étude a bénéficié de l'expertise d'un comité scientifique réunissant des experts du CETMEF<sup>1</sup>, CETE SO<sup>2</sup>, BRGM, RRLA<sup>3</sup>, CASAGEC, SOGREAH et ONF<sup>4</sup>.

Préalablement à sa mise en œuvre, la méthodologie de caractérisation (<sup>5</sup>) de l'aléa a été proposée au comité scientifique de l'étude relative aux PPRL en Aquitaine et acceptée (réunion du 26/05/2011, cf. compte-rendu Annexe 1).

Les résultats de la première phase de l'étude (détermination de l'évènement naturel de référence au rivage) ont également été présentés et validés en comité scientifique (réunion du 20/09/2012, cf. compte-rendu Annexe 2). Ils font l'objet du rapport suivant : Bulteau T., Mugica

---

<sup>1</sup> CETMEF : Centre d'Etudes Maritimes Et Fluviales

<sup>2</sup> CETE SO : Centre d'Etudes Techniques de l'équipement du Sud-Ouest

<sup>3</sup> RRLA : Réseau de Recherche du Littoral Aquitaine

<sup>4</sup> ONF : Office National des Forêts

<sup>5</sup> La méthodologie a également fait l'objet d'une publication scientifique (Bulteau et al., 2012) et d'une présentation aux XII<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil de Cherbourg (2012).

J., Paris F., Pedreros R. (2013) - Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre des PPRL dans les Pyrénées Atlantiques. Détermination de l'évènement centennal au large. Rapport « intermédiaire ». BRGM/RP-61416-FR, 42 p, 23 fig., 3 tab., 1 ann.

Ensuite les autres tâches de l'étude ont fait l'objet d'une première version réalisée en 2012 et détaillée dans les rapports suivants :

- **Rapport technique de CASAGEC** : Dugor J., Rihouey D., Weber L. (2013) - Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre des PPRL des Pyrénées Atlantiques – Secteur d'Hendaye, Rapport d'étude détaillé, Avril, 50p. ;
- **Rapport final du BRGM** : Mugica J., Nicolae Lerma A., Pedreros R. avec la collaboration de Dugor J. et Rihouey D. (2014) – Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre du PPRL du secteur d'Hendaye (Pyrénées Atlantiques), Cartographie des aléas « actuel » et « 2100 ». Rapport final. BRGM/RP-62563-FR, 72 p., 34 fig., 12 tabl., 26 ann., 1 CD.

Comme suite à la mise à disposition début 2013 de données topographiques plus fines et de l'opérationnalité d'un modèle hydrodynamique mieux adapté à la configuration géomorphologique du secteur d'Hendaye (meilleure représentation des processus en milieu estuarien), un complément d'étude a été demandé par la DDTM des Pyrénées Atlantiques afin de préciser les résultats qui présentaient d'importantes incertitudes sur la zone des Joncaux.

Ce présent rapport reprend donc la 1<sup>ère</sup> version de l'étude de 2012 avec les éléments de réactualisation en 2016 qui concernent uniquement la zone des Joncaux. Les nouveautés par rapport à la 1<sup>ère</sup> version seront systématiquement encadrées.

A noter que 2 zones de configuration géomorphologique différente se distinguent sur le secteur d'Hendaye : l'une ouverte sur l'océan directement exposée à la houle (front de mer d'Hendaye) et l'autre confinée dans l'estuaire de la Bidassoa (zone des Joncaux notamment) où l'influence marine se combine à une influence fluviale. La méthode employée dans ce complément d'étude est adaptée à la configuration de la zone des Joncaux au sein de l'estuaire, c'est-à-dire qu'elle permet de reproduire l'inondation résultante de la combinaison d'un évènement marin et d'une crue fluviale. Toutefois, cette méthode appropriée à la caractérisation de l'aléa submersion marine, ne répond pas à la caractérisation de l'aléa inondation fluviale tel que défini dans les Plans de Prévention des Risques Inondation (PPRI) qui se base sur d'autres hypothèses concernant l'hydraulique fluviale (prise en compte du débit centennal par exemple).

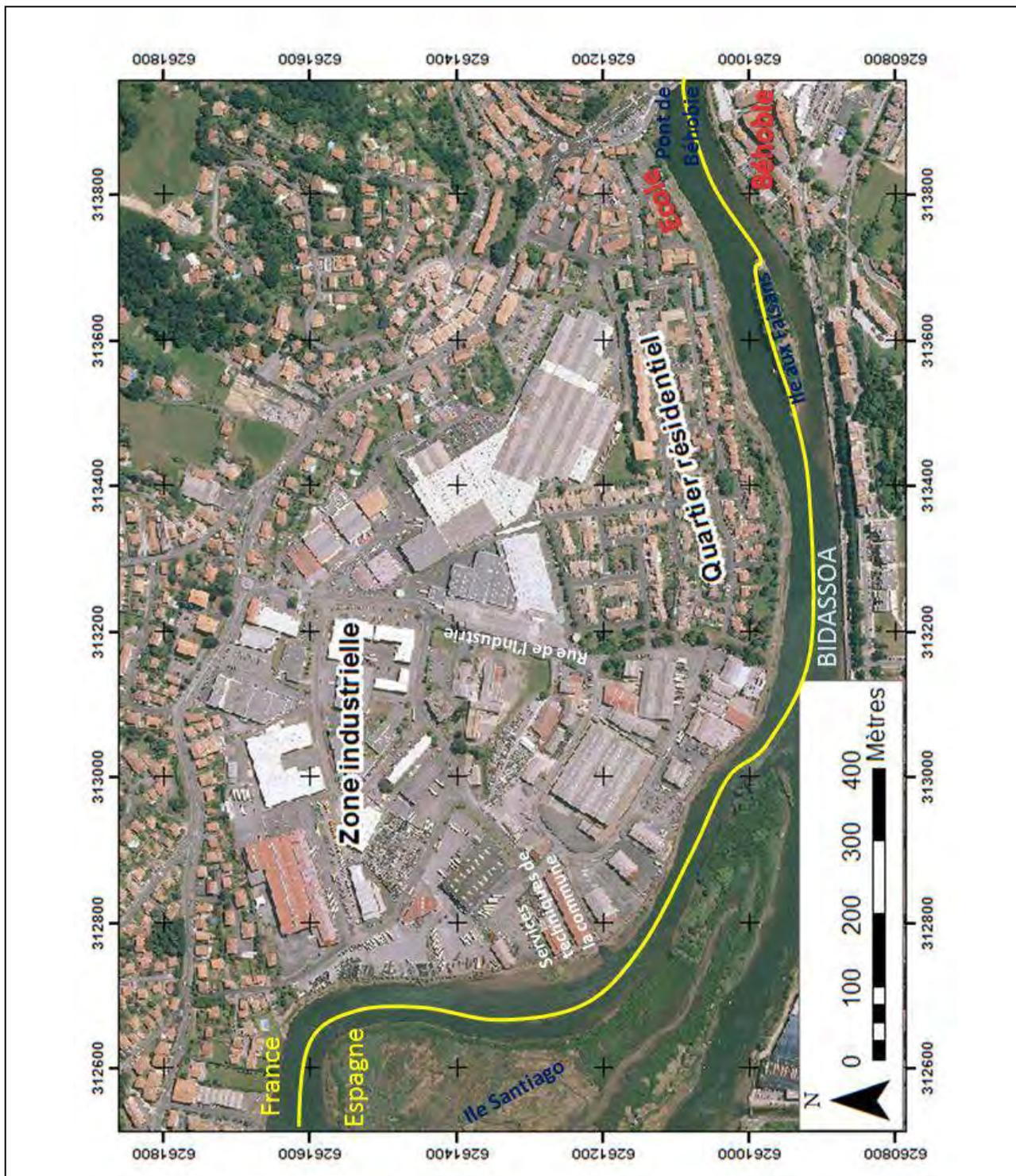


Figure 1 : Localisation de la zone des Joncaux faisant l'objet de la réactualisation de l'étude du PPRL de la commune d'Hendaye.

## 2. Principe de la méthodologie

### 2.1. NOTIONS THEORIQUES - RAPPEL DES PROCESSUS ETUDIÉS

Les submersions marines peuvent être définies comme « des inondations épisodiques de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques (forte dépression et vent de mer) et marégraphiques sévères [...] » (Garry et al., 1997). Elles sont le plus souvent associées à des surélévations temporaires du niveau de la mer lors de tempêtes ou de cyclones, voire de tsunamis<sup>6</sup>. En dehors des tsunamis, les surcotes marines sont contrôlées par deux principaux processus, indissociables pour un observateur, mais régis par des mécanismes physiques différents :

- **La surcote atmosphérique** : Le passage d'un important système dépressionnaire (cyclone, ouragan, tempête) est caractérisé par des variations du niveau marin selon deux mécanismes :
  - o 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. En théorie, le champ de pression doit être établi sur un très grand domaine océanique.
  - o Le vent génère des courants dans les masses d'eau superficielles. Ces masses d'eau poussées par les courants vers la côte peuvent s'accumuler et induire une élévation du niveau marin.
- **La surcote associée aux vagues (setup)** : à l'approche de la côte, les vagues générées au large déferlent : elles transfèrent leur énergie sur la colonne d'eau, dont une partie provoque une élévation moyenne du plan d'eau (le « *wave setup* » ou surcote liée aux vagues). Cette élévation peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres en fonction des caractéristiques des vagues (hauteur, période et direction), elles-mêmes dépendantes des phénomènes de gonflement (*shoaling*), de réfraction, de diffraction et de dissipations provoquées par les interactions avec les caractéristiques morphologiques des côtes.

L'influence relative de la surcote atmosphérique et de la houle sur l'amplitude de la surcote est fortement dépendante de la bathymétrie du domaine considéré. En présence d'un plateau continental large, c'est-à-dire une zone de pente douce et de profondeur limitée, l'action du forçage atmosphérique est prépondérante. Par contre, lorsque les pentes sont fortes et que les côtes sont protégées par des récifs par exemple, c'est en théorie l'action de la houle qui prédomine (Krien et al., 2010, BRGM/RP-58101-FR ; Garcin et al., 2013, BRGM/RP-62259-FR).

Le niveau moyen de la mer lors d'une tempête ou d'un cyclone est déterminé par l'ensemble de ces contributions, ainsi que par l'influence de la marée astronomique, c'est-à-dire la variation du niveau de la mer due à l'action gravitationnelle de la lune et du soleil.

Lors d'une tempête, le niveau d'eau atteint n'est pas la somme arithmétique des contributions de la marée, de la surcote atmosphérique et de la surcote liée à la houle. Il existe des interactions entre ces phénomènes avec la morphologie de la côte et les fonds marins. Par simplification, l'altitude maximale du plan d'eau atteinte au cours des tempêtes est souvent calculée en sommant ces contributions.

---

<sup>6</sup> Il est à noter que le risque de submersion marine par tsunami n'est pas abordé par le rapport du MEDDTL (version 11, novembre 2011) relatif à l'élaboration des PPRL.

Pour obtenir le niveau instantané de la mer, il faut tenir compte par ailleurs du **jet-de-rive** (*swash*), c'est-à-dire le flux et le reflux des vagues sur la plage. On appelle **run-up** la cote maximale atteinte par la mer au-dessus de son niveau de référence (ici le zéro hydrographique). La Figure 2 illustre l'ensemble de ces processus.

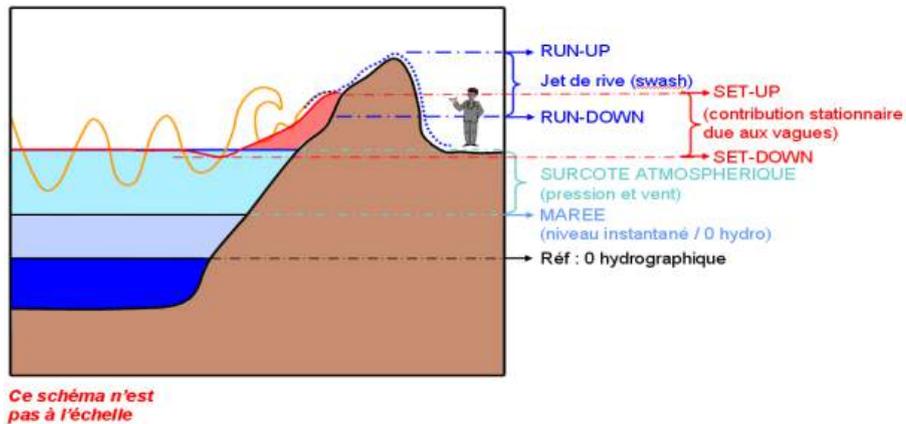


Figure 2: Synthèse des processus contribuant au niveau de la mer lors d'une tempête.

Lors des tempêtes, la submersion marine peut se produire de 3 façons (CETMEF, 2009, cf. Figure 3) :

- par débordement lorsque le niveau marin moyen atteint est supérieur à cote d'arase des ouvrages ;
- par franchissement lorsque des paquets de mer (projection de gerbes d'eau causées par le déferlement des vagues) se rependent de manière répétée en arrière des ouvrages ;
- par rupture d'un ouvrage côtier ou d'une défense naturelle (dune) faisant office de digue.

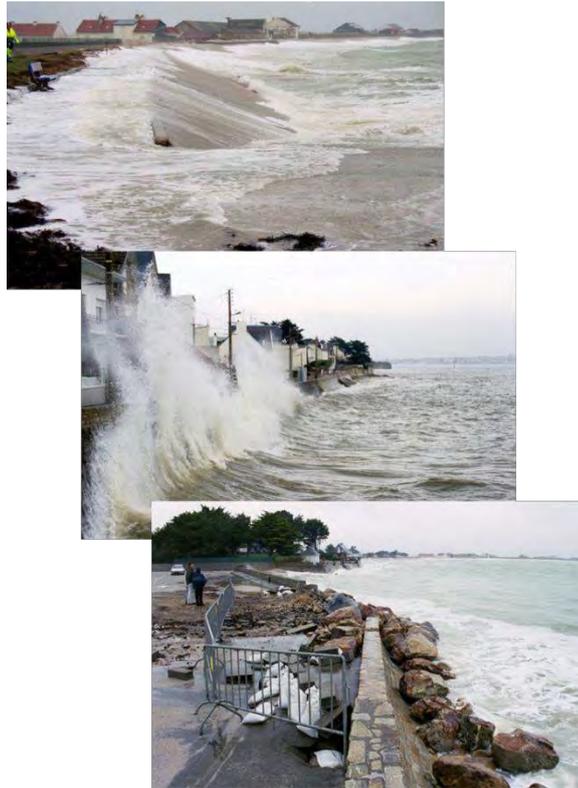


Figure 3 : Les trois types de submersion (source CETMEF 2009).

## 2.2. PRINCIPE DE LA METHODOLOGIE GLOBALE

L'aléa sera caractérisé selon les recommandations méthodologiques existantes (rapport du MEDDTL, version 11, novembre 2011) et avec les outils opérationnels et données existantes. La DREAL Aquitaine ainsi que les DDTM de la Gironde, des Landes et des Pyrénées Atlantiques ont souhaité que la méthodologie mise en œuvre soit homogène à l'échelle régionale.

Avec pour objectif la réalisation de cartes d'aléas submersion marine à une échelle au 1/25 000 (1/10 000 en zone urbaine et 1/5 000 sur les secteurs à fort enjeu) nécessaires à l'élaboration des PPRL, les principales étapes de la méthodologie mise en œuvre sont, conformément aux consignes détaillées dans les documents de référence précités, les suivantes :

1. **L'identification des données nécessaires à l'étude** est une étape préliminaire sur laquelle repose le choix de la méthodologie à mettre en œuvre ainsi que la précision des résultats. Un important travail de préparation est nécessaire afin d'une part de rassembler les différentes données bathymétriques et topographiques pour en faire un modèle numérique de terrain et d'autre part de constituer des jeux de données (vagues et niveaux d'eau par exemple) de bonnes résolutions et couvertures spatiales et temporelles. De la qualité de ce travail dépendent les étapes 3 et 4.
2. **Une étude historique** des événements de tempête ayant généré une submersion marine afin d'approfondir la connaissance locale des sites et des phénomènes auxquels il est soumis.
3. **La détermination de l'évènement naturel de référence au rivage.** La méthodologie utilisée a été proposée au comité scientifique de l'étude relative aux PPRL en Aquitaine et

acceptée (cf. paragraphe 1.3 et compte rendu en Annexe 1). Cette méthode a par ailleurs fait l'objet d'une publication scientifique (Bulteau et *al.*, 2012) et d'une présentation aux XII<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil de Cherbourg. Elle se décompose en 3 sous-étapes :

- (i) Analyse statistique pour la détermination de l'évènement centennal au large (avant le déferlement des vagues) composé des caractéristiques de vague et des niveaux d'eau (marée + surcote atmosphérique) ;
- (ii) Propagation de cet évènement centennal depuis le large vers le rivage à partir d'une modélisation numérique afin d'intégrer l'influence combinée des processus locaux résultants des conditions de vagues, de vent, de niveau marin. On détermine ainsi les conditions de la submersion à terre (inondation par débordement ou par franchissement de paquet de mer) ;
- (iii) Comparaison entre l'évènement historique et l'évènement centennal au rivage afin de déterminer l'évènement de référence ;

4. **La propagation des inondations à terre** dépend de la nature des inondations (débordements ou franchissements de paquets de mer). Elle est réalisée par l'utilisation de modèle numérique reproduisant les écoulements à surface libre. Il intègre ainsi les volumes d'eau, les interactions marée/cours d'eau en domaine estuarien ou les divers scénarios de défaillance des ouvrages.

5. **La cartographie de la submersion marine à terre pour l'évènement de référence au rivage.** Cet évènement est choisi comme le plus maximisant entre le niveau marin de l'évènement historique et celui de l'évènement centennal. Il intègre le résultat de l'ensemble des scénarios et combine la situation la plus défavorable conduisant aux limites de submersion maximale pour un évènement centennal.

### 2.3. SCENARIOS ETUDIES

Conformément aux recommandations méthodologiques du MEDDTL (circulaire du 27 juillet 2011, rapport d'octobre 2011), les scénarios d'aléas étudiés sont les suivants :

- **scénario de l'aléa dit « sans ouvrage »** : scénario en l'absence d'ouvrage (hypothèse de ruine généralisée de l'ensemble des ouvrages de protection), déterminé à partir de l'évènement de référence, aboutissant une cartographie à titre informatif ;
- **scénario de l'aléa dit « actuel »**<sup>7</sup> : scénario de référence déterminé à partir de l'évènement naturel de référence et d'hypothèses sur les structures de protection, aboutissant à la cartographie de l'aléa de référence qui, croisée aux enjeux, permettra l'élaboration du zonage réglementaire et du règlement du Plan de Prévention des Risques Littoraux ;
- **scénario de l'aléa dit « 2100 »** : scénario à échéance 100 ans déterminé à partir de l'évènement de référence prenant en compte l'élévation du niveau de la mer liée à l'impact du changement climatique, aboutissant à la cartographie de l'aléa à échéance 100 ans qui, croisée à l'aléa de référence et aux enjeux, permettra le calage des cotes de constructibilité.

---

<sup>7</sup> A noter : Compte tenu des hypothèses de défaillance retenues pour le scénario de l'aléa dit « actuel », qui seront détaillées dans le paragraphe 6.2, les résultats de ce scénario sont identiques à ceux du scénario de l'aléa dit « sans ouvrage » (cf paragraphe 9.4). C'est pourquoi seules les cartes de l'aléa dit « actuel » sont fournies.

Le niveau marin de référence pour cartographier les aléas « actuel » et « sans ouvrage » est celui correspondant au plus fort du niveau centennal (obtenu par des méthodes statistiques + incertitudes) et du niveau historique le plus haut connu (+ incertitudes), auquel on rajoute 20 cm au titre d'une première prise en compte de l'élévation du niveau de la mer du fait du changement climatique en cours (Figure 4).

Pour cartographier l'aléa « 2100 », le niveau marin de référence à échéance 100 ans est obtenu en ajoutant 40 cm au niveau marin de référence conformément au scénario pessimiste de l'ONERC (rapport MEDDTL, v11, novembre 2011).

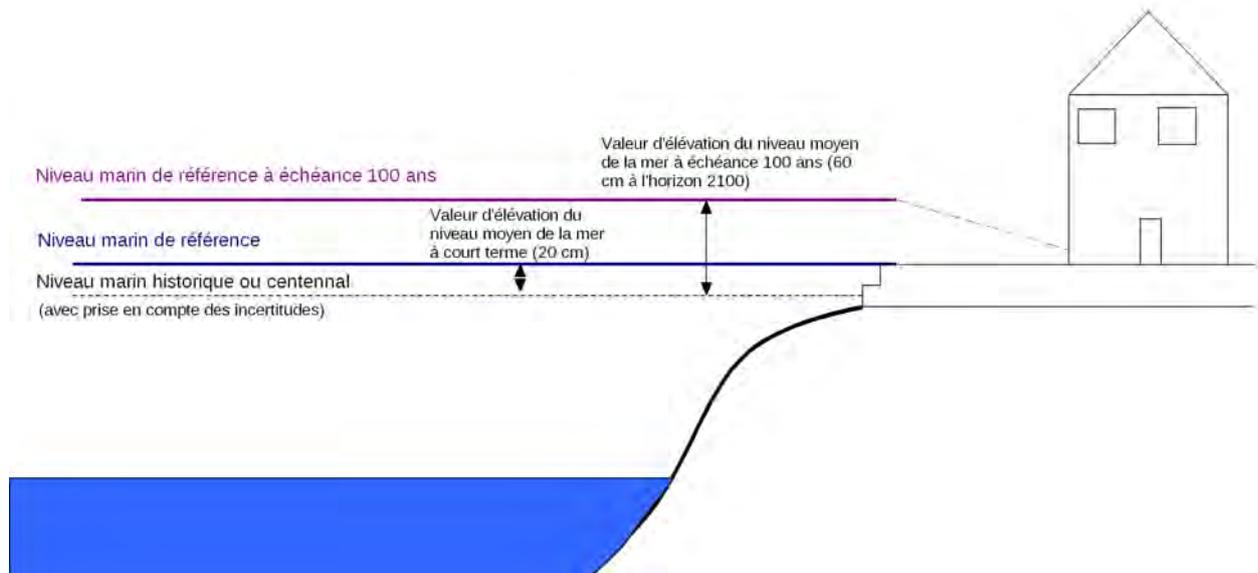


Figure 4 : Niveaux marins à prendre en compte pour la caractérisation des aléas submersion marine (Rapport MEDDTL, v11, novembre 2011).



### 3. Présentation générale du secteur d'étude

#### 3.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIE GENERALE

La commune d'Hendaye se situe au fond du Golfe de Gascogne, à l'extrême Sud-Ouest de la côte basque (Figure 5). Elle est délimitée à l'Ouest par la baie de Txingudi où le fleuve Bidassoa forme une ria qui trace la frontière entre la France et l'Espagne (commune de Fontarabie et Irun). Cette baie communique avec l'océan par l'intermédiaire de la baie des Figuiers où s'étend la grande plage d'Hendaye.

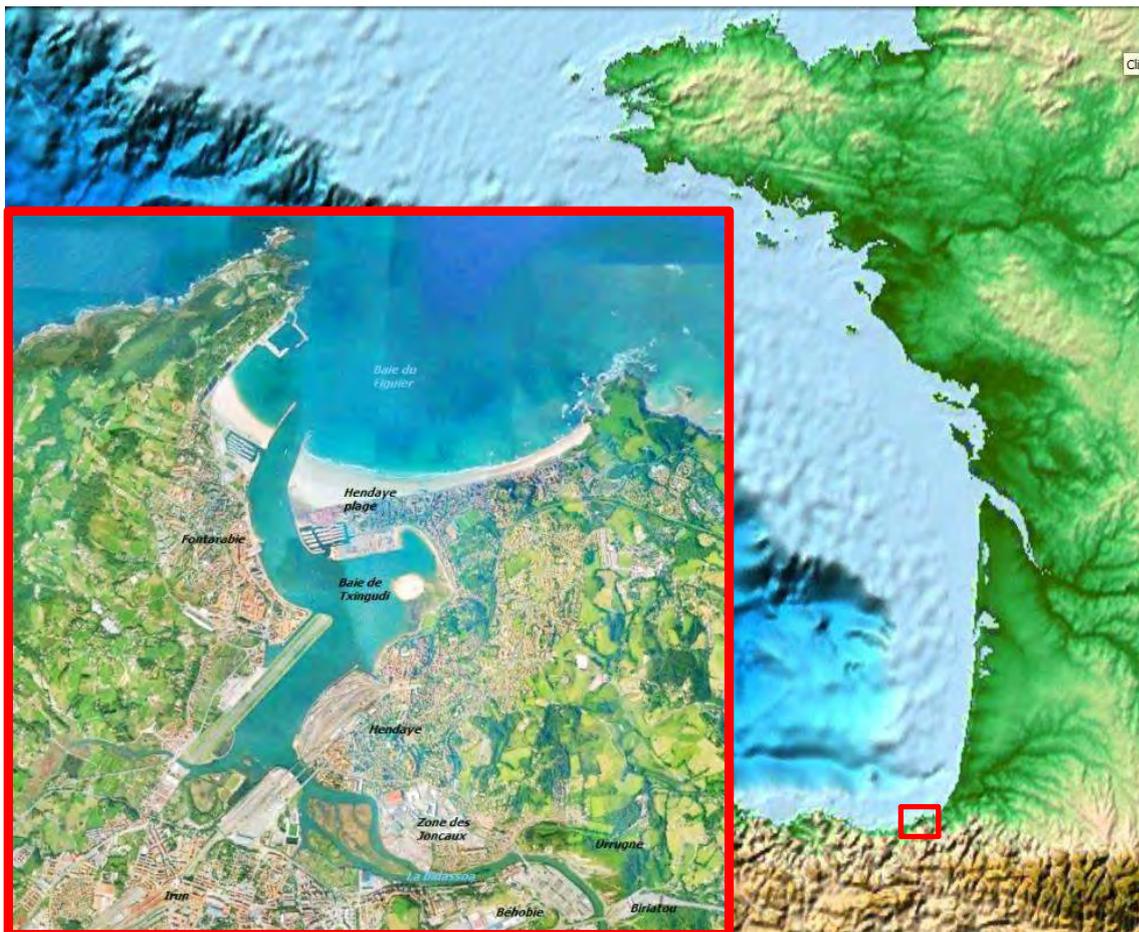


Figure 5 : Situation du secteur d'étude d'Hendaye.

Le côte basque peut être divisée en 2 unités géomorphologiques littorales distinctes : une côte sableuse qui est l'extrême sud du système landais (de l'embouchure de l'Adour au Nord de la commune de Biarritz) et la côte rocheuse incluant les communes de Biarritz, Bidart, Guéthary, Saint-Jean-de-Luz, Ciboure, Urrugne, et Hendaye.

Le contexte géologique (Figure 6) de la côte rocheuse se caractérise par une alternance de formations marno-calcaires à faciès de Flysch, dans lesquelles se découpent de petites plages de poche ou des baies plus étendues comme celles de Saint-Jean-de-Luz et d'Hendaye (baie de Figuiers). Au niveau de la commune d'Hendaye, les apports continentaux sont véhiculés principalement par la Bidassoa ainsi que par ses affluents qui traversent des terrains granitiques, schisteux et gréseux du Dévonien et du Carbonifère. Les apports marins véhiculés

par une dérive littorale majoritairement Nord-Est Sud-Ouest sont principalement des sables moyens issus de l'érosion des falaises littorales.

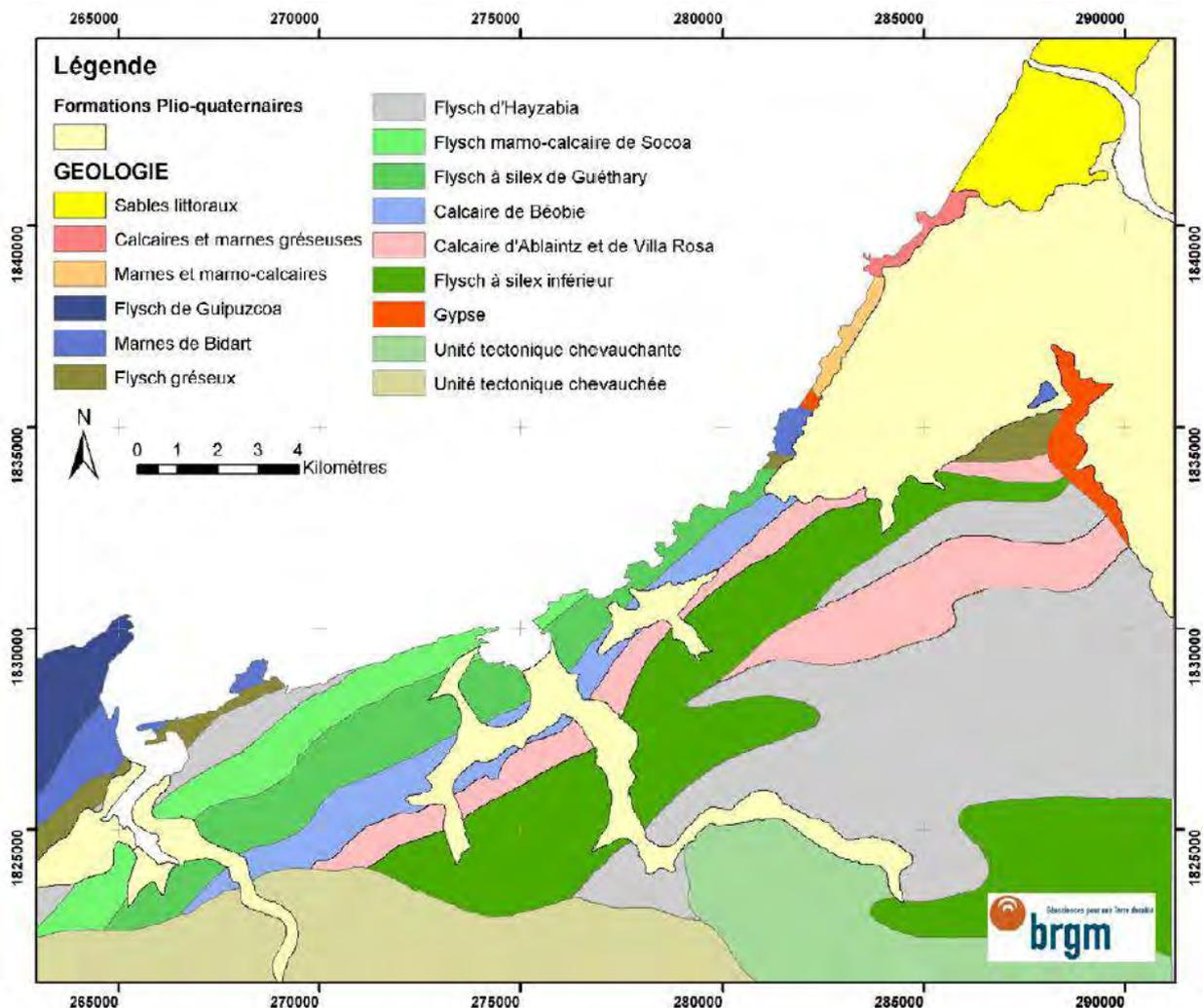


Figure 6 : Carte lithologique simplifiée de la Côte Basque (Genna et al., 2005).

### 3.2. CARACTERISTIQUES OCEANOGRAPHIQUES

#### 3.2.1. Marée

Sur la côte basque, la marée est de type semi-diurne de période 12h25'. L'amplitude maximale de la marée est de 4,91 m mais peut-être réduite à des amplitudes moyennes de 1,85 m lors des périodes de mortes eaux. Le marnage (différence de hauteur entre une pleine mer et une basse mer) est qualifié de mésotidal (c'est-à-dire qu'il est compris entre 1 et 6 m).

La marée astronomique varie peu sur la partie sud du bassin Aquitain. Le port de référence pour le secteur d'Hendaye est donc celui de Socoa, dont le Tableau 1 donne les informations des niveaux de marée en référence au zéro NGF de l'IGN69 avec :

- PHMA : Plus Haute Mer Astronomique ;
- PMVE : Pleine Mer de Vive Eau ;
- PMME : Pleine Mer de Morte Eau ;

- NM : Niveau Moyen ;
- BMME : Basse Mer de Morte Eau ;
- BMVE : Basse Mer de Vive Eau ;
- PBMA : Plus Basse Mer Astronomique.

La valeur Niveau Moyen (NM) correspond ici au niveau moyen de la marée calculé pour une période de données de plusieurs années enregistrée par le marégraphe.

Références Altimétriques Maritimes	PHMA	PMVE	PMME	NM	BMME	BMVE	PBMA
Niveau (m) rapporté au zéro hydrographique (ZH)	4.90	4.30	3.35	2.48	1.55	0.60	-0.01
Altitude (m) rapporté au référentiel IGN69 Réf (*)	2.73	2.13	1.18	0.31	-0.62	-1.57	-2.18

Tableau 1 : Références Altimétriques Maritimes (RAM 2011 - SHOM) pour le marégraphe de Socoa(\*) Converties dans le référentiel IGN69 (m/NGF). ZH/Réf = -2.171 m.

Le niveau d'eau peut être également modifié par une surcote de tempête. Les analyses réalisées par le SHOM et le CETMEF en 2008 au niveau du marégraphe du port de référence de Saint-Jean-de-Luz (Socoa) donnent les informations suivantes sur les surcotes, (Tableau 2):

Période de retour	Surcote de tempêtes
<b>1 an</b>	+0,35 m
<b>10 ans</b>	+0,50 m
<b>50 ans</b>	+0,60 m
<b>100 ans</b>	+0,65 m

Tableau 2 : Estimation des surcotes au niveau du marégraphe de Socoa du port de référence de Saint-Jean-de-Luz (SHOM / CETMEF, 2008).

Ces informations ont été révisées et enrichies d'une analyse statistique des valeurs extrêmes de surcotes de pleine mer selon les méthodes d'exponentielle et les lois GPD (Generalized Pareto Distribution). Les résultats obtenus avec la méthode GPD sont présentées dans le Tableau 3.

Période de retour (années)	5	10	20	50	100	1000
<b>Surcote de Pleine mer (m)</b>	0,47	0,50	0,53	0,55	0,57	0,61
<b>Intervalle de confiance à 70% (cm)</b>	45- 48	48- 52	51- 54	53- 58	55- 60	57- 65

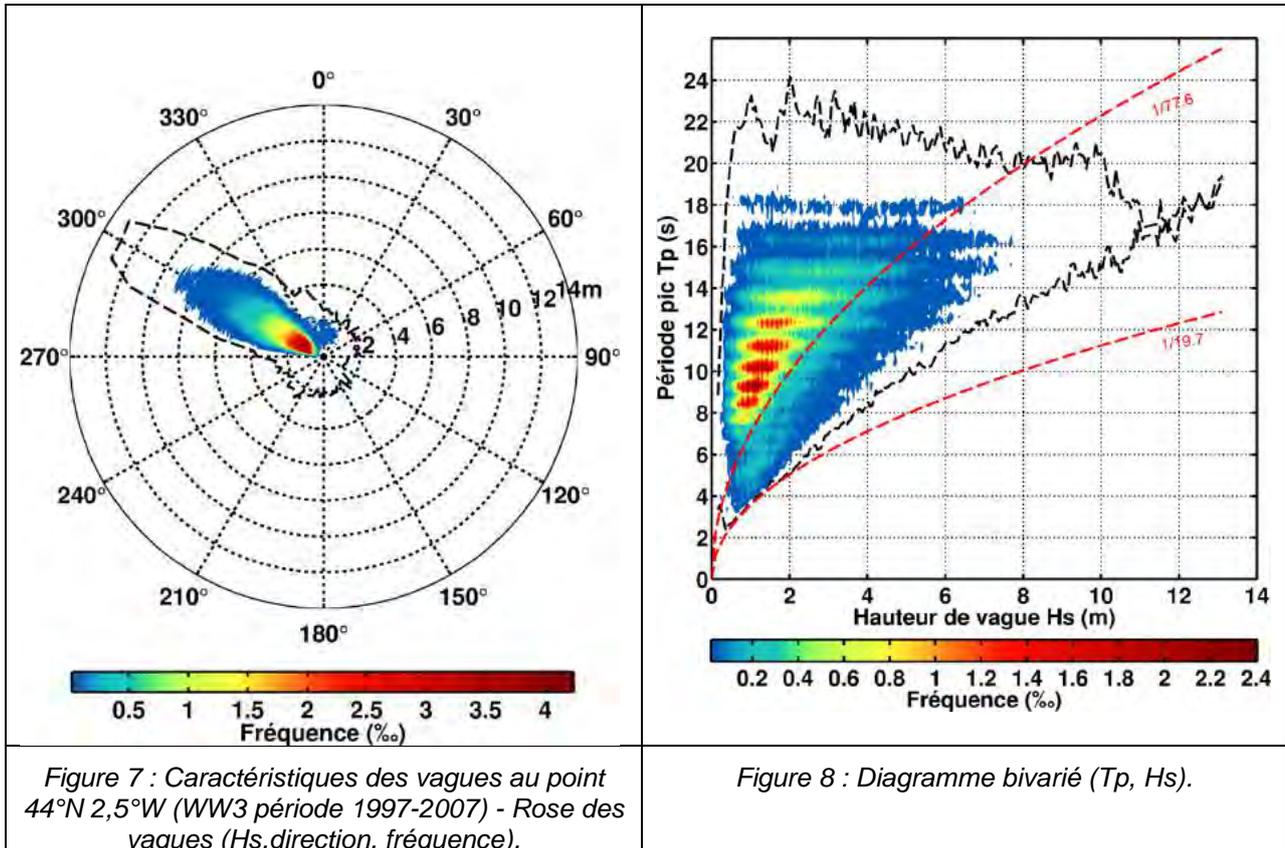
Tableau 3 : Estimation des surcotes de pleine mer au marégraphe de Socoa du port de référence de Saint-Jean-de-Luz (CETMEF, 2013).

Les courants de marées, de l'ordre de  $0,04 \text{ m.s}^{-1}$  en surface sur la côte basque pour une marée de vive-eau moyenne Pedreros et al, 2009), sont faibles et ont peu d'influence par rapport aux courants générés par le déferlement des vagues sur la côte.

### 3.2.2. Vagues

La côte basque est exposée aux houles du fait de son encaissement au fond du Golfe de Gascogne et de la faible largeur du plateau continental.

D'un point de vue général, les données du modèle WW3 au large d'Hendaye (point 44°N, 2,5°W sur la période 1997 à 2007) permettent de caractériser les types de houles observables.



Comme mis en évidence par la Figure 7, l'étalement directionnel des houles est restreint. Elles proviennent presque exclusivement du secteur Ouest Nord-Ouest (environ 300°). Sur cette figure, la valeur de la hauteur significative des vagues (Hs) se lit sur l'axe radial (0-14 m). L'enveloppe des points de la série temporelle est représentée par la ligne noire en tiretés. La fréquence d'occurrence des couples hauteur significative et direction pic des vagues, est représentée par l'échelle de couleur (min = 0,02‰) avec une discrétisation de 5° pour la direction pic et 5 cm pour la hauteur significative.

L'intensité des vagues est estimée en croisant la hauteur significative et la période pic des vagues comme mis en évidence sur la Figure 8. Les lignes rouges en tiretés représentent différentes valeurs de cambrure des vagues (relation entre la hauteur et la longueur d'onde des vagues), 1/19,6 et 1/77,6. On considère que la mer de vent (houle locale) se développe entre les deux limites. En revanche, les houles longues (origine lointaine) se développent au-delà de la limite 1/77,6. **Les régimes de vague observables sur la côte basque sont donc principalement d'origine lointaine. Ils peuvent exceptionnellement atteindre des valeurs de Hs supérieures à 12 m et des périodes supérieures à 20 s (enveloppe ligne noire pointillée).**

Plus en détails, l'étude menée par Pedreros et al. (2009) a permis d'établir une connaissance exhaustive des paramètres des vagues (conditions saisonnières, moyennes et extrêmes) sur l'ensemble du littoral Basque. L'analyse détaillée de 7 ans de données (du 01/01/1997 au 30/09/2003) extraites du modèle Wavewatch 3 (NWW3), *Tolman et al.* (2002) pour le point 44°N et 2,5°W (profondeur d'environ 1000m) a permis de caractériser l'exposition de cette côte aux vagues. Cette étude a débouché sur une classification des types de vagues observables (paramètres Hs, Tp, Dp sur la côte Basque selon la méthodologie détaillées dans *Abadie et al.* (2005).

Le climat de houle est caractérisé par une hauteur significative moyenne de 1,83 m, une période pic de 9,6 s et une direction pic de 301,9°. Les régimes de tempête représentent 7,5% de la période étudiée. Elles sont caractérisées par des houles de hauteur supérieure à 4 m et des périodes pics de l'ordre de 12 s, provenant du secteur Ouest/Nord-Ouest ( $\approx 300^\circ$ ).

Pour ce qui est de l'incidence des houles à la côte, il existe un gradient Nord/Sud liée aux différentes expositions de la côte. Par exemple des houles de tempête, dont les valeurs sont de 5,54 m au large, atteignent la côte avec des valeurs de 4,6 m sur les secteurs les plus exposés (par exemple, en face de la plage d'Erromardie) mais seulement 1,1m sur les secteurs les plus abrités (la baie des Figuiers). Compte tenu de la morphologie générale de la côte et des particularités locales de la bathymétrie, le secteur d'Hendaye est donc une des parties de la côte basque relativement moins exposée aux fortes houles

### **3.3. CARACTERISTIQUES METEOROLOGIQUES**

#### **3.3.1. Climat général**

La position géographique du Pays Basque lui confère un climat de type tempéré océanique influencé par la présence des Pyrénées. En effet, sa position méridionale dans le Golfe de Gascogne le met à l'abri des perturbations océaniques les plus puissantes, et la proximité des montagnes pyrénéennes lui assure un climat doux et humide tout au long de l'année. Les températures moyennes sont élevées.

Dans l'ensemble, les saisons sur le littoral basque sont assez bien marquées (*cf.* Figure 9) : les contrastes de températures de plus de 10°C marquent bien l'hiver et l'été. Au printemps et en été, les vents d'ouest à nord-ouest sont dominants. L'effet de foehn en amont des reliefs pyrénéens a alors pour conséquence de générer de fortes précipitations sur le Pays Basque français. En revanche, les vents venant du sud apportent par effet de foehn, un air chaud et relativement sec en automne et hiver. Les totaux pluviométriques moyens sont toutefois importants, de l'ordre de 1400 mm au cours d'une année.

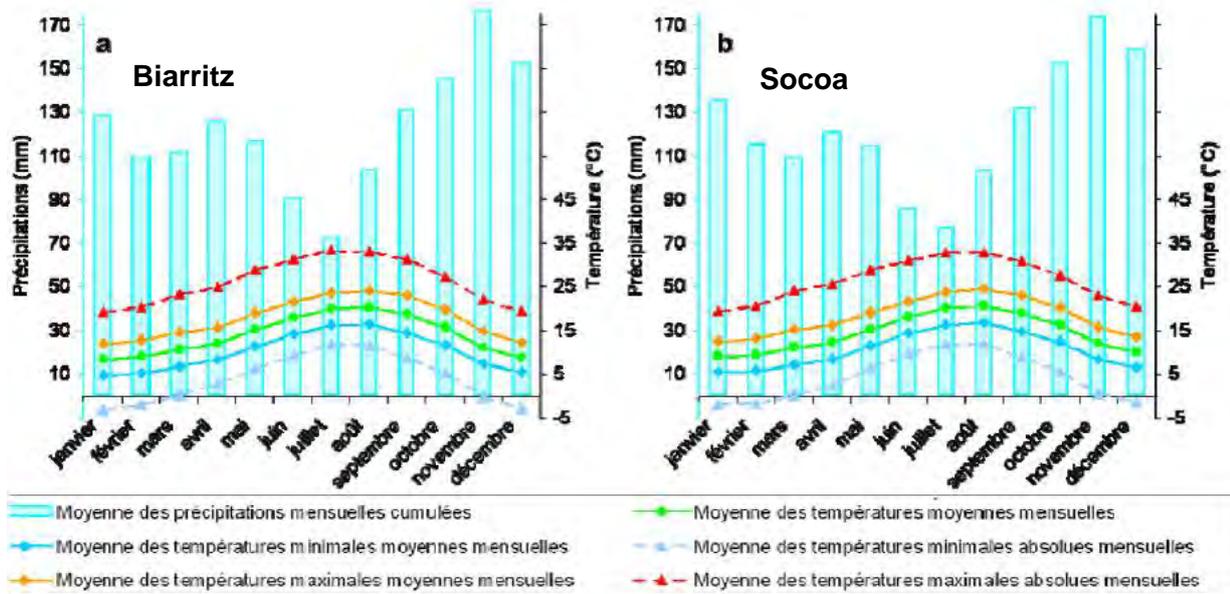


Figure 9 : Diagrammes ombrothermiques.

Valeurs calculées à partir des données météorologiques moyennes des stations de a) Biarritz (code station : 64024001, période couverte : 1956-2008) et de b) Socoa (code station : 64189001, période couverte : 1921-2008, MétéoFrance, 2008).

### 3.3.2. Les Vents

L'analyse statistique des vents mesurés à la station Météo France de Biarritz sur une période de 15 ans (de janvier 1991 à février 2006) met en évidence les tendances suivantes :

- Vitesse annuelle moyenne de 3,7 m/s ;
- Automne/Hiver : fortes occurrences des vents forts d'Ouest et des vents faibles Sud à Sud-Est (< 3 m/s) ;
- Printemps/été : vents dominés par les brises marines d'Ouest à Nord-Ouest présentant des vitesses faibles (< 3 m/s).

### 3.4. CARACTERISTIQUES D'HYDROLOGIE CONTINENTALE

La dynamique hydrologique continentale dans l'estuaire du fleuve Bidassoa est un élément important de la caractérisation de l'aléa de submersion marine pour le secteur d'Hendaye. D'une longueur totale de 66 km, la Bidassoa prend sa source en Navarre (dans la Vallée de Baztan) et l'Ezkurra est son principal affluent. Son bassin versant, qui s'étend principalement en Navarre, couvre une surface d'environ 710 km<sup>2</sup>.

En amont du bassin jusqu'à l'embouchure de l'Ezkurra, ses affluents présentent des pentes fortes de l'ordre de 2 à 3%, ce qui confère à la rivière un caractère torrentiel très accentué. En aval, à partir d'Endarlaza, la Bidassoa quitte la Navarre pour former la ligne frontalière entre le Gipuzkoa et les Pyrénées Atlantiques. L'adoucissement des pentes fait perdre à la rivière son caractère torrentiel. Les paysages alternent dès lors entre petites collines et terrasses alluviales.

Les données utilisées proviennent de la station d'Endarlaza située à une dizaine de kilomètres de l'embouchure de la Bidassoa. Elles couvrent une période de 36 ans de 1970 à 2007 (cf. Figure 10). Les données présentées ont été obtenues par CASAGEC Ingénierie dans le cadre du projet Européen BIDUR.

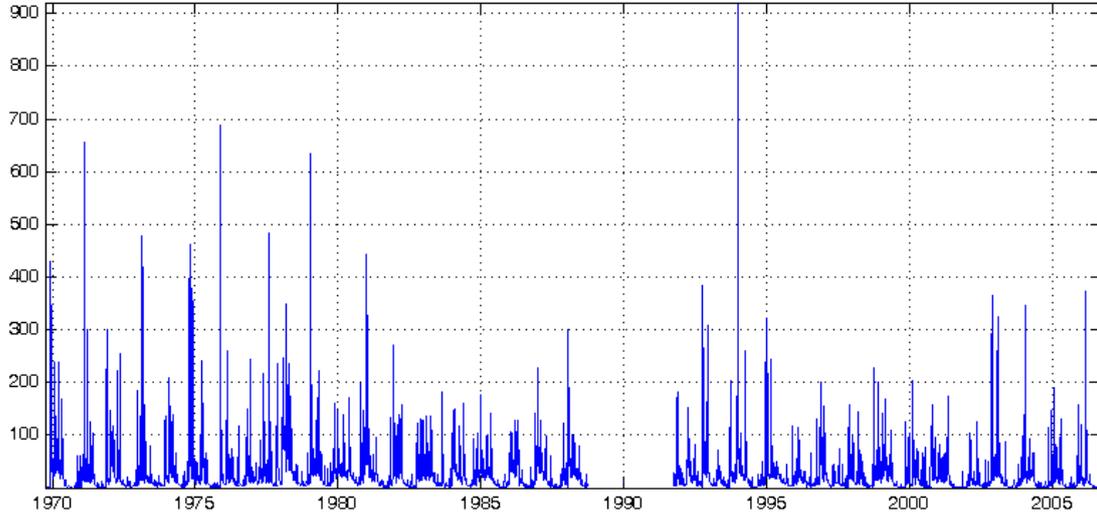


Figure 10 : Série temporelle des données de débits moyens journaliers ( $m^3.s^{-1}$ ) à Endarlaza.

La Bidassoa possède un débit moyen de  $27,9 m^3.s^{-1}$ . Au cours de l'année, l'évolution des débits moyens mensuels est comparable à celle de la pluviométrie. En hiver et au printemps le débit moyen varie entre 20 et  $40 m^3.s^{-1}$ , alors qu'en été le débit moyen s'établit entre 7 et  $12 m^3.s^{-1}$ . (cf. Figure 11). Le débit d'étiage minimum est de  $1,75 m^3.s^{-1}$ .

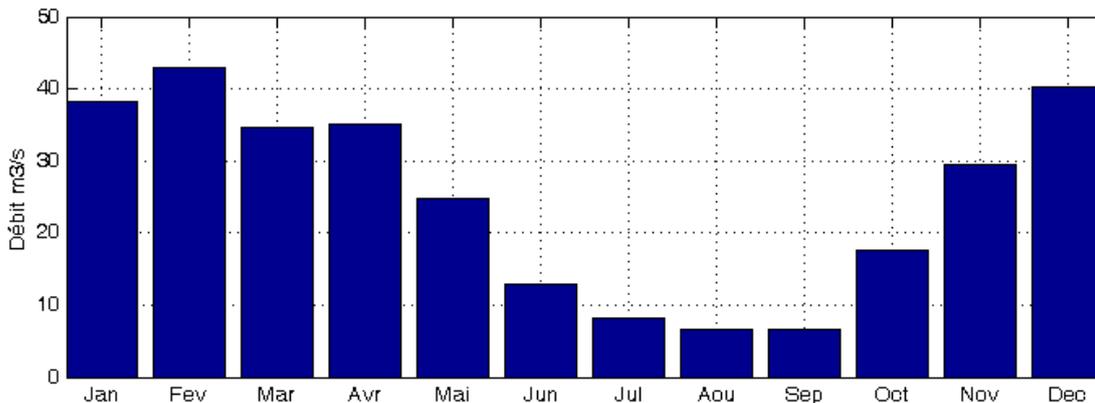


Figure 11 : Modules interannuels du débit calculé sur 36 ans.

Concernant les crues, le débit journalier moyen maximal a été enregistré le 26 Décembre 1993 à  $920,9 m^3.s^{-1}$ . Le débit maximal instantané enregistré à ce jour a été de  $1233 m^3.s^{-1}$ .



## 4. Données topographiques et bathymétriques

Plusieurs bases de données topographiques et bathymétriques ont été utilisées dans cette étude afin de constituer des modèles numériques de terrain. Ces outils sont nécessaires à la réalisation des modélisations permettant d'évaluer l'aléa de submersion marine. Le descriptif des bases de données utilisées provient du rapport CASAGEC INGENIERIE (Dugor *et al.* 2013). La question des modalités de la prise en compte des ouvrages de protection dépend essentiellement du degré de précision de la donnée de base (résolution spatiale) et des types d'ouvrages. On présente donc dans un premier temps les caractéristiques des données topo-bathymétriques avant de réaliser un recensement des ouvrages de protection côtière dans la partie suivante.

### 4.1. TOPOGRAPHIE

#### 4.1.1. Données LIDAR GUIPUZCOA

La province espagnole du Guipúzcoa met à disposition gratuitement ses données issues de levés LIDAR aéroportés réalisés en 2008 par l'IGN (*Instituto Geográfico Nacional*). Il s'agit d'une grille de points de résolution spatiale 1 m. Les métadonnées liées n'explicitent pas la précision altimétrique de cette grille. Néanmoins, on sait que les systèmes LIDAR autorisent en moyenne une précision d'une vingtaine de centimètres sur l'altitude. Ces données ont été traitées et représentent la hauteur du sol uniquement (*cf.* Figure 12). Le niveau de détail atteint est très intéressant, et ces données recouvrent une bonne partie des zones identifiées comme menacées par le risque de submersion. Il manque cependant la partie Nord-Est d'Hendaye-Plage où d'autres données devront être exploitées.

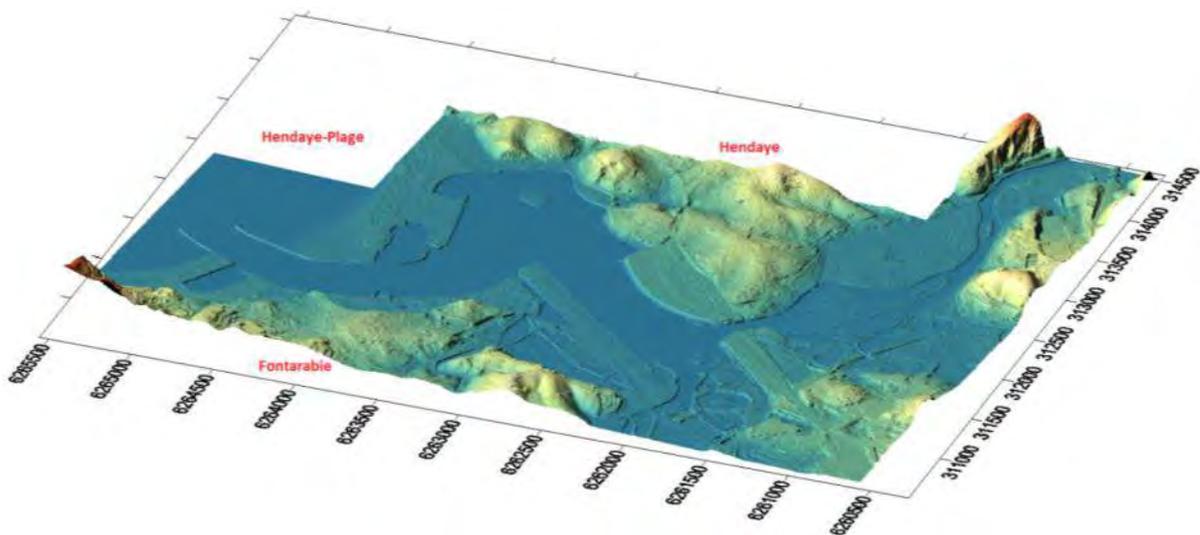


Figure 12 : Visualisation du MNT issu de données LIDAR.

#### 4.1.2. Autres données altimétriques

D'autres bases de données utilisées sont issues de levés topographiques classiques réalisés par des étudiants techniciens-géomètres. Un levé topographique de la zone d'activité des Joncaux (en particulier de la voirie et des berges de la Bidassoa) a été réalisé par des étudiants

technicien géomètre (lycée de Cantau, Anglet). Ils ont eu recours à des techniques de topométrie classique : tachéométrie optique s'appuyant sur un canevas polygonal, lui-même déterminé et rattaché au système géodésique légal (RGF93 - Lambert 93 / NGF IGN 69) par observations GPS (Figure 13).

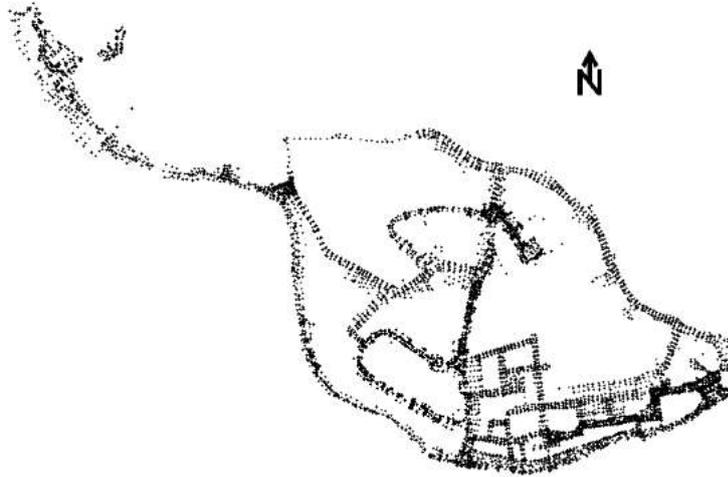


Figure 13 : Nuage de points issu du levé topographique sur la zone d'activité des Joncaux.

Ces levés apportent des détails topographiques permettant l'ajout de lignes de rupture de pente (*polylignes 3D*) bien identifiées et améliore ainsi la qualité du modèle numérique de terrain. Ces données ont essentiellement été utilisées au niveau de la promenade des Joncaux au niveau de laquelle s'effectuent les entrées d'eau et qui est, par endroit, surélevée par rapport au terrain naturel situé en arrière. Ainsi, le modèle de base est amélioré et devient plus fidèle à la réalité.

#### 4.1.3. Points de niveau fournis par le BRGM

À la suite de ce premier inventaire, le BRGM a mandaté le cabinet de géomètre expert Pinatel et Bigourdan pour collecter les données manquantes, principalement dans les rues d'Hendaye plage et sur le secteur des Joncaux.

#### 4.1.4. Points de niveau fournis par le CASAGEC

Enfin, l'équipe CASAGEC Ingénierie est retournée plusieurs fois sur le terrain pour prendre ou vérifier la hauteur des ouvrages, des digues ou des quais grâce à l'utilisation d'un GPS RTK.

#### 4.1.5. Données LIDAR RGE ALTI®

Dans la 1<sup>ère</sup> version de l'étude en 2012, la BD Alti de l'IGN a été employée, à défaut de données plus fines, afin de combler un manque de données LIDAR à l'Est de la zone des Joncaux. Cette base de données est un bon moyen de localiser les zones basses à étudier car elle est disponible sur toute la zone terrestre mais elle n'est pas suffisamment précise ( $\pm 1$  m sur les points cotés et de 2 à 3 m sur les courbes de niveaux, résolution de 50 m) pour construire le MNT nécessaire à la caractérisation de l'aléa submersion dans le cadre de PPRL.

La mise à disposition début 2013 du produit RGE ALTI® (version 1) disponible sur toute la zone des Joncaux (Figure 16), permet une meilleure représentation du terrain naturel grâce à une résolution spatiale très fine (1m) et une précision verticale de  $\pm 20$  cm. Il s'agit d'une base de

données altimétriques unique et continue donnant une représentation tridimensionnelle de la forme et de la position du sol sur la frange littorale terrestre du territoire français (métropole, départements et collectivités d'Outre-Mer).

Les éléments de sursol ont été effacés avant la mise à disposition et ne sont pas représentés dans ce produit : bâtiments, objets mobiles ou temporaires (véhicules par exemple), tabliers de pont, végétation, etc... Les données de la zone terrestre ont été acquises par laser topographique.

#### Comparaison des données topographiques

Les données DGPS précitées (paragraphe 4.1.2 et 4.1.3) ont été utilisées afin de vérifier la qualité et la précision du produit du RGE ALTI®. Pour cela, un outil a été développé afin d'extraire du fichier raster du LIDAR l'altitude de chacun des pixels (taille de 1m<sup>2</sup> dans cette étude) contenant les points du levé DGPS.

La Figure 14 met en évidence une globale surélévation du MNT du RGE ALTI® par rapport aux levés DGPS du cabinet de géomètre Pinatel et Bigourdan. La majorité des altitudes des points du LIDAR se situent entre 0 et 0,2 m au-dessus des altitudes des points DGPS.

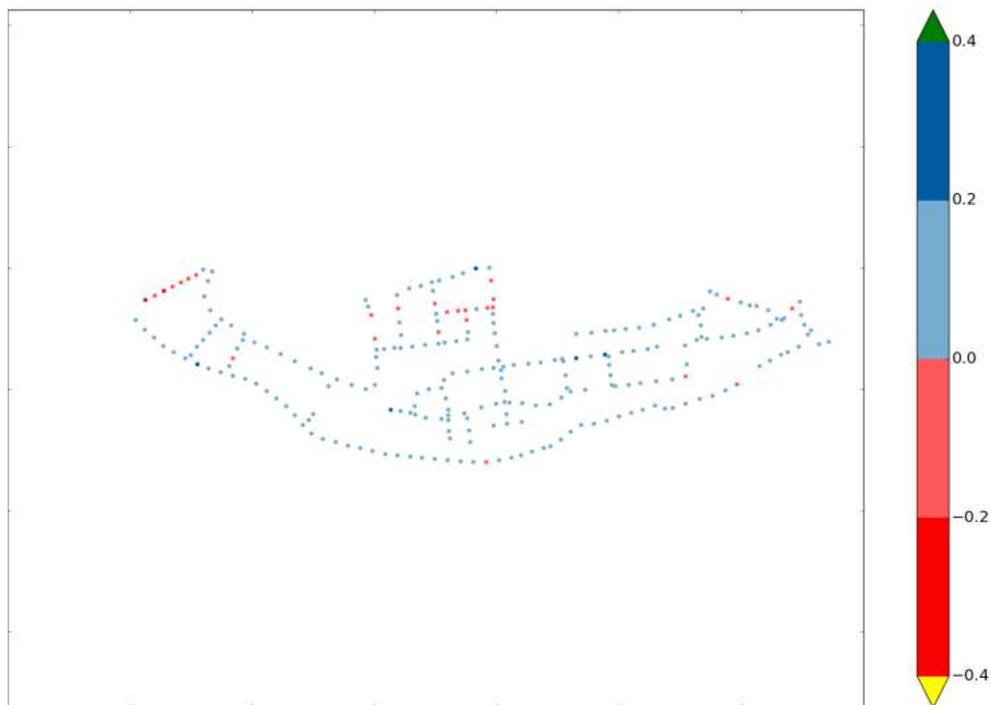


Figure 14 : Comparaison entre le levé DGPS Pinatel et Bigourdan (2012) et le levé LIDAR de l'IGN RGE ALTI® (2012). Vue en plan des points (échelle de couleur: Différence LIDAR - Levé DGPS).

La Figure 15 confronte l'altitude des 2 levés et donne les principaux indices statistiques (biais, erreur quadratique moyenne et la droite de régression linéaire). L'erreur quadratique moyenne est bien inférieure à 0,2 m (0,11 m) sur l'ensemble des points du levé DGPS. Le biais de l'ensemble du levé est de 0,08 m. Cette comparaison a également été effectuée entre les données LIDAR et DGPS du Lycée Cantau (Tableau 4).

Cinq altitudes de points du LIDAR se situent à plus de 20 cm des points du levé DGPS. Une minorité de points du LIDAR se situent en dessous du levé de géomètre, notamment sur la partie Ouest de la zone des Joncaux, au niveau des locaux des services techniques de la ville.

Cette erreur est probablement due à la localisation des points DGPS qui se situent sur la crête d'un mur de séparation de propriété. Le MNT du LIDAR ayant une résolution d'un mètre, la comparaison ne peut être effectuée exactement avec des points situés sur la crête d'un muret d'une épaisseur d'environ 20 cm.

Dans l'ensemble, la comparaison entre les deux levés montre une bonne corrélation hormis une minorité de points qui donne des écarts plus importants. Ces erreurs sont liées à la localisation des points sur des secteurs géographiques très escarpés. La comparaison de points DGPS et un MNT de résolution 1 m sur ces zones à forte pente, engendre des différences d'altitudes.

En conclusion, le constat de la tendance à une surestimation de l'altitude comprise entre 10 et 20 cm en moyenne a conduit à abaisser le RGE ALTI® de 10 cm.

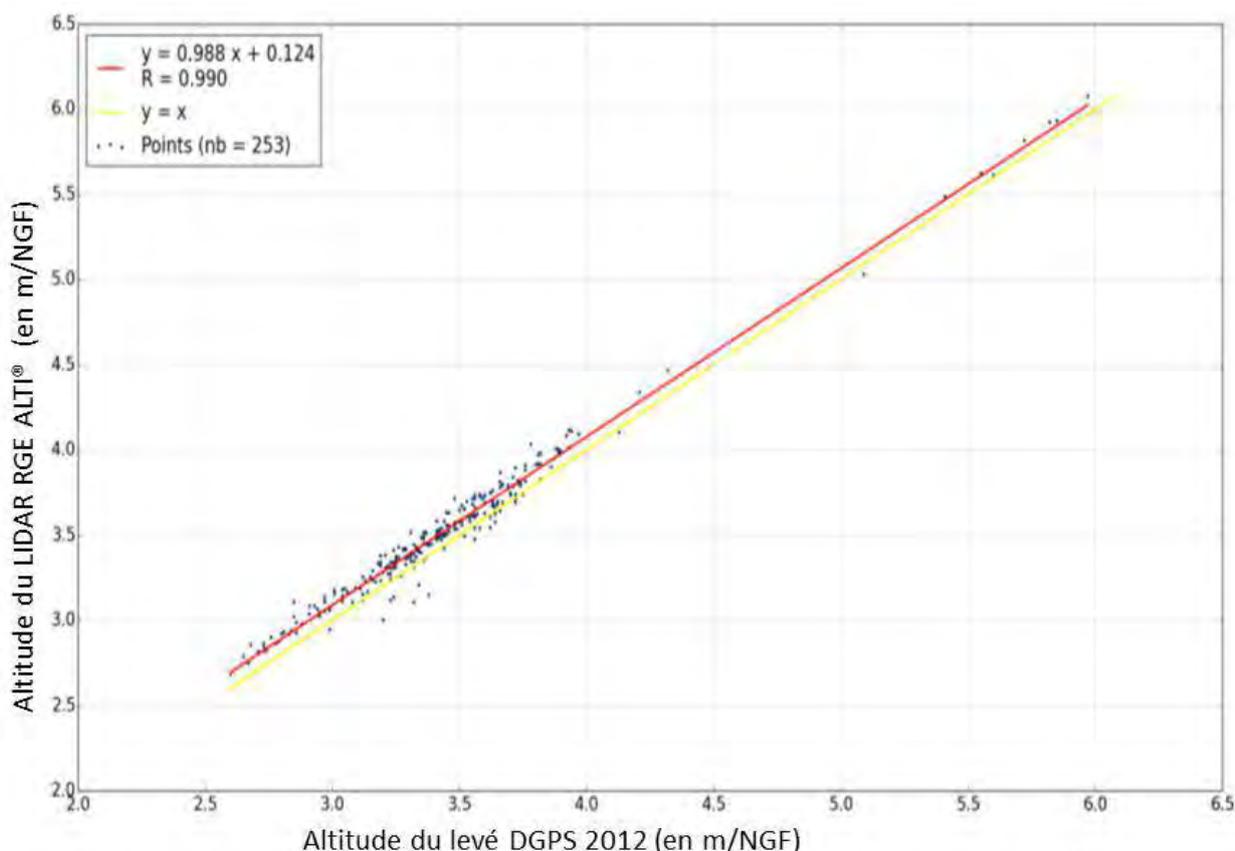
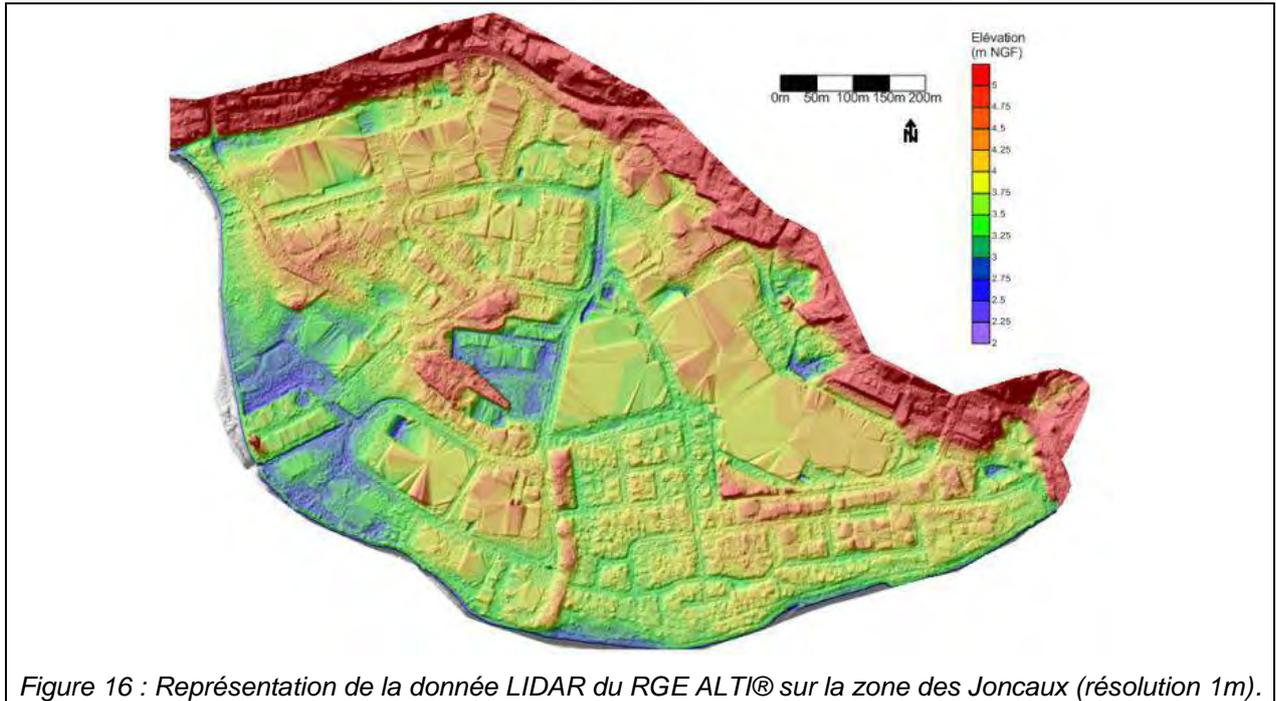


Figure 15 : Comparaison entre le levé DGPS PINATEL BIGOURDAN (2012) et le levé LIDAR RGE ALTI®.

<b>Données de référence</b>	<b>Biais (m)</b>	<b>EQM (m)</b>	<b>r<sup>2</sup></b>
DGPS Géomètre Pinatel et Bigourdan	0,08	0,11	0,990
DGPS TS Lycée Cantau	0,1	0,24	0,994

Tableau 4 : Synthèse des comparaisons levé Lidar du RGE ALTI® - levé DGPS.



## 4.2. BATHYMETRIE

Des données bathymétriques levées par sondeur monofaisceau par CASAGEC Ingénierie complètent les données terrestres (Figure 17). Plusieurs bathymétries par an, depuis 2008, ont été réalisées sur le secteur d'Hendaye par CASAGEC Ingénierie, notamment dans le cadre du projet BIDUR. Il a été observé que les fonds de la baie de Txingudi étaient stables et que l'envasement restait assez faible.

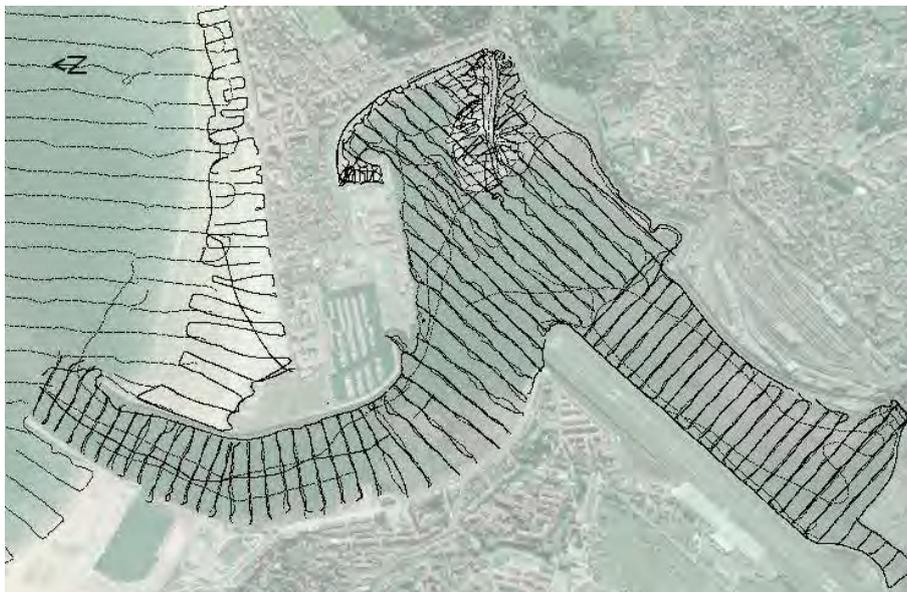


Figure 17 : Données bathymétriques mono faisceau sur le secteur d'Hendaye.

### 4.3. MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN (MNT)

Dans la 1<sup>ère</sup> version de l'étude, le MNT a été construit avec une maille carrée régulière de 20 m de côté qui offre une précision suffisante et adaptée au modèle numérique employé dans la 1<sup>ère</sup> version (MOHID) afin de représenter les processus de submersion marine intervenant sur la façade océanique d'Hendaye et en aval de l'estuaire dans la baie de Txingudy (Figure 18). L'image représente bien les zones basses, du jaune (10 m NGF) au vert foncé (0m NGF). Les perrés sur la façade littorale sont aux alentours des 5 m NGF. Les promenades et perrés dans la baie de Txingudy sont plus bas, aux alentours de 4 m NGF.

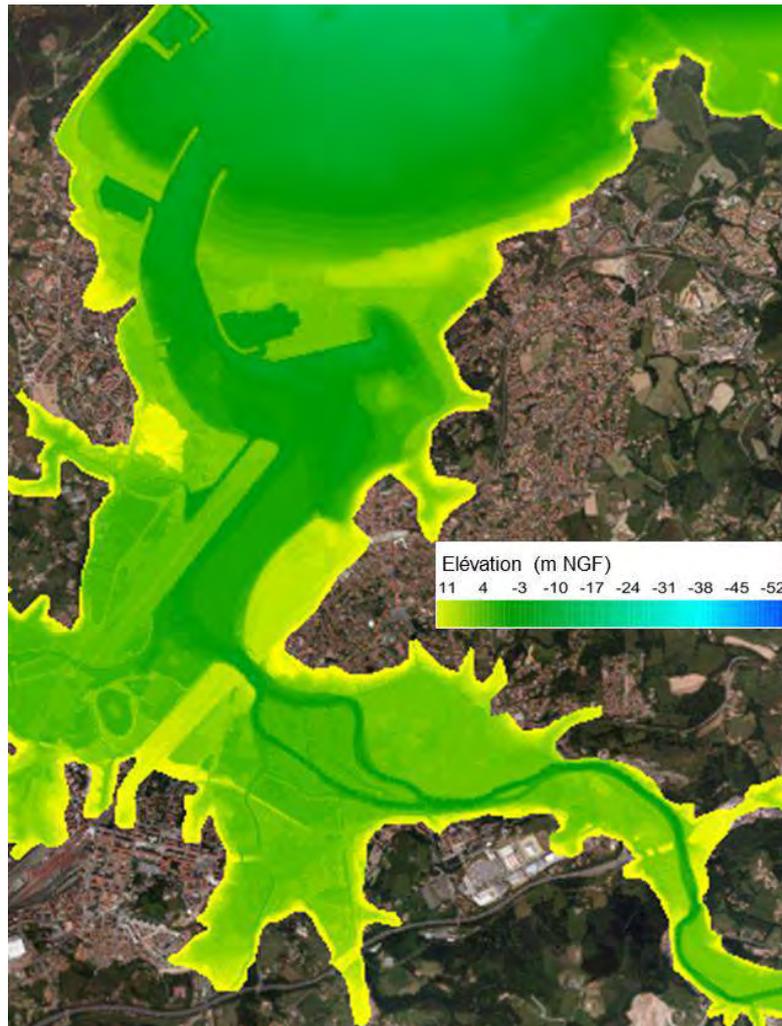


Figure 18 : MNT de la 1<sup>ère</sup> version de l'étude, utilisée sur le secteur d'Hendaye, excepté sur la zone des Joncaux.

En revanche, ce 1<sup>er</sup> MNT est limité pour représenter les processus intervenant plus en amont de l'estuaire (à hauteur de la zone des Joncaux notamment) où l'influence de la dynamique fluviale et la concomitance avec un évènement marin devient sensible.

Grâce à la nouvelle disponibilité des données LIDAR du RGE ALTI® et d'un modèle numérique mieux adapté à la dynamique estuarienne (TELEMAC 2D), un maillage déstructuré a pu être mis en place : pour la partie terrestre, la taille des mailles est comprise entre 0,7 et 20 m et pour la partie maritime, entre 2 et 150 m. Ce maillage permet de mieux représenter la réalité du terrain en raffinant les zones d'intérêt ou comportant des processus hydrauliques complexes

(surverse d'ouvrage, brèches, ...) tout en gardant une taille acceptable sur les zones étendues et homogènes d'un point de vue topographique. Ainsi, les principaux éléments qui vont jouer un rôle dans la dynamique de la submersion et pour lesquels une attention particulière a été apportée pour leur représentation dans le MNT sont les suivants : les remblais, les ouvrages de protection, les fossés et chenaux hydrauliques.

Bien que la zone d'étude soit restreinte à la zone des Joncaux, tout le système hydraulique de la Bidassoa et de la baie de Txingudi est intégré dans le modèle (Figure 20) afin de bien représenter les volumes d'eau oscillants dans les rivières ainsi que les processus marins.

Les éventuels débordements sur la rive espagnole sont donc bien reproduits. En revanche, aucune modification de la représentation du terrain et des principaux éléments jouant un rôle sur la dynamique (remblais, ouvrages de protection, les fossés et chenaux hydrauliques) n'a été effectuée dans le MNT sur la rive espagnole.

Pour la construction de ce nouveau MNT, les données DGPS précitées ont été intégrées uniquement pour améliorer la représentation du sommet de la promenade des Joncaux qui constitue le secteur préférentiel du débordement de la Bidassoa comme identifié dans la 1<sup>ère</sup> version de l'étude (son altitude peut contrôler les volumes de débordement, Figure 19).

Le nouveau MNT est surélevé de plusieurs dizaines de centimètres par rapport à l'ancien sur 2 secteurs : au Nord-Ouest et au Sud-Est de la zone des Joncaux (rue Richelieu et de l'école élémentaire Robert Boulaert, cf. Annexe 3). Les différences les plus importantes entre les 2 MNT sont localisées dans les secteurs où la BD ALTI de l'IGN avait été utilisée dans la 1<sup>ère</sup> version de l'étude (2012) en raison de l'absence de données à haute résolution spatiale (LIDAR).

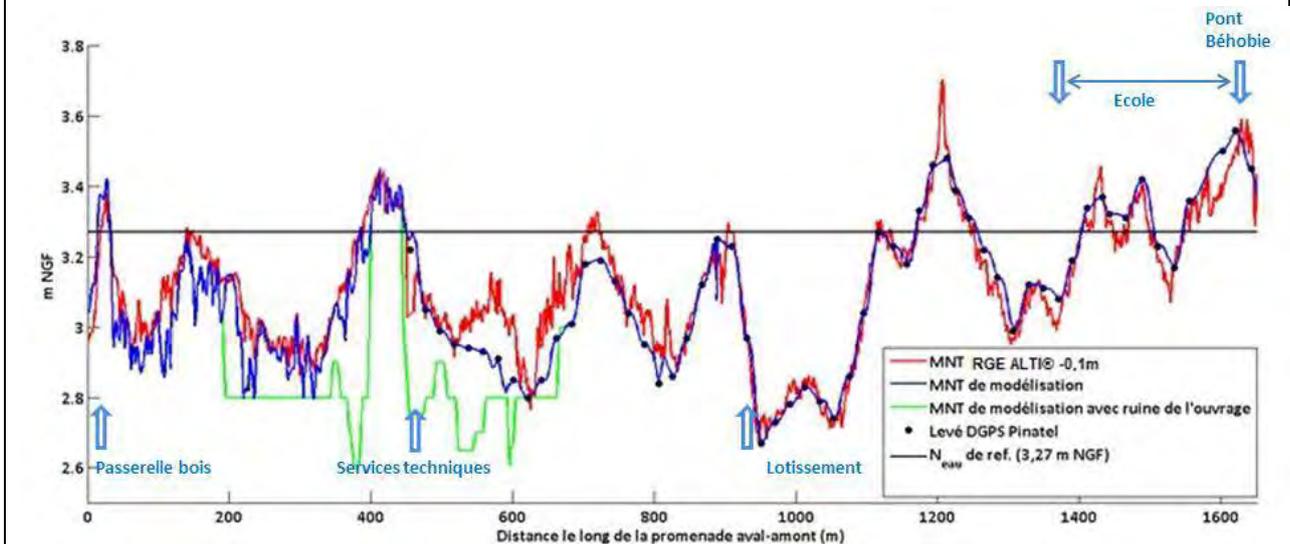


Figure 19 : Profil en long de la promenade des Joncaux faisant apparaître la donnée du LIDAR du RGE ALTI® abaissé de 10cm, les points DGPS et le MNT employé dans la modélisation (avec ou sans ruine).

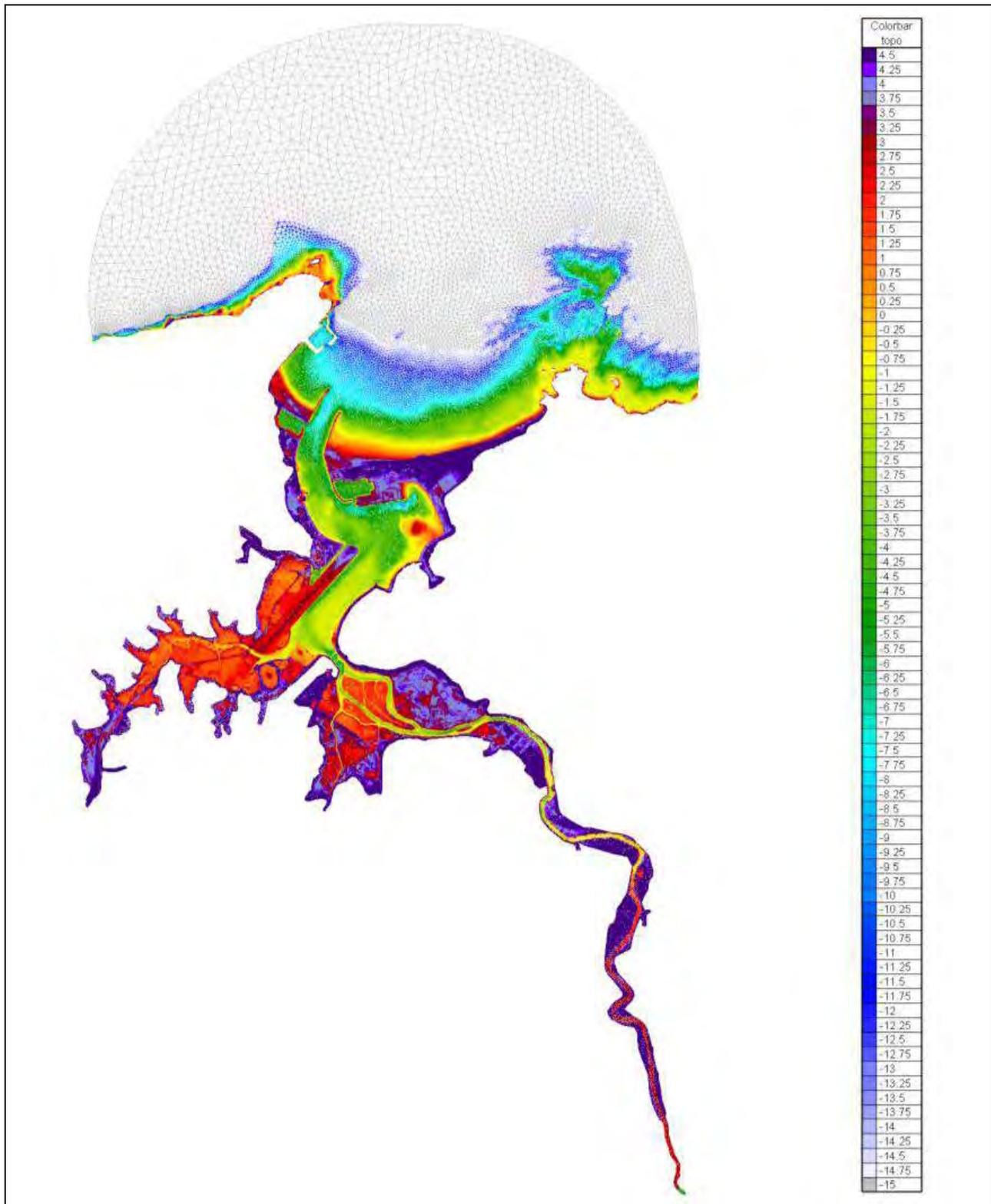


Figure 20 : Nouvelle version du MNT construite pour caractériser l'aléa submersion marine sur la zone des Joncaux.

## 5. Étude historique

### 5.1. OBJECTIFS DE L'ETUDE HISTORIQUE

La connaissance des événements historiques est particulièrement importante dans l'élaboration des PPRL. Elle constitue une nouveauté recommandée dans la circulaire du 27 juillet 2010 par rapport au guide méthodologique de 1997 (Garry et *al.*, 1997) et a pour objectifs :

- la définition de l'évènement naturel de référence pour caractériser l'aléa de référence. « Pour la caractérisation de l'aléa submersion marine, l'évènement naturel de référence sur un secteur homogène est un évènement centennal ou un évènement historique si celui-ci est supérieur » (Rapport MEDDE, 2014).
- améliorer la connaissance des processus locaux afin de 1/ affiner et éventuellement valider le paramétrage des modèles numériques, 2/ ajuster la cartographie finale par une analyse à dire d'expert.

Dans le cadre de l'étude PPRL, l'approche historique est détaillée dans le rapport technique de CASAGEC Ingénierie (Dugor et *al.*, 2013). Elle retrace au travers de l'analyse de cartes historiques, de photos et de plans de géomètres les grandes évolutions morphologiques de la baie d'Hendaye depuis le XVII<sup>ème</sup> siècle, ainsi que le développement de l'urbanisation et des aménagements. À partir d'archives, de coupures de presse, de témoignages ou encore de documents photographiques, l'inventaire des dégâts et tempêtes enregistrées depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle est également réalisé.

### 5.2. RECENSEMENT DES EVENEMENTS HISTORIQUES DE TEMPETE

Une dizaine de tempêtes ont été recensées depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle. Ce recensement a été réalisé à partir de l'enregistrement des dégâts occasionnés par ces tempêtes.

Les principales conséquences sur le front de mer des tempêtes recensées depuis 1924 sont les suivantes :

- des submersions générées par franchissement de paquets de mer issus de déferlements répétés des vagues sur le perré ;
- des dégâts occasionnés par l'action mécanique des vagues sur les deux principaux ouvrages de défense (le perré du boulevard de la mer et la digue de Sokoburu qui fixent l'embouchure de la Bidassoa). Leurs ampleurs varient en fonction de l'évènement (Figure 21) : brèches dans le perré et/ou dégradations légères du muret rehaussant le perré.

Le recensement des tempêtes depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle et la synthèse des dégâts enregistrés sont présentés en Annexe 4.

Une cartographie de synthèse de l'étendue des inondations et des destructions identifiées a été produite à partir de ce recensement des principaux événements de tempête ayant affectés Hendaye (Figure 22, Figure 23, Annexe 4).

**Les informations disponibles sur l'évènement de novembre 2010, permettent de déduire qu'au regard de ses conséquences, il est l'évènement le plus intense ayant affecté la commune d'Hendaye.** En revanche, sa période de retour n'est pas connue.



Figure 21 : Tempête de 1951, type de submersion observable et illustration des dégâts occasionnés sur le perré.

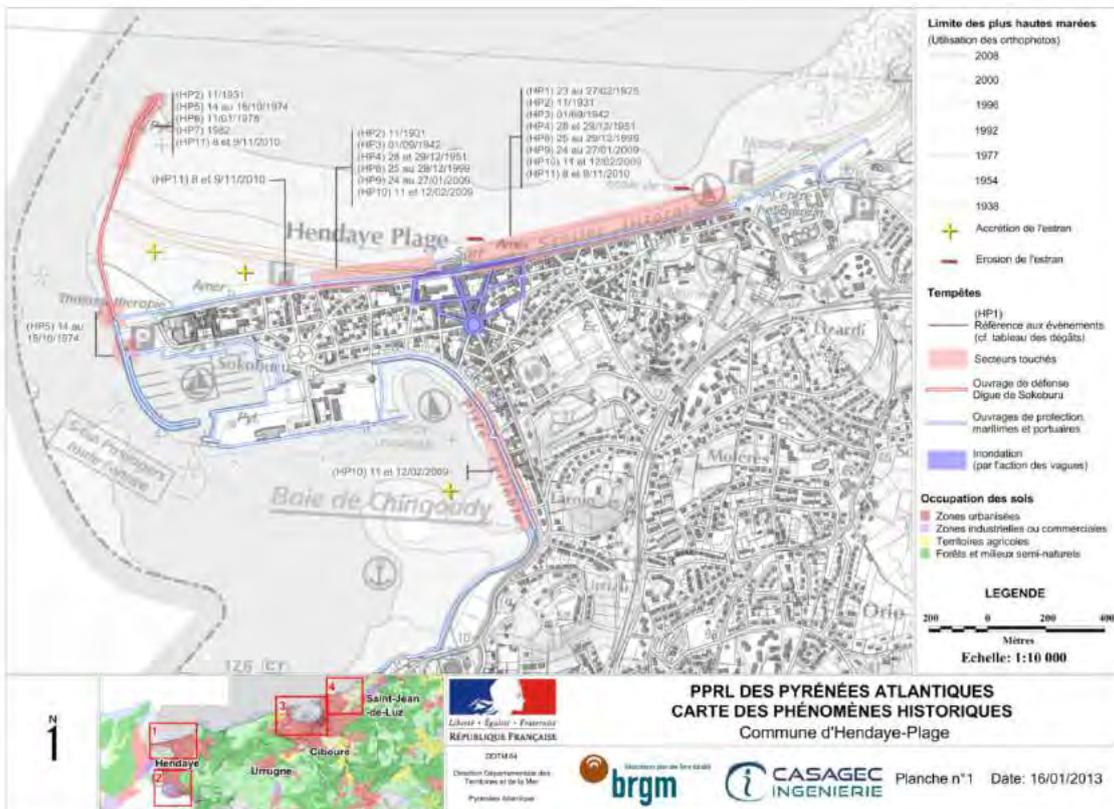


Figure 22 : Carte de synthèse des secteurs touchés par des inondations au regard de l'étude historique sur le secteur d'Hendaye plage (CASAGEC, Dugor et al. (2013)).

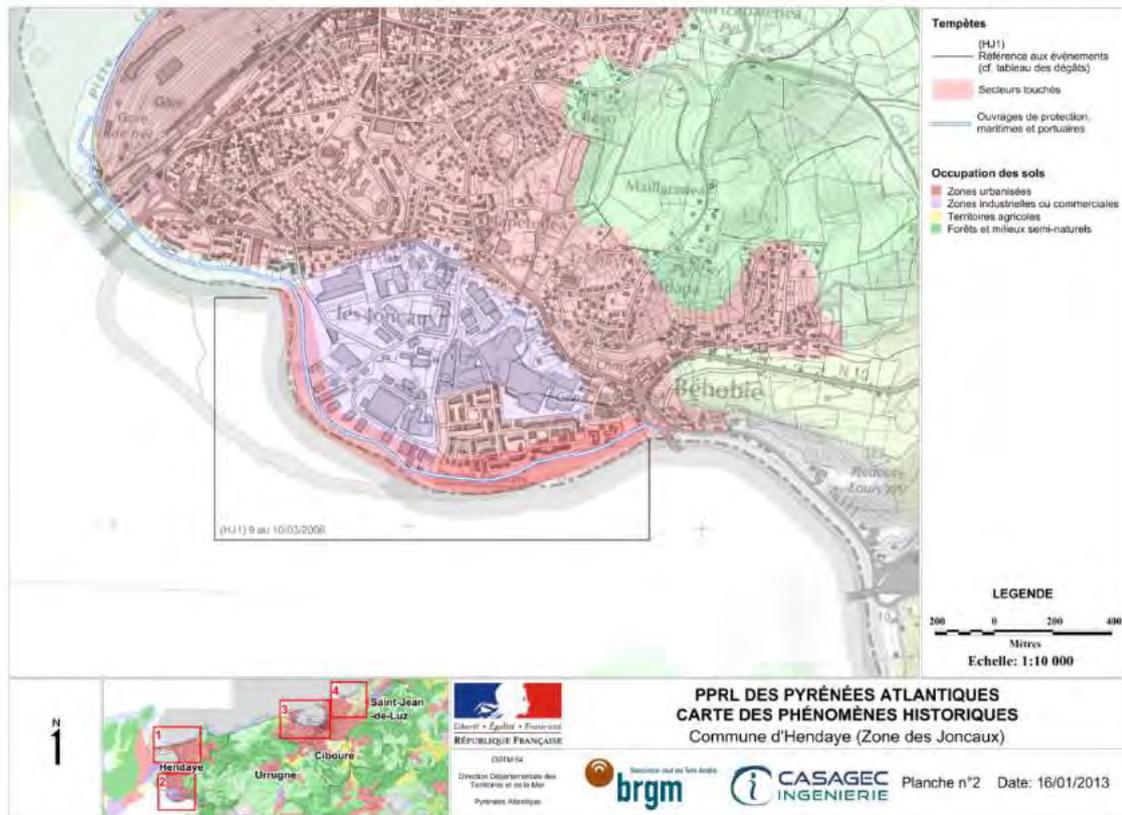


Figure 23 : Carte de synthèse des secteurs touchés par des inondations au regard de l'étude historique sur la zone des Joncaux (CASAGEC, Dugor et al. (2013)).

### 5.3. CONDITIONS LES PLUS DEFAVORABLES OBSERVEES

L'approche historique a également permis d'améliorer la connaissance des processus à l'échelle locale (secteur d'étude).

Parmi les évènements les plus marquants sur le secteur d'Hendaye, seules les tempêtes de décembre 1951 et 1942 ainsi que les crues de 2009 et 2011, présentaient des enregistrements de données météo-marines. Les enregistrements de la station Endarlaza (relevés fournis par la « Confederación Hidrográfica del Cantábrico ») indiquent un évènement de crue majeur le 26 décembre 1993 (débit journalier moyen maximal de l'ordre de  $920.9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et débit maximal instantané de  $1233 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) mais aucune information n'a pu être collectée sur les conséquences de cet évènement (laises de crue, dégâts, etc.). Il en est conclu que :

- les données océano-climatiques des évènements historiques ne sont pas suffisamment précises pour caractériser un évènement historique. Les niveaux d'eau au marégraphe de Socoa n'ayant jamais été supérieurs à 2,88 m/NGF (tempête du 28 et 29 décembre 1951), les principaux dégâts ont été causés majoritairement par l'action des vagues. Cependant, il n'existe pas de donnée précise car les mesures de houle locales (bouées) ne sont que très récentes. **L'évènement naturel de référence devra donc correspondre à l'évènement centennal calculé à la côte.**
- les crues du 12 février 2009 et du 6 novembre 2011 constituent les évènements majeurs parmi l'ensemble des évènements recensés. **Ils ont été mesurés grâce aux laises de crue et ont permis de valider et calibrer le modèle de crue** bien que les inondations

n'aient pas touché la commune d'Hendaye. La crue de 2011 ayant atteint une cote plus basse, **la crue de 2009 sert de référence en termes d'évènement historique.**

Lors de la crue de 2009, les principaux lieux impactés ont été les zones basses situées entre le pont ASF avant la commune de Biriadou jusqu'à la station Endarlaza et ce pour les deux rives du fleuve, française et espagnole. En aval, seul le quartier de Béhobie côté espagnol a connu des inondations. Ce phénomène peut être expliqué par 1/ la concomitance d'une marée de coefficient 106 et d'un épisode de crue 2/ le dysfonctionnement du système d'évacuation des écoulements dans la ville.

**Bien qu'ayant occasionné des inondations et certains dégâts sur les ouvrages de protection, les évènements historiques enregistrés n'ont affecté que de manière modérée la commune d'Hendaye. On s'attachera donc à déterminer les caractéristiques d'un évènement météo-marin de type centennal qui sera combiné à un débit décennal de la Bidassoa.**

#### **5.4. DESCRIPTION DE LA TEMPETE DU 8, 9 ET 10 NOVEMBRE 2010**

Afin de caler et valider la méthodologie de modélisation numérique mise en œuvre pour caractériser la submersion causée par un évènement centennal « fictif », un évènement passé pour lequel suffisamment de mesures de terrain sont disponibles est reproduit.

La tempête du 8, 9 et 10 novembre 2010 étant le seul évènement récent pour lequel suffisamment de données sont disponibles (laisses de crue, données météo-marines), cet évènement a été retenu pour le calage des modélisations numériques.

Le choix de cet évènement récent apparaît d'autant plus justifié que, le maximum d'intensité atteint dans la matinée du 9 Novembre 2010 entre 5 h et 8h, a provoqué des dégâts significatifs :

- Une fine couche d'eau (plusieurs centimètres) aurait atteint le rond-point des Palmiers, situé au milieu de la presqu'île d'Hendaye plage (Figure 24).
- De nombreuses vagues ont franchi le perré, certaines jaillissaient de 3 ou 4 m au-dessus du perré, emportant et détruisant une grande partie du parapet bordant la promenade côtière.
- La cabane des sauveteurs dit « La Baleine » a été quasiment déchaussée par la puissance du courant généré par le jet de rive
- A l'Ouest, la digue de Sokoburu a été endommagée par des lames d'eau qui surversaient depuis la plage vers le chenal de la Bidassoa, détériorant une partie des herbiers en haut de plage.



*Figure 24 : Dégâts occasionnés sur le perré et érosion de l'herbier de la plage d'Hendaye, durant la tempête du 9 novembre 2010.*

## 6. Modalités de prise en compte des ouvrages de protection côtière

Pour les scénarios des aléas « actuel » et « 2100 », les modalités de prise en compte des ouvrages de protection contre la submersion marine, c'est-à-dire les hypothèses de défaillance ont été définies en concertation avec la DDTM des Pyrénées-Atlantiques, le Conseil Général des Pyrénées-Atlantiques, ainsi que les services techniques des communes concernées (cf compte rendu de la réunion du 11/12/2012, Annexe 5).

Conformément aux recommandations méthodologiques du MEDDTL (rapport de novembre 2011, version11), ces hypothèses comprennent la formation d'une ou plusieurs brèches. La largeur de ces brèches doit être à minima de 50 à 100 m de largeur par tronçon de l'ouvrage et au droit des espaces urbanisés. En fonction de la longueur des ouvrages, plusieurs brèches peuvent être considérées.

### 6.1. OUVRAGES DE PROTECTION COTIERE IDENTIFIES

Les secteurs les plus sensibles sur le site d'étude d'Hendaye sont les ouvrages exposés directement à la houle. Le perré couvrant tout le linéaire de la plage d'Hendaye est ancien et a subi des dégâts lors de la forte tempête du 09/11/2010 (Figure 25). Le perré du côté Est de la plage jusqu'à l'ancien Casino est protégé avec des enrochements. Ce côté de la plage ainsi qu'une partie moins étendue du côté Ouest n'a pas de plage sèche à marée haute. L'ancien Casino a été construit très en avant sur l'estran, il est protégé de part et d'autres par des enrochements. A marée haute, il est entouré par les eaux et donc nettement plus exposé à l'impact des vagues lors des tempêtes.

La digue délimitant l'embouchure de la Bidassoa est également un ouvrage sensible, elle a subi plusieurs brèches de quelques dizaines de mètres lors de la tempête du 9/11/2010.

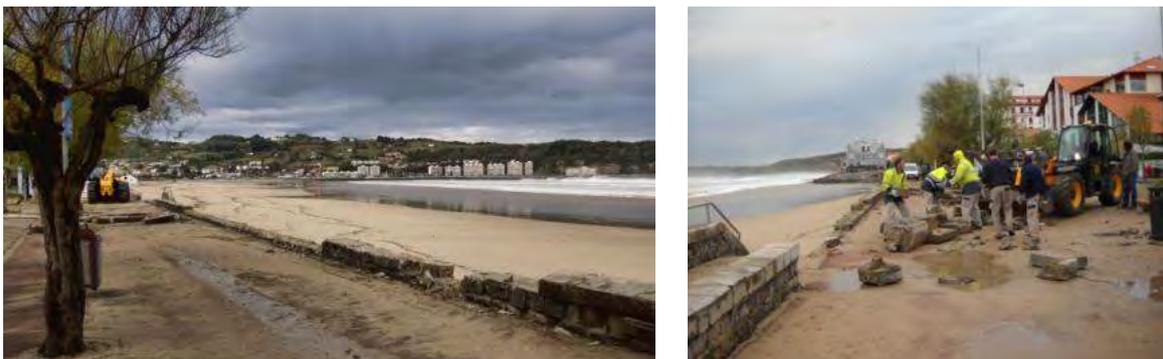


Figure 25 : Dégâts causés sur le perré d'Hendaye plage lors de la tempête du 9/11/2010.

Un diagnostic de l'ensemble des ouvrages littoraux a été réalisé par CASAGEC, Dugor *et al.* (2013) sur la commune d'Hendaye depuis le front de mer et dans l'estuaire de la Bidassoa jusqu'à la zone des Joncaux. Il est synthétisé dans la carte Annexe 6 et le tableau Annexe 7. Les ouvrages sont décomposés en tronçons homogènes vis-à-vis de leur géométrie (avec ou sans parapet, ...), de l'altitude du terrain naturel en arrière (surélevé, même niveau, dénivélé), et de leur composition (enrochement, sable, maçonnerie).

La géométrie des ouvrages est représentée Annexe 8 pour le perré de la plage d'Hendaye et Annexe 10 pour la promenade des Joncaux.

## 6.2. HYPOTHESES DE DEFAILLANCE RETENUES

Les scénarios de prise en compte des ouvrages, synthétisés sur la Figure 29 ainsi que sur la carte Annexe 6 et dans le tableau Annexe 7, sont les suivants :

### - Le perré de la plage d'Hendaye (Figure 26)

Le perré n'est pas considéré comme un ouvrage de protection mais comme un ouvrage de fixation du trait de côte car le terrain naturel est à la même altitude derrière l'ouvrage (Annexe 8). Cependant, une rupture de l'ouvrage pourrait conduire à une érosion pouvant être évaluée à 25 m. Ce type de phénomène a déjà été observé lors de la tempête de 1942. Cet ouvrage fera donc l'objet d'un scénario de ruine généralisée dit « sans ouvrage » puis d'un scénario de « défaillance » avec l'ouverture de deux brèches : l'une de 50 m directement à l'Ouest de l'ancien casino et l'autre de 100 m en face de l'office de tourisme, à l'endroit de la brèche historique (Annexe 9).

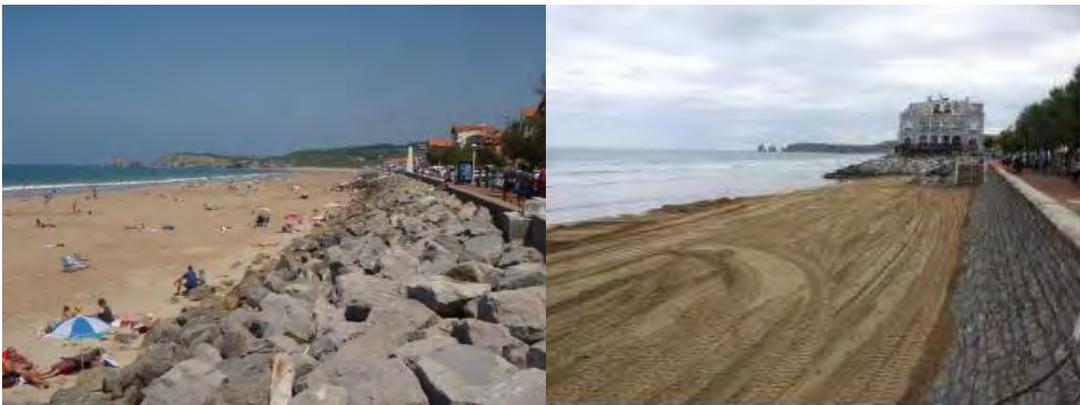


Figure 26 : Perré de la plage d'Hendaye.

### - La digue de Sokoburu

La digue de Sokoburu a pour rôle de fixer l'embouchure de la Bidassoa, de limiter l'érosion de la plage d'Hendaye et l'ensablement du chenal. La rupture de la digue ne modifierait pas sensiblement l'agitation à l'intérieur de la baie de Txingudi. Une défaillance de cet ouvrage pourrait provoquer une légère érosion du haut de plage (comme lors de la tempête de novembre 2010). Cependant, cette érosion ne provoquerait pas de danger immédiat ou une accentuation du risque de submersion marine du fait de la largeur de plage et de la quantité du stock sédimentaire à cet endroit.

### - Promenade / digue des Joncaux (Figure 27)

La promenade qui longe les bords de la zone d'activité des Joncaux (tronçons 20, 21 et 22 sur la carte Annexe 6) présente un tronçon (n° 21) dont l'altitude est plus haute que le terrain naturel se situant en arrière (cf. Figure 28 et profil topographique Annexe 10).

Sur ce tronçon 21, la promenade joue le rôle de digue ce qui conduit à la considérer comme un ouvrage de protection contre les submersions marines et les crues. Etant donné que ce n'est

pas sa vocation initiale, l'hypothèse de ruine généralisée sera appliquée au scénario « sans ouvrage » et au scénario « défaillance ».

La ruine généralisée de l'ouvrage sera appliquée au tronçon 21 (carte Annexe 6) tel que représenté sur la Figure 29 et Annexe 10.

Le scénario le plus critique des deux sera conservé pour déterminer l'aléa de référence. **Mais en pratique, le scénario « sans ouvrage » (ruine généralisée, arasement des ouvrages) et le scénario de « défaillance » reviennent à la même simulation.**



Figure 27 : Promenade des Joncaux considérée comme digue sur ce tronçon.

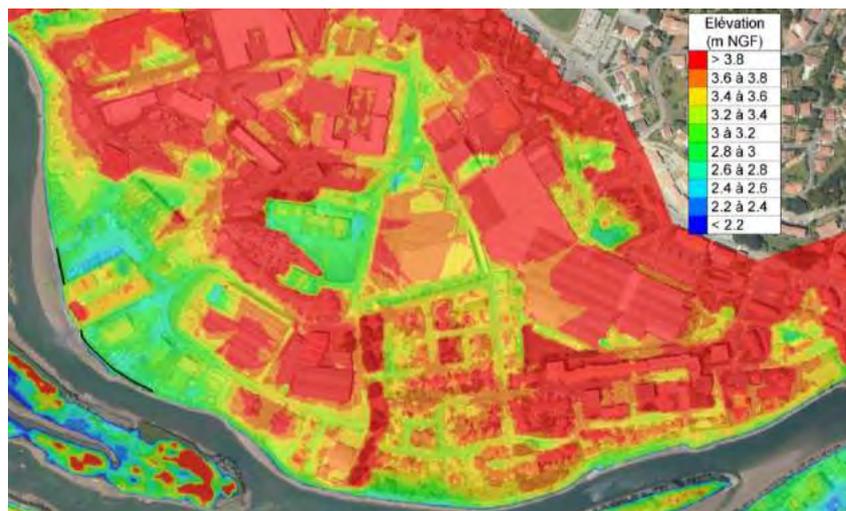


Figure 28 : Localisation des tronçons de la promenade des Joncaux surélevés par rapport au terrain naturel en arrière et considérés comme ayant un rôle de digue.

*Scénario de ruine généralisée ou de l'aléa « sans ouvrage »*



*Scénario de « défaillance des ouvrages » : brèche du perré de la Plage d'Hendaye et ruine de la promenade des Joncaux*



*Figure 29 : Scénarios envisagés pour la modélisation du secteur d'Hendaye  
Traits rouge : localisation des brèches ou ruine.*

## 7. Détermination de l'évènement naturel de référence

Conformément aux consignes ministérielles (Circulaire du 27 juillet 2011 et rapport v.11, novembre 2011), l'aléa submersion marine doit être caractérisé pour un évènement centennal ou l'évènement historique s'il est supérieur.

Ce chapitre présente donc les analyses statistiques employées pour déterminer les évènements naturels centennaux au large puis la modélisation numérique mise en œuvre pour propager ces évènements depuis le large vers le rivage et calculer le niveau marin au rivage, et enfin la comparaison des niveaux obtenus au rivage aux niveaux historiques inventoriés dans le chapitre 4.

### 7.1. PRINCIPE DE LA METHODE

Une submersion marine se produisant sous l'effet de plusieurs agents dynamiques partiellement liés (les vagues, le niveau d'eau comprenant la marée et la surcote), l'analyse de la période de retour d'un seul agent au large n'est pas représentative de la période de retour du niveau marin au rivage. Il est nécessaire d'analyser la période de retour de la combinaison de ces agents afin de prendre en compte leur dépendance.

Conformément aux recommandations méthodologiques du MEDDTL (Rapport de novembre 2011, version 11) qui préconisent l'utilisation de méthodes complètes d'analyse des concomitances lorsque les données disponibles le permettent, l'évènement naturel centennal est déterminé à partir d'analyses statistiques dites de « probabilité conjointe » sur des données de vagues et de niveaux d'eau (Bulteau et *al.*, 2012).

Pour cela, le logiciel JOIN-SEA (Hawkes et *al.*, 2002) a été utilisé. Il s'agit d'un code d'analyse en probabilités conjointes développé par HR Wallingford et l'Université de Lancaster.

Les différentes étapes de la méthode détaillées dans le rapport intermédiaire de l'étude PPRL, BRGM/RP-61416-FR (Bulteau et *al.*, 2013), consistent à déterminer la probabilité que les deux variables des conditions de mer  $H_s^8$  et  $SWL^9$  dépassent conjointement des valeurs données. Les valeurs des variables  $H_s$  et  $SWL$  sont déterminées pour les combinaisons correspondant à l'iso-période de retour souhaitée, c'est-à-dire 100 ans pour l'élaboration des PPRL.

À chacune de ces combinaisons, est associée une valeur de période pic des vagues ( $T_p$ ). Une unique valeur de direction pic des vagues ( $D_p$ ) est également associée à chaque combinaison.

À l'issue des analyses statistiques, une quinzaine de combinaisons ( $H_s$ ,  $SWL$ ,  $T_p$ ,  $D_p$ ) est sélectionnée de manière à ce qu'elles soient représentatives de l'ensemble des évènements naturels possibles. Cette quinzaine de combinaisons est ensuite propagée par modélisation numérique depuis le large vers le rivage afin de calculer les niveaux marins totaux au rivage, c'est-à-dire qui intègrent, en plus de la marée et de la surcote atmosphérique, l'élévation du plan d'eau sous l'effet du déferlement des vagues (*wave setup*) et des particularités géomorphologiques locales. C'est la combinaison la plus défavorable parmi la quinzaine testée

---

<sup>8</sup>  $H_s$  correspond à la hauteur significative des vagues

<sup>9</sup>  $SWL$  : d'après *Still Water Level*. Il s'agit du niveau d'eau au large comprenant la marée et la surcote atmosphérique.

en termes de niveau au rivage qui sera retenue comme évènement naturel de référence, s'il est supérieur à l'évènement historique.

## 7.2. DETERMINATION D'ÉVÈNEMENTS NATURELS CENTENNAUX AU LARGE

### 7.2.1. Données utilisées

Comme précédemment précisé, la méthode complète d'analyses statistiques recommandée par le MEDDTL (rapport de novembre 2011, version 11) a pu être employée grâce aux données disponibles. Afin de pallier l'absence de mesures de terrain en Aquitaine, des simulations rétrospectives<sup>10</sup> de vagues et de niveaux d'eau ont été utilisées. L'utilisation de ce type de données permet de disposer d'informations homogènes, sur un temps long (souvent indisponible en données mesurées) et de s'affranchir d'éventuelles perturbations des données instrumentales liée à des effets de site (pouvant perturber les données *in situ*). Ces conditions sont nécessaires pour le calcul des niveaux de période de retour centennale et le calcul de combinaisons de probabilité de retour conjoints.

Les données utilisées proviennent d'une base de données de conditions de houles BoBWA-H (bobwa.brgm.fr/) et d'une base de données de niveau d'eau spécifiquement générée pour cette étude :

- Base de données de vagues : hauteur significative, période pic et direction pic

La base de données de vagues BoBWA-H (bobwa.brgm.fr/) a été créée dans le cadre d'une thèse (Charles, 2012) BRGM et CNRM (Centre National de Recherche Météorologique). Elle offre une résolution de 10 km pour l'ensemble du golfe de Gascogne et la Manche et une résolution plus fine d'1 kilomètre pour tout le littoral Aquitain. La résolution temporelle est horaire.

Les modèles utilisés (WaveWatch III et SWAN) ainsi que les conditions de forçage (vents ERA-40 du CEPMMT) et la période considérée (1958 à 2002) en font la base de données de vagues la plus complète et précise pour cette partie du littoral métropolitain (Lecacheux et Paris, 2012).

- Base de données de niveaux d'eau (SWL) qui intègrent la marée et la surcote atmosphérique

La base de données de niveaux d'eau a été générée spécifiquement pour les études PPRL de la région Aquitaine à partir du modèle MARS-2DH (Lazure et Dumas, 2007) développé par l'IFREMER qui permet de simuler :

- les variations du plan d'eau provoquées par la marée (base de données des composantes harmoniques CST-France du SHOM) ;
- les phénomènes de surcote atmosphérique en intégrant les conditions de vents et de pression atmosphérique issues des simulations rétrospectives CFSR (Saha et al. 2010).

Cette base de données couvre une période de 30 ans (1979-2009) pour une résolution spatiale de 500 m et une résolution temporelle de 10 min.

---

<sup>10</sup> Les simulations rétrospectives sont des reproductions de situations passées générées par modélisation numérique et validées à partir des mesures de terrain existantes.

### 7.2.2. Étapes de la méthode d'analyse statistiques

Les étapes de la méthode d'analyse statistiques sont détaillées dans le rapport intermédiaire de l'étude PPRL : BRGM/RP-61416-FR (Bulteau et *al.*, 2013). Les principales sont les suivantes :

- (i) Préparation du jeu de données : un échantillon avec un grand nombre de données est constitué. Pour le secteur d'Hendaye, les séries temporelles utilisées sont extraites au large :
  - au point de latitude 43,96°N et de longitude 2,67°W pour les données de vagues ;
  - au point de latitude 43,38°N et de longitude 1,78°W pour les données de niveaux d'eau.

Les séries temporelles extraites sont ré-échantillonnées afin de constituer des triplets de données Hs, SWL et Tp de pleine mer indépendants<sup>11</sup>, ce qui fournit un jeu de données initiales constitué d'environ 706 observations par an.

- (ii) Analyse de la distribution individuelle et définition d'une loi de probabilité pour chacune des variables : hauteur significative et période pic des vagues, niveau d'eau.

Pour cela, un modèle statistique est ajusté à chacune des données à partir de la détermination d'un seuil au-delà duquel la distribution statistique est considérée représentative des événements de forte intensité (Bulteau et *al.*, 2012). Cette étape permet notamment une première estimation sur l'incertitude des données utilisées.

- (iii) Analyse les relations de dépendance entre les variables : hauteur significative et niveau d'eau. Cette étape permet de représenter les contours d'iso-densité de probabilité conjointe, c'est-à-dire tous les couples caractérisés par une période de retour statistique de même valeur. Les relations de dépendance des paramètres associés à la hauteur significative des vagues, à savoir la période pic et la direction pic des vagues, ont également été déterminées.

Par cette analyse, il a été mis en évidence que les vagues les plus hautes ( $H_s > 4$  m) proviennent toutes de la direction Ouest, Nord-Ouest ( $D_p = 300^\circ$ , Figure 30). Par conséquent, cette direction pic sera associée à toutes les combinaisons centennales.

- (iv) Simulation par la méthode de Monte Carlo d'un très grand nombre de triplets fictifs ( $H_s$ , SWL, Tp) possédant les mêmes caractéristiques statistiques que les données d'origine ;

Afin d'estimer la probabilité conjointe d'événements extrêmes, on doit connaître la distribution des valeurs extrêmes de chaque variable prise en compte. Cependant, le nombre d'enregistrements d'événements extrêmes est généralement insuffisant pour analyser cette distribution et estimer la probabilité. La méthode de Monte Carlo permet d'extrapoler les distributions précédemment ajustées (étape (ii)) pour des valeurs extrêmes (Figure 31). On simule donc un très grand nombre de triplets fictifs ( $H_s$ , SWL et Tp) sur une période de 10 000 ans sachant que chaque valeur calculée possède les mêmes caractéristiques statistiques que les données d'origine.

- (v) Analyse des extrêmes qui permet de déterminer des couples ( $H_s$ , SWL) d'iso-période de retour, c'est-à-dire de dépassement conjoint, à partir du grand nombre de données fictives simulées par la méthode de Monte Carlo sur 10 000 ans (Figure 32).

---

<sup>11</sup> On considère en effet que sur la côte Aquitaine, les conditions de marnages sont telles que chaque condition de pleine mer peut être raisonnablement considérée comme indépendante des autres.

La variable  $T_p$  associée au couple  $(H_s, SWL)$  est déterminée par une autre analyse statistique reposant sur la détermination de la courbe des médianes de  $T_p$  en fonction de  $H_s$ .

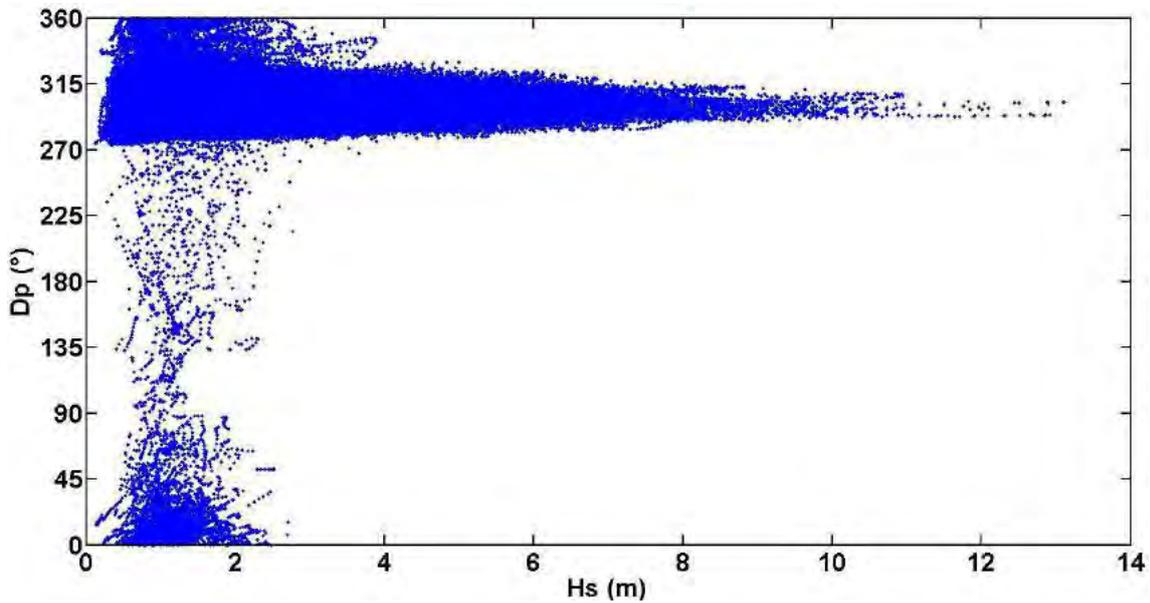


Figure 30 : Graphe bivarié représentant les directions pics des vagues ( $D_p$ ) en fonction des hauteurs significatives ( $H_s$ ) pour les données d'origine.

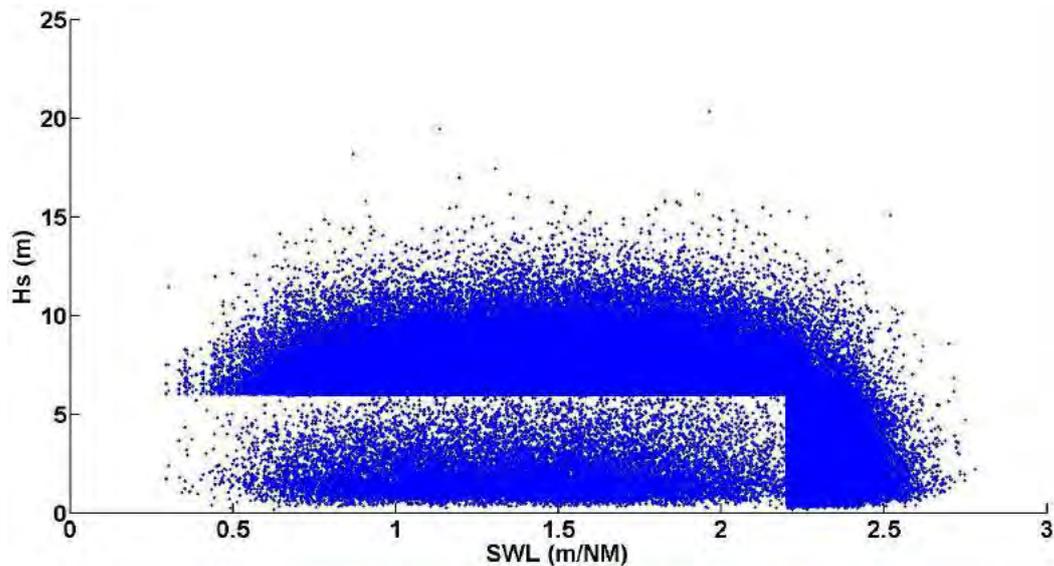


Figure 31 : Couples  $(H_s, SWL)$  initiaux superposés aux données simulées par JOIN-SEA (10 000 ans).

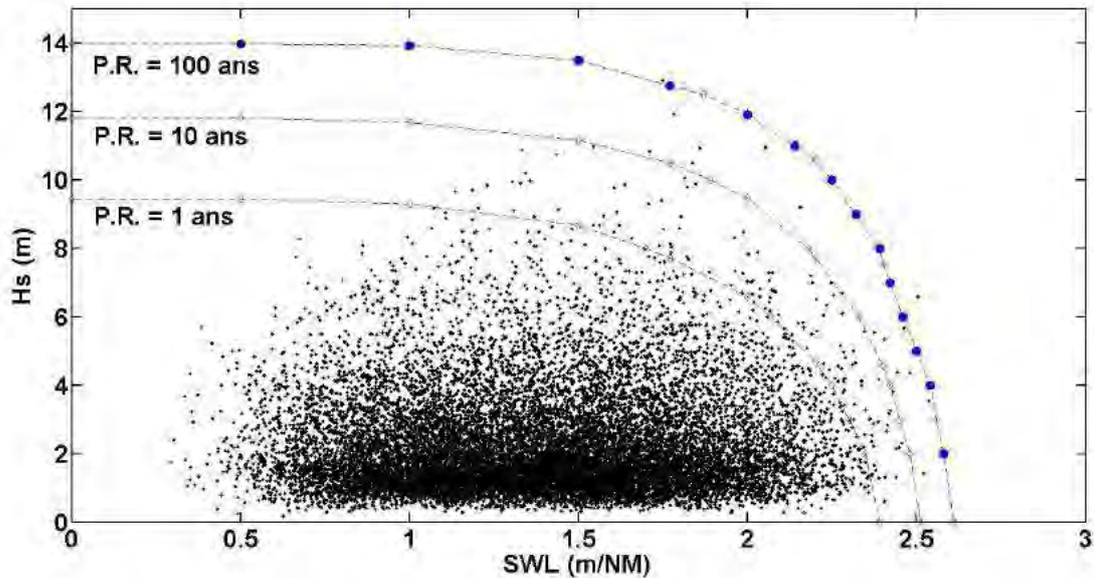


Figure 32 : Courbes d'iso-période de retour de dépassement conjoint pour Hs et SWL pour le secteur d'Hendaye. Points noir : données initiales ; points bleus : combinaisons sélectionnées.

### 7.2.3. Synthèse des résultats

Parmi l'ensemble des combinaisons centennales (Hs, SWL) déterminées, 14 combinaisons ont été sélectionnées (Figure 22). Cette sélection a été effectuée de manière à ce que les couples ou combinaisons de période de retour 100 ans soient représentatifs de l'ensemble des événements naturels susceptibles de générer un niveau marin extrême au rivage sans pour autant que les variables Hs et SWL prises individuellement aient une période de retour centennale.

Chaque combinaison associe :

- un couple Hs et SWL de période de retour de 100 ans (Figure 32) ;
- une valeur de  $T_p$  issue de la courbe médiane pour la valeur de Hs correspondante ;
- la direction pic de  $300^\circ\text{N}$  associée aux 14 combinaisons (régime d'Ouest, Nord-Ouest).

Ces 14 combinaisons centennales ainsi déterminées (Tableau 5), seront propagées depuis le large vers le rivage par modélisation numérique afin de calculer le niveau marin total au rivage intégrant le niveau de marée, la surcote atmosphérique et l'élévation du plan d'eau liée aux vagues (*wave setup*) ainsi que les effets de la géomorphologie locale.

Combinaisons Hendaye		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Niveau d'eau (marée + surcote atmosphérique)	SWL (m/NM)	0,50	1,00	1,50	1,77	2,00	2,14	2,25	2,32	2,39	2,42	2,46	2,50	2,54	2,59
Hauteur significative des vagues	Hs (m)	13,96	13,86	13,35	12,75	11,90	10,90	10,00	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	4,00	2,00
Période pic des vagues	Tp (s)	18,5	18,5	18,3	18,1	17,7	17,4	17,1	16,7	16,2	15,7	15,2	14,7	13,9	11,7

Tableau 5 : Combinaisons (Hs, SWL) centennales au large et Tp associées, sélectionnées pour le secteur d'Hendaye.

Dp est fixée à 300°N. SWL est exprimé en m en référence au niveau moyen (NM)<sup>12</sup>

### 7.3. PROPAGATION DES EVENEMENTS CENTENNAUX DEPUIS LE LARGE VERS LE RIVAGE

Une fois les caractéristiques de vagues et de niveaux d'eau déterminées au large pour des événements centennaux, une modélisation numérique est mise en œuvre pour déterminer ainsi le niveau marin total au rivage. Cette étape a été réalisée par le bureau d'étude CASAGEC Ingénierie

Cette approche consiste à propager depuis le large (c'est-à-dire depuis le point d'extraction 43,96° N; 2,67° O, cf. paragraphe 7.2.2) vers le rivage les caractéristiques des vagues et de calculer ainsi l'élévation du plan d'eau liée au déferlement des vagues (*wave setup*) et aux particularités géomorphologiques locales. Cette élévation du plan d'eau est ajoutée au niveau marin SWL pour calculer le niveau marin total au rivage.

D'autre part, la modélisation numérique reproduit l'état de mer des événements centennaux devant les zones d'intérêts, ce qui permet d'évaluer la sollicitation des ouvrages de protection ou les franchissements par paquets de mer.

Dans une étape ultérieure, les niveaux marins ainsi obtenus seront également associés aux débits de la Bidassoa afin de traiter l'aléa de submersion dans la zone estuarienne de la baie de Txingudi.

#### 7.3.1. Conditions de forçage

Les conditions de forçage du modèle numérique utilisé pour calculer le niveau marin au rivage correspondent aux combinaisons centennales prédéterminées Hs, SWL, Tp et Dp. Les 14 combinaisons précédemment sélectionnées seront propagées afin d'en déterminer la plus défavorable en terme de niveau.

Une quinzième combinaison a été ajoutée : elle correspond à une situation qui combine le niveau d'eau maximal centennal avec une situation sans vague (Tableau 6).

<sup>12</sup> Dans le Tableau 5, le niveau marin SWL est exprimé en m en référence au niveau moyen (NM). Une conversion sera réalisée pour exprimer le niveau marin total au rivage en m en référence au zéro NGF de l'IGN69.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
Hs (m)	13,96	13,86	13,35	12,75	11,90	10,90	10,00	9,00	8	7	6	5	4	2	0
Tp (s)	18,5	18,5	18,3	18,1	17,7	17,4	17,1	16,7	16,2	15,7	15,2	14,7	13,9	11,7	0
SWL (m/IGN69)	0,81	1,31	1,81	2,08	2,31	2,35	2,56	2,63	2,7	2,73	2,77	2,81	2,85	2,9	2,92

Tableau 6 : Caractéristiques des combinaisons de période de retour 100 ans au large.

Dans le Tableau 6, les niveaux marins SWL sont exprimés en m en référence au zéro NGF de l'IGN69 (+0,31 m par rapport au niveau moyen NM).

Conformément aux recommandations méthodologiques du MEDDTL (Rapport de novembre 2011, version 11 et circulaire du 27 juillet 2011) pour la caractérisation de l'aléa de référence, une marge de 20 cm a été rajoutée au niveau marin SWL pour une première prise en compte de l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique.

Afin de prendre en compte l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique à échéance 100 ans, c'est-à-dire pour l'aléa 2100, une surcote de 60 cm a été rajoutée au niveau marin SWL.

Les incertitudes de la méthode ont été estimées à 15 cm et également rajoutées au niveau marin SWL, conformément aux recommandations méthodologiques qui prévoient l'ajout de 25 cm forfaitaire par défaut si l'estimation de l'incertitude n'est pas possible. Cette estimation a été obtenue à partir de la somme des incertitudes de chaque étape de la méthode :

- 5 cm d'incertitude liée au calcul des triplets (Hs, Tp, SWL) ;
- 5 cm d'incertitude engendrée par le calcul des surcotes ;
- 5 cm d'incertitude liée à la propagation et au calcul de la surcote induite par les vagues (*wave setup*).

### 7.3.2. Description du modèle numérique

Le modèle numérique de référence pour les études en domaines côtiers SWAN (Simulated WAve Nearshore) a été utilisé pour simuler la propagation des états de mer (mers de vent et houles océaniques) dans les domaines offshore et côtier. Il reproduit :

- les effets de réfraction et de shoaling liés aux variations de bathymétrie ;
- la génération de la houle par action du vent ;
- la dissipation de la houle par moutonnement ;
- le déferlement bathymétrique ainsi que par frottement sur le fond.

Pour affiner les résultats près des côtes et des zones d'intérêts, un système d'emboîtement de modèle est réalisé :

1. un modèle global avec une résolution de 250 m est forcé aux limites pour les 15 combinaisons centennales Hs, SWL, Tp et Dp. Les frontières sont suffisamment éloignées des côtes pour que les conditions limites soient imposées sans avoir d'interaction avec les fonds (profondeur supérieure à 1000 m) (Figure 33).

2. un modèle raffiné avec une résolution de 20 m a été mis en place pour le secteur d'étude (Figure 36). Ce modèle local est forcé aux limites par l'information spectrale des vagues issue du modèle global.

L'efficacité de ces 2 modèles numériques à reproduire les conditions réelles des niveaux d'eau et de la houle dans la baie de d'Hendaye a été analysée à partir de mesures de terrain (houlographe, ADCP). Cette procédure de validation est détaillée dans le rapport de CASAGEC Ingénierie (Dugor *et al.*, 2013). Elle a permis de vérifier que les niveaux d'eau et les conditions de houle (Hs, Tp, Dp) étaient représentés de manière satisfaisante par les modèles utilisés.

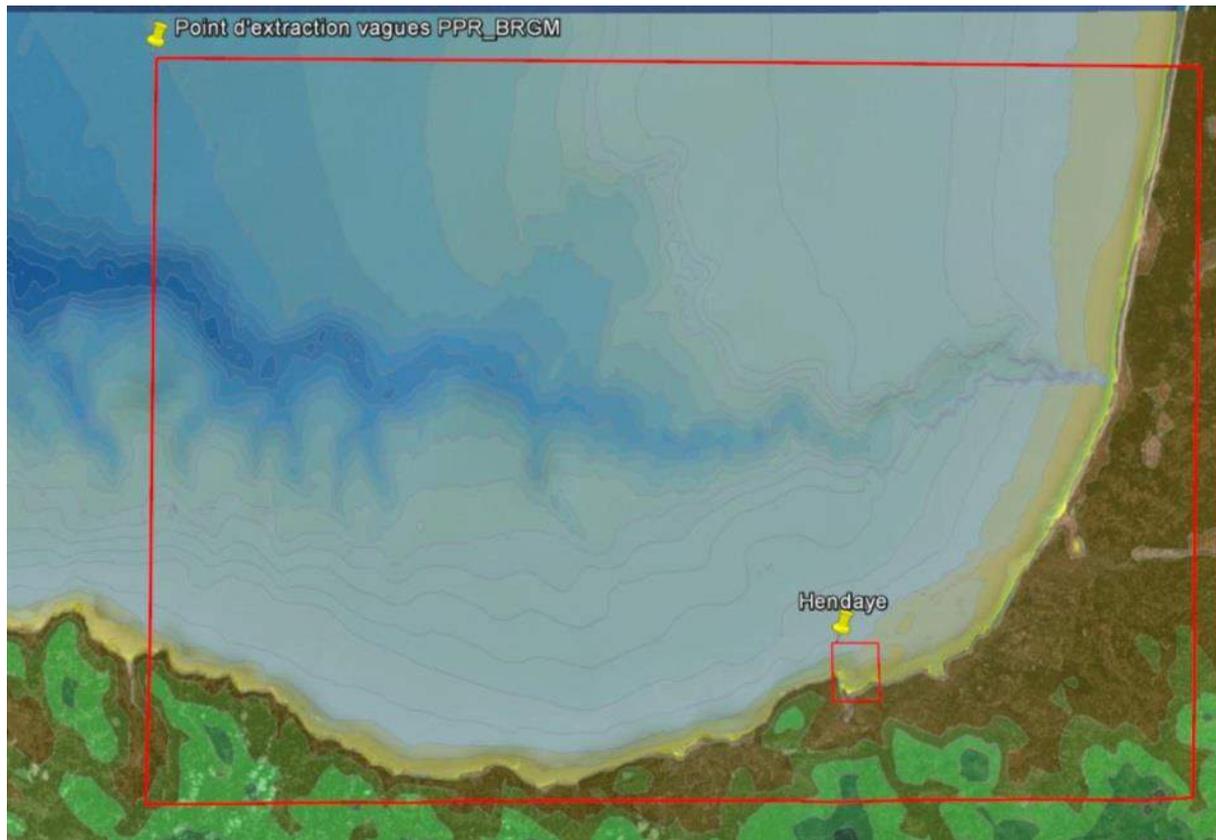


Figure 33 : Points d'extraction des modèles pour les conditions de référence d'agitation au large et les niveaux d'eau SWL à la côte. Les rectangles rouges représentent l'emprise des modèles de propagation des vagues à la côte.

### 7.3.3. Résultats

Les 15 combinaisons centennales Hs, Tp, Dp et SWL ont été propagées depuis le large vers le rivage. Les Figure 34 et Figure 35 illustrent les simulations réalisées.

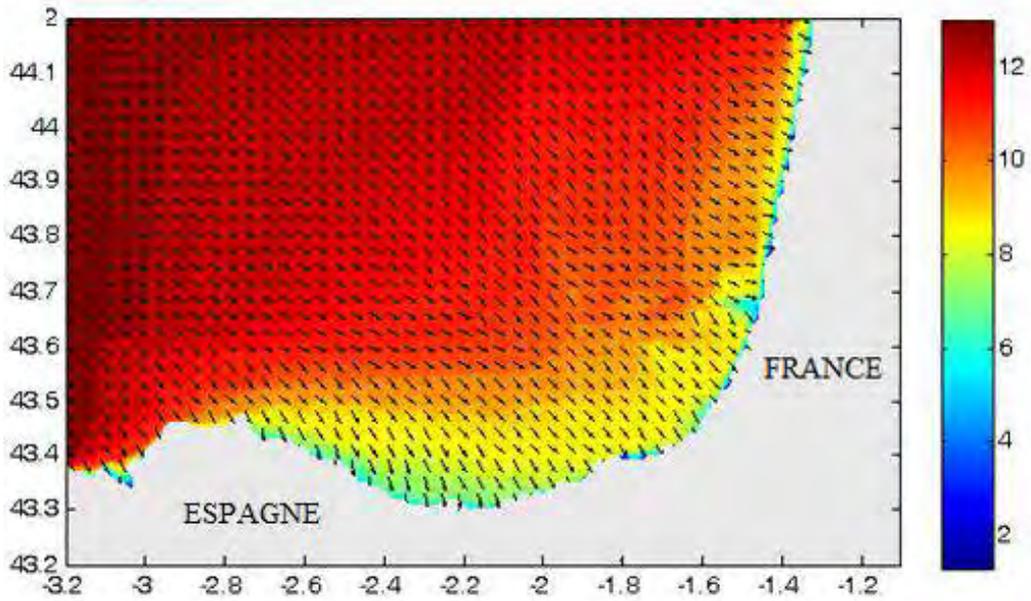


Figure 34 : Exemple de résultats de simulation réalisée avec le modèle SWAN sur le modèle de grande emprise. Hauteur significative des vagues (m).

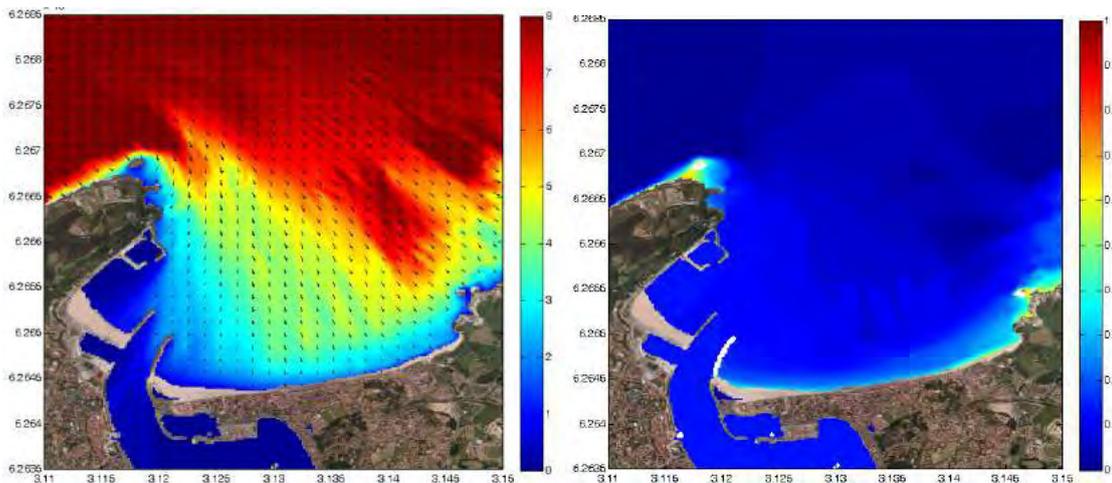


Figure 35 : Exemple de résultats de simulation réalisée avec le modèle SWAN (hauteur significative des vagues (m) et direction moyenne à gauche et wave setup induit par les vagues à droite).

La Figure 36 présente les profils au niveau desquels les résultats ont été extraits : élévation du plan d'eau liée au déferlement des vagues et conditions d'agitation. Ces profils ont été positionnés avec un espacement régulier à partir du niveau -6 m (IGN69). Les résultats des hauteurs significatives des vagues et de la surcote liée aux vagues sont présentés en Annexe 11 et Annexe 12.

Les Tableau 7 et Tableau 8 indiquent, pour chacun des profils, la valeur des niveaux marins totaux au rivage<sup>13</sup>, calculées pour chaque combinaison centennale.

<sup>13</sup> Les niveaux marins totaux au rivage sont des niveaux statiques, c'est à dire qu'ils ne prennent pas en compte les variations instantanées provoquées par le jet de rive.

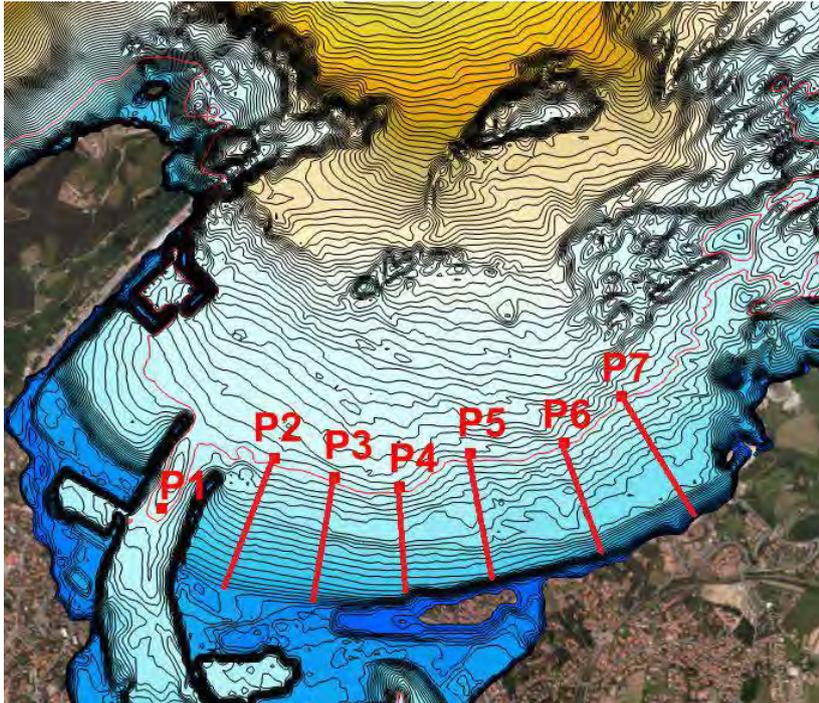


Figure 36 : Modèles numériques de terrain pour la propagation des vagues devant le secteur d'Hendaye. Les profils rouges correspondent aux points d'extraction (P1 à P7) des résultats afin d'évaluer les conditions d'agitation et de setup à différents endroits.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
C 1	1.35	1.59	1.64	1.71	1.69	1.70	1.69
C 2	1.84	2.05	2.08	2.14	2.12	2.13	2.11
C 3	2.32	2.50	2.53	2.58	2.55	2.57	2.55
C 4	2.58	2.73	2.76	2.81	2.79	2.81	2.78
C 5	2.79	2.92	2.95	3.00	2.98	2.99	2.97
C 6	2.91	3.03	3.06	3.10	3.08	3.09	3.08
C 7	3.01	3.10	3.13	3.17	3.16	3.16	3.15
C 8	3.06	3.14	3.17	3.21	3.19	3.20	3.18
C 9	3.12	3.18	3.20	3.24	3.23	3.23	3.22
C 10	3.13	3.18	3.20	3.23	3.22	3.22	3.21
C 11	3.16	3.19	3.20	3.23	3.22	3.22	3.21
C 12	3.19	3.20	3.21	3.24	3.23	3.22	3.22
C 13	3.22	3.22	3.22	3.24	3.23	3.23	3.23
C 14	3.24	3.24	3.24	3.24	3.24	3.24	3.24
C 15	3.27	3.27	3.27	3.27	3.27	3.27	3.27

Tableau 7 : Niveau d'eau total (m/NGF) statique (SWL + Surcote 20 cm + wave setup + Incertitude 15 cm) - Aléa actuel.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
C 1	1.74	1.96	1.99	2.05	2.03	2.04	2.02
C 2	2.23	2.41	2.45	2.50	2.47	2.49	2.47
C 3	2.71	2.86	2.89	2.94	2.92	2.93	2.91
C 4	2.97	3.10	3.13	3.18	3.16	3.17	3.15
C 5	3.19	3.29	3.32	3.37	3.35	3.36	3.35
C 6	3.32	3.40	3.43	3.48	3.46	3.46	3.45
C 7	3.41	3.47	3.50	3.55	3.53	3.53	3.52
C 8	3.47	3.51	3.54	3.59	3.57	3.57	3.56
C 9	3.52	3.55	3.57	3.62	3.60	3.60	3.59
C 10	3.54	3.55	3.57	3.61	3.60	3.59	3.59
C 11	3.56	3.56	3.58	3.62	3.60	3.60	3.59
C 12	3.59	3.58	3.59	3.62	3.61	3.60	3.60
C 13	3.62	3.61	3.61	3.63	3.62	3.62	3.61
C 14	3.65	3.64	3.64	3.64	3.63	3.64	3.63
C 15	3.67	3.67	3.67	3.67	3.67	3.67	3.67

Tableau 8 : Niveaux d'eau total (m/NGF) statique (SWL+ Surcote 60 cm + wave setup + Incertitude 15 cm) – Aléa 2100.

#### 7.3.4. Conclusion et comparaison avec l'évènement historique

Quelle que soit la combinaison centennale, le niveau marin total obtenu est inférieur à la cote d'arase des ouvrages de protection côtière (supérieur à 5 m/NGF) ce qui implique qu'un évènement centennal ne génère pas de submersion marine par débordement sur le secteur d'Hendaye sauf en cas de brèche ou de ruine généralisée de l'ouvrage.

Pour la caractérisation de l'aléa dit « 2100 », une marge de 60 cm est ajoutée au niveau marin au large afin de prendre en compte du changement climatique à échéance 100 ans. Dans ce cas là également, les niveaux marins totaux au rivage restent nettement inférieurs à la cote d'arase des ouvrages de protection côtière.

Les niveaux marins totaux des combinaisons 8 à 15 sont très proches pour les profils P3 à P7. Bien qu'il ne puisse y avoir de submersion par débordement, **l'agitation des vagues (très importante pour les scénarios 8, 9 ou 10) peut occasionner des submersions par franchissement de paquets de mer.**

Pour la propagation de l'eau à terre, il est donc fondamental de calculer les volumes d'eau susceptibles de franchir les ouvrages pour chacune des combinaisons centennales, c'est-à-dire pour chacun des niveaux marins totaux statiques et chacune des conditions d'agitation de la mer, en association avec des scénarios de défaillance des ouvrages de protection côtière (cf. chapitre 6). Cette étape fait l'objet du chapitre 8 suivant.

La valeur maximale de niveau marin calculée au rivage (aléa actuel) est 3,27 m/NGF. Cette valeur est nettement supérieure à la donnée de l'évènement historique le plus fort connu qui est 2,88 m/NGF. **L'évènement naturel centennal calculé est donc retenu comme évènement naturel de référence conformément aux recommandations méthodologiques du MEDDTL.**

## 8. Détermination de l'évènement de référence : propagation à terre

L'aléa de référence est caractérisé pour l'évènement naturel de référence le plus défavorable auquel sont associées des hypothèses de prise en compte des ouvrages côtiers et des débits des cours d'eau.

Ce chapitre présente la propagation de la submersion à partir de formules empiriques pour calculer les volumes d'eau franchissants à terre et à partir de modélisation numérique pour simuler la propagation en tenant compte de la rugosité du sol et du débit des cours d'eau notamment. Cette étape a été réalisée par le bureau d'étude CASAGEC Ingénierie.

### 8.1. CALCUL DES DEBITS FRANCHISSANTS LES OUVRAGES DE PROTECTION

Conformément aux recommandations méthodologiques du MEDDTL (rapport de novembre 2011, version 11), les volumes franchissants ont été calculés à partir d'une méthode issue de travaux européens de référence dans le domaine et qui repose sur l'utilisation des formules empiriques de TAW (2002).

Cette méthode est détaillée dans le rapport de CASAGEC Ingénierie (Dugor *et al.*, 2013). Les formules empiriques de TAW (2002) permettent de calculer la hauteur du jet de rive lors du déferlement des vagues sur les ouvrages côtiers et le débit de l'eau franchissant ces ouvrages. Elles sont applicables à toutes formes de digue à partir :

- des niveaux marins totaux au rivage (Tableau 7) ;
- des conditions de houle obtenues (Tableau 6 et Tableau 9) ;
- des profils de la plage et des ouvrages de protection côtière positionnés à des endroits ayant connus des franchissements et des destructions (PP1 à PP4, Annexe 8). Par ailleurs, les profils de formes différentes sont représentatifs du secteur d'où ils sont extraits.

Les volumes d'eau franchissant ont été calculés pour :

- chaque combinaison centennale de niveaux d'eau et de conditions de houles à la côte sauf la 15 qui correspond à des conditions sans vagues ( $H_s = 0$  m) ;
- 2 scénarios de prise en compte des ouvrages :
  - o un scénario de ruine généralisée pour l'aléa dit « sans ouvrage » ;
  - o un scénario pour l'aléa dit « actuel » avec une hypothèse de défaillance des ouvrages au niveau des profils PP2 et PP3 (de chaque côté du Casino, à l'Est et à l'Ouest), c'est-à-dire avec une brèche telle que représentée Annexe 9.

Pour les profils PP2 et PP3 où un scénario de rupture de digue a été envisagé, ce sont pour chaque combinaison, la quantité maximum qui a été retenue (situation avec ou sans brèche).

Le Tableau 9 présente les débits induits par les volumes franchissants (« Q » en  $m^3$ /profil) maximaux retenus parmi l'ensemble des combinaisons et scénarios testés, au niveau de chaque profil d'ouvrage (PP1 à PP4, Annexe 8). Ils sont extrapolés sur l'intégralité de chaque tronçon représenté par un profil afin de propager le volume d'eau franchissant en arrière des ouvrages.

Les combinaisons les plus pénalisantes (automatiquement extraites de la table de calcul) pour les volumes franchissant sont :

- C8 pour le point d'extraction du modèle P1 (Figure 36) ;
- C11 pour les points d'extraction du modèle P2 et P4, et C9 pour P3 (Figure 36).

		Aléa actuel						Aléa 2100					
		Niveau d'eau (m)	Rc (m)	Hs (m)	Tp (s)	RunUp 2% (m)	Q Franchissant (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Niveau d'eau (m)	Rc (m)	Hs (m)	Tp (s)	RunUp 2% (m)	Q Franchissant (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
Hendaye	PP1	3.06	2.36	0.47	12.35	5.41	0	3.46	1.96	0.55	12.3	5.41	0.005
	PP2	3.16	2.09	0.98	11.21	5.25	6.41	3.56	1.8	1.13	12.35	5.25	12.89
	PP3	3.12	2.24	1.18	11.21	5.36	3.84	3.42	2.05	1.27	12.35	5.36	9.36
	PP4	3.16	2.99	0.9	11.21	6.15	0.76	3.56	2.7	1.11	12.35	6.15	5.84

Tableau 9 : Paramètres correspondant à la situation de volumes franchissants maximum.

## 8.2. ESTIMATION DES NIVEAUX DE CRUE DE LA BIDASSOA

Le débit du fleuve Bidassoa est un paramètre qui est susceptible d'influencer considérablement le phénomène de submersion marine, particulièrement dans les zones d'estuaire.

Pour l'étude PPRL, les débits issus d'une étude antérieure de CASAGEC Ingénierie (projet européen BIDUR) ont été exploités. À l'issue d'une analyse statistique notamment présentée dans le rapport de CASAGEC Ingénierie (Dugor et al., 2013), les débits de différentes périodes de retour ont été calculés (Tableau 10).

En accord avec la DDTM des Pyrénées-Atlantiques, le débit décennal est retenu pour caractériser l'aléa de référence dit « actuel » et l'aléa dit « 2100 ». Ce choix d'un débit décennal est cohérent avec la connaissance des événements passés : en effet, la crue de 2009 combinant un débit instantané de 734 m<sup>3</sup>/s et un coefficient de marée de 106 est un événement similaire à l'évènement de référence (dont le niveau intègre en plus les 20 cm du changement climatique et les 15 cm d'incertitudes).

fréquence	$QJ (m^3.s^{-1})$
Q <sub>2</sub>	410 [390 ; 440]
Q <sub>5</sub>	620 [600 ; 640]
<b>Q<sub>10</sub></b>	<b>770 [740 ; 810]</b>
Q <sub>20</sub>	920 [880 ; 970]
Q <sub>50</sub>	1120 [1080 ; 1190]
Q <sub>100</sub>	1280 [1230 ; 1370]

Tableau 10 : Périodes de retour des crues de la Bidassoa (loi de Gumbel) - Données calculées sur 36 ans. Les valeurs entre crochets représentent les bornes de l'intervalle de confiance dans lequel la valeur exacte du paramètre estimé a 80% de chance de se trouver.

### 8.3. MODELISATION NUMERIQUE DES ECOULEMENTS A SURFACE LIBRE

#### 8.3.1. Front de mer d'Hendaye et Baie de Txingudy

##### Description du modèle hydrodynamique

Le modèle numérique (MOHID) utilisé pour reproduire les écoulements de surface libre en 2 dimensions permet :

- de propager en arrière des digues côtières, les volumes d'eau franchissants précédemment calculés et de déterminer le champ d'expansion de la submersion, la hauteur d'eau atteinte et les vitesses d'écoulement ;
- de traiter les zones potentiellement soumises à des inondations de type estuarien (crue du cours d'eau concomitante avec des niveaux marins statiques élevés) et de déterminer les niveaux d'eau et les vitesses du courant ainsi que le rôle de blocage dynamique que peut exercer la marée sur l'écoulement des crues de la Bidassoa.

Le modèle numérique MOHID utilisé est développé par l'Institut Supérieur de Technologie (IST) de l'Université de Lisbonne. Il est constitué par un ensemble de modules permettant de simuler à différentes échelles tous les principaux processus océaniques, côtiers et estuariens. Ce puissant outil de modélisation dans le domaine des écoulements à surface libre sur de très nombreuses applications dans le monde entier.

##### Forçage

Ce modèle est forcé par :

- le niveau marin total au rivage de l'évènement naturel de référence à ses frontières ouvertes ;
- le débit de la Bidassoa en amont ;
- le débit d'eau franchissant les ouvrages de protection côtière.

### Calage et validation

Le calage et la validation de ce modèle sont détaillés dans le rapport de CASAGEC Ingénierie (Dugor *et al.*, 2013). Pour cela, des mesures de terrain (niveaux d'eau au marégraphe de Socoa, caractéristiques de la houle à la bouée d'Anglet) ont été utilisées et ont permis de reproduire de manière très satisfaisante les inondations du 8 et 9 novembre 2010.

Les crues du 11 et 12 février 2009 ont également été reproduites à partir des données de débit à Endarlaza, de la prévision de marée (Fes 2004). Les modélisations ont été validées grâce aux lasses de crues relevées lors de cet événement. Ces modélisations ont permis de vérifier que les crues et les blocages dynamiques provoqués par la marée étaient correctement reproduits dans la partie aval de la Bidassoa.

### Données utilisées

Les données et paramètres utilisés pour la modélisation dynamique :

- les niveaux d'eau : ils suivent deux cycles d'une marée de vive eau (coefficient 115). Le niveau maximum est calé sur la valeur du niveau d'eau du scénario centennal retenu. De cette manière, le signal de marée imposé au modèle garde une forme réaliste en atteignant les hauteurs d'eau maximums voulues. Les combinaisons 1 à 15 ont ainsi été jouées avec :
- les volumes franchissants : ils ont été calculés à partir des formules empiriques de TAW (Tableau 9) pour les 14 combinaisons centennales ;
- le débit décennal ( $770 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  à la station Endarlaza) de la Bidassoa appliqué au niveau du lit du cours d'eau.
- le coefficient de friction de Manning Strickler qui exprime le frottement sur le fond. varie selon les milieux et permet de calibrer la vitesse des écoulements reproduite par les modèles numériques. La progression des submersions ou de l'onde de crue peut varier de façon conséquente en fonction du choix du coefficient de Strickler. Les coefficients ont été attribués en référence à la base de données d'occupation du sol Corine Land Cover complétée par l'analyse d'orthophotographie, de missions de terrain et de tests de sensibilité. L'ensemble des coefficients retenus par secteur est consultable dans le rapport CASAGEC Ingénierie (Dugor *et al.*, 2013).
- la gestion des bancs découvrant : ce paramètre conditionne le minimum de hauteur d'eau prise en compte dans une cellule pour la résolution numérique du calcul (Hmin). Il peut engendrer une incertitude car si Hmin est trop faible, il y a une constante augmentation de génération de masse. Si en revanche elle est trop forte, la propagation de la marée peut être retardée. Pour cette étude, Hmin a été pris à 0,1 m. Le paramètre sensible a été retenu après plusieurs tests réalisés dans la baie de Txingudi et la mise en relation de la modélisation de la marée avec des données de mesure *in situ* (capteur de pression).

Les modélisations sont réalisées de manières indépendantes :

- pour la façade maritime : les volumes d'eau franchissant en arrière des ouvrages sont propagés pour 14 combinaisons centennales (la combinaison  $H_s = 0$  n'étant pas considérée);
- à l'intérieur de la baie de Txingudi en combinant le débit décennal de la Bidassoa avec les niveaux marin de référence au rivage.

### 8.3.2. Zone des Joncaux

#### Description du modèle hydrodynamique

Le logiciel TELEMAC 2D (Hervouet 2007) est développé par un consortium international (<http://www.opentelemac.org/index.php/presentation?id=17>). Il résout les équations de Barré de Saint-Venant à deux dimensions d'espace horizontales. Ses résultats principaux sont, en chaque point du maillage de résolution, la hauteur d'eau et la vitesse moyenne sur la verticale. TELEMAC-2D trouve ses applications en hydraulique à surface libre, maritime ou fluviale, et est capable de prendre en compte parmi d'autres les phénomènes physiques suivants :

- Propagation des ondes longues avec prise en compte des effets non linéaires (marée et surcote atmosphérique par exemple) ;
- Frottement spatialisé sur le fond ;
- Influence de la force de Coriolis ;
- Influence de phénomènes météorologiques : pression atmosphérique et vent ;
- Ecoulements torrentiels et fluviaux ;
- Coordonnées cartésiennes ou sphériques pour les grands domaines ;
- Bancs découvrant et plaines inondables (recouvrement/découvrement du sol par l'eau) ;
- Traitement de singularités hydrauliques : seuils, digues, buses ;
- Prise en compte de la circulation liée aux vagues grâce au couplage avec les codes ARTEMIS ou TOMAWAC.

La méthode des éléments finis sur laquelle repose TELEMAC, associée à un maillage de calcul constitué de facettes triangulaires de tailles et de formes variables, permet un découpage adapté de la topo-bathymétrie et donc la prise en compte des géométries complexes de la zone d'étude (perrés, lit mineur des rivières à méandres, îles, ouvrages, routes, rues, etc..). Elle autorise de densifier le maillage (et donc d'affiner les résultats fournis par le modèle) dans les zones d'intérêt : c'est par exemple le cas au droit des ouvrages et des zones urbaines.

#### Données utilisées et Forçage

**Gestion des bancs découvrant** : ce paramètre conditionne le minimum de hauteur d'eau prise en compte dans une cellule pour la résolution numérique du calcul (Hmin). Ici Hmin a été pris égal à 0,001 m.

**Carte des coefficients de Strickler** (Figure 37) : celle-ci se base sur l'occupation des sols décrite par la base de données Corine Land Cover et des observations réalisées par orthophotographie.

Un coefficient de Strickler élevé signifie que l'écoulement est facilité (zones de plaines dégagées). Un faible coefficient Strickler limite les écoulements et est appliqué sur les zones avec des obstacles à l'écoulement (zones urbaines où les bâtiments limitent les écoulements, zones boisées où la végétation limite la vitesse du courant).

Des tests de sensibilité ont permis de déterminer les coefficients de Strickler suivants exprimés en  $m^{1/3} s^{-1}$  :

- zones urbaines industrielles : 5 ;
- zones urbaines résidentielles : 10 ;
- zones dégagées, prairies, terrain de sport... : 15 ;
- lit mineur secteur amont : 40 ;
- secteur maritime : 50.



Figure 37 - Carte de répartition des coefficients de Strickler ( $m^{1/3} s^{-1}$ ) exprimant la rugosité du sol.

**Niveau d'eau à la côte** : en accord avec la première version de l'étude, les niveaux d'eau pris en compte dans les PPRL sont :

- Le niveau d'eau à la côte pour l'évènement de référence est de 3,28 m NGF ;
- Le niveau d'eau à la côte pour l'évènement à échéance 2100 est de 3,68 m.

Ces niveaux d'eau à la côte prennent en compte :

L'élévation du niveau de la mer lié au changement climatique, conformément à la circulaire du 27 Juillet 2011 et au guide méthodologique (MEDDE, 2014) ainsi que :

- Les incertitudes liées aux différentes étapes de calcul ;
- La marée astronomique (ou prédite) ;
- La surcote atmosphérique ;
- La surcote liée au déferlement des vagues.

**Débit de la Bidassoa** : le débit considéré pour l'évènement de référence et l'évènement à échéance 100 ans correspond à un débit de période retour décennal  $Q_{10} = 770 m^3.s^{-1}$  à la station Endarlatsa.

**Forçage** : des séries temporelles ont été construites afin de forcer le modèle numérique pour simuler l'évènement de référence actuel et l'évènement de référence à échéance 100 ans (cf. figure ci-dessous).

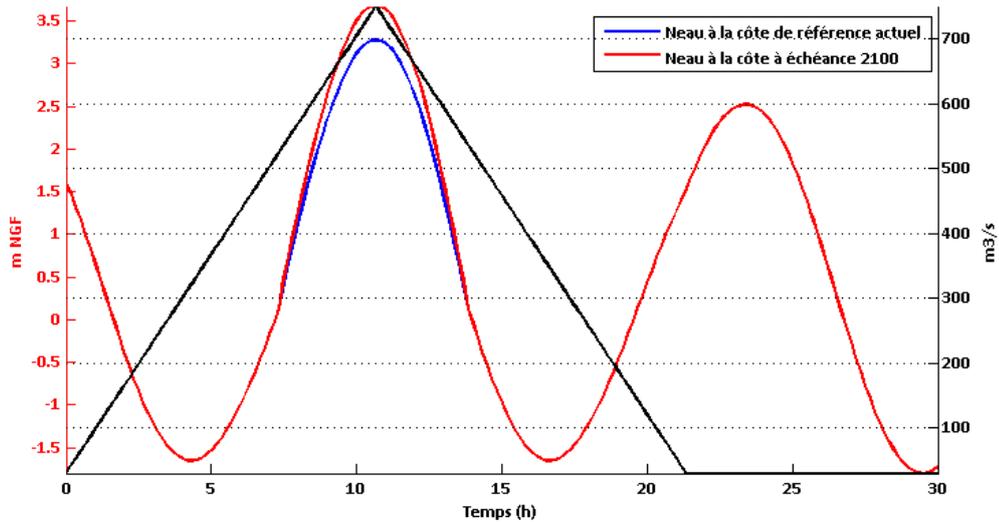


Figure 38. Séries temporelles des forçages hydrauliques du modèle. Courbes de marées pour l'évènement de référence actuel (bleu) et à échéance 2100 (rouge). La courbe du débit est en noir.

La série temporelle de marée a été construite de la manière suivante :

- Les cycles de marée sont construits à partir des caractéristiques générales d'une marée de vive-eau (coefficient 95) ;
- Deux cycles de marée haute sont intégrés au signal ;
- La partie haute de la première marée haute est modifiée pour intégrer les surcotes. Cette partie de signal est normée et multipliée par la valeur de hauteur maximale calculée pour l'évènement de référence. Ainsi, seule la marée haute du premier cycle de marée intègre les surcotes, les 20 cm ou 60 cm de prise en compte du changement climatique et les incertitudes.

Pour la courbe de débit de la Bidassoa, une interpolation linéaire a été réalisée entre la valeur maximale atteinte durant le pic de marée haute et les valeurs moyennes du débit du cours d'eau. La durée de la crue est d'environ 24 heures, avec le pic de crue qui s'étale uniquement sur une marée haute, ce qui correspond approximativement aux crues enregistrés durant les évènements de 2009 et 2011.

#### Calage et validation

Des informations supplémentaires à celles déjà disponibles sur les crues du 11 et 12 Février 2009 et du 06 Novembre 2011 (photographies et laisses de crues) ont pu être collectées pour le complément d'étude. Ainsi, la validation du modèle de crue de la Bidassoa a été améliorée par rapport à celle de la 1<sup>ère</sup> version de l'étude en 2012.

Le débit instantané maximal de la crue de 2009 enregistré est de 734 m<sup>3</sup>/s (débit moyen journalier 447,3 m<sup>3</sup>/s) peu avant la marée haute de coefficient 106, ce qui a favorisé le blocage dynamique du niveau d'eau en amont de l'estuaire. Le débit instantané maximal de la crue de 2011 est de 646,5 m<sup>3</sup>/s (débit moyen journalier de 419 m<sup>3</sup>/s) avec un coefficient de marée de 55. La crue de 2011 a donc atteint une cote plus basse que celle de 2009 sur la partie estuarienne. Lors de ces 2 crues, les principaux lieux impactés sont les zones basses entre le pont ASF avant la commune de Biriadou jusqu'à la station Endarlaza sur les 2 rives française et espagnole. En revanche, le quartier de Béhobie n'a été inondé qu'en 2009 en aval rive espagnole. Bien qu'aucune donnée précise n'ait été collectée sur la zone des Joncaux, il semblerait qu'elle n'ait pas été inondée.

Les simulations de ces deux évènements majeurs récents montrent que le modèle numérique TELEMAC 2D reproduit correctement les niveaux d'eau dans le lit majeur : la moyenne des erreurs est d'environ 0,3 m, ce qui est acceptable (Tableau 11, Figure 39, Figure 40). Il en est également déduit que le MNT reproduit de manière satisfaisante le terrain naturel sur l'ensemble de la zone y compris sur la rive espagnole.

ID Laisses de crues	Altitudes mesurées (m/NGF)	Altitudes simulées (m/NGF)	Différence (m)
LDC_2009_1	5,98	6,26	0,28
LDC_2009_2	7,10	6,83	-0,27
LDC_2009_3	7,16	7,23	0,07
LDC_2009_4	6,83	6,85	0,02

Tableau 11 : Comparaison des altitudes de laisses de crue mesurées et simulées pour l'évènement de février 2009.



Figure 39 : Quartier de Behobie inondée aux abords du Pont de Santiago lors de l'évènement de février 2009.



Figure 40 : Hauteur d'eau maximale simulée dans le quartier de Béhobie lors de l'évènement de février 2009.

#### 8.4. EVENEMENT DE REFERENCE RETENU

L'évènement de référence n'est pas à proprement parlé un seul évènement mais résulte de la combinaison de plusieurs scénarios de référence permettant d'obtenir une situation où l'ensemble des facteurs sont considérés dans leurs caractéristiques les plus intenses. **L'évènement de référence permet ainsi de tenir compte de toutes des situations les plus pénalisantes sans qu'elles puissent nécessairement se produire simultanément.**

L'évènement de référence retenu pour la commune d'Hendaye prend donc en compte :

- pour la façade maritime :
  - o 15 combinaisons de niveau statique dont la période de retour est centennale ;
  - o les volumes franchissant associés aux conditions (niveaux d'eau/vagues) pour les 15 scénarios et leur propagation à terre ;
  - o la défaillance des ouvrages de défense du perré du boulevard de la mer.
- pour la baie de Txingudi :
  - o 15 combinaisons de niveaux statiques dont la période de retour est centennale ;
  - o la concomitance de ces 15 combinaisons avec une crue décennale de la Bidassoa ;
  - o La défaillance de la digue des Joncaux.

**L'évènement de référence retenu pour caractériser l'aléa de référence est donc une situation représentant les résultats de submersion les plus importantes.**

## 9. Cartographie des aléas

### 9.1. QUALIFICATION DE L'ALEA

Un aléa est défini par les conséquences physiques d'un scénario d'évènements naturels et/ou technologiques. Il est caractérisé par son occurrence et son intensité. La transcription spatiale de l'aléa permet de le représenter et de le qualifier (Rapport MEDDTL, v.11, novembre 2011). Cette présente étude PPRL porte sur la caractérisation de l'aléa submersion marine pour un évènement centennal.

Le risque résulte du croisement de l'aléa et d'un enjeu vulnérable (personnes, biens, activités, patrimoine, etc. susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel (Rapport MEDDTL, v.11, novembre 2011). La caractérisation du risque ne fait pas l'objet de cette présente étude.

Conformément aux recommandations méthodologiques du MEDDTL (Rapport de novembre 2011, version 11), le niveau d'aléa est obtenu par le croisement de deux variables : les hauteurs d'eau de l'inondation et la vitesse d'écoulement de l'eau.

Ces deux variables ont été calculées grâce à la modélisation bidimensionnelle sur deux cycles complets de marée. Elles sont représentées individuellement sur des cartes selon les intervalles et code couleur suivants :

- Hauteurs d'eau maximales :
  - o moins de 0,5 m en jaune ;
  - o de 0,5 à 1 m en orange ;
  - o supérieures à 1 m d'eau en rouge.
- Vitesses d'écoulement de l'eau maximales :
  - o moins de 0,2 m.s<sup>-1</sup> en bleu clair;
  - o de 0,2 à 0,5 m.s<sup>-1</sup> en bleu ;
  - o supérieures à 0,5 m.s<sup>-1</sup> en bleu foncé.

Dans la 1<sup>ère</sup> version de l'étude 2012, les aléas ont été calculés en croisant les valeurs maximales des hauteurs et des vitesses d'eau des différents scénarios simulés. Selon les recommandations méthodologiques du MEDDTL (Rapport de novembre 2011, version 11), la classe d'aléa peut être pondérée en fonction de la dynamique de la submersion (temps de montée des crues). Cette méthode a été choisie, car sur le secteur d'Hendaye, la classe d'aléa est essentiellement contrôlée par un seul paramètre : la hauteur d'eau en l'occurrence puisque les vitesses des écoulements sont faibles.

Etant donné que les hauteurs et vitesses d'eau ne sont pas systématiquement maximales au même moment lors d'un évènement, une vérification a été effectuée, dans ce complément (2016), par un croisement dynamique, c'est-à-dire un croisement des valeurs de hauteurs et vitesses d'eau à chaque pas de temps sur toute la durée de la simulation numérique. C'est la valeur maximale de l'aléa atteinte au cours de la simulation qui est retenue. L'aléa ainsi calculé est plus réaliste.

La comparaison des résultats issus des 2 types de croisement met en évidence des écarts faibles voire négligeables sur les classes d'aléa. **Il est donc confirmé que la méthode de**

**croisement des valeurs maximales employée dans la 1<sup>ère</sup> version de l'étude (2012) et reprise dans ce complément (2016) fournit, sur le secteur d'Hendaye des résultats cohérents.**

Dans la 1<sup>ère</sup> version de l'étude (2012), les classes d'aléa résultantes du croisement des hauteurs et vitesses d'eau ainsi que le code couleur sont présentés dans le Tableau 12. Ce code couleur est conservé pour le secteur du front de mer d'Hendaye et la baie de Txingudy. Cependant, la reprise des cartes dans le cadre de ce complément (2016) a permis d'ajuster un nouveau code couleur aux besoins de la DDTM64 sur la zone des Joncaux uniquement (Tableau 13).

Vitesse / Hauteur	$V < 0.2 \text{ m/s}$	$0.2 < V < 0.5 \text{ m/s}$	$V > 0.5 \text{ m/s}$
$H < 0.5 \text{ m}$	Faible	Modéré	Fort
$0.5 < H < 1 \text{ m}$	Modéré	Modéré	Fort
$H > 1 \text{ m}$	Fort	Fort	Très fort

Tableau 12 : Qualification de l'aléa en fonction des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement (guide méthodologique, MEDDE, 2014).

Hauteur / Vitesse	$V < 0.2 \text{ m/s}$	$0.2 < V < 0.5 \text{ m/s}$	$V > 0.5 \text{ m/s}$
$H < 0.5 \text{ m}$	Faible	Modéré 1	Fort
$0.5 < H < 1 \text{ m}$	Modéré 2	Modéré 2	Fort
$1 < H < 2 \text{ m}$	Fort	Fort	Très Fort

Tableau 13 : Classes d'aléa basées sur le croisement des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement.

Nota :

Les mêmes classes d'aléa sont employées pour caractériser l'aléa « actuel » et l'aléa « 2100 ».

Sur les cartes d'aléas, la limite de l'aléa fort côté « mer » correspond au trait de côte Histolitt.

Afin d'ajuster les résultats bruts de modélisation numérique, une analyse à dire d'expert a été réalisée au cours de la phase cartographique. Elle est présentée Annexe 13.

## 9.2. PARTICULARITES DE LA CARTOGRAPHIE

### – Secteurs soumis à l'effet des vagues

Pour les secteurs soumis à l'effet des vagues, les recommandations méthodologiques du MEDDTL prévoient l'application d'une bande de sécurité de 25 m qui peut être étendue à 50 m pour des secteurs spécifiques :

- La zone soumise aux franchissements par paquets de mer est sujette à des contraintes spécifiques, en particulier à des chocs mécaniques de vagues.
- Lorsque des zones de franchissements importants sont identifiées, une analyse spécifique de la topographie en arrière et des efforts et pressions d'impact des franchissements de vagues peut être menée afin de déterminer la largeur de la zone soumise au déferlement.
- Dans les zones identifiées où les franchissements sont modérés, la largeur de la zone soumise au déferlement peut être considérée par défaut comme égale à 25 m (étendue à 50 m dans un contexte cyclonique).
- Cette bande ne prend pas en compte les éventuelles projections de matériaux (galets, etc). Les secteurs soumis aux projections (sables, galets, etc) doivent être par conséquent identifiés.

Sur la commune d'Hendaye, seul le front de mer de la baie est exposé à l'effet des vagues et la bande de sécurité de 25 m y est appliquée.

### – Bande de précaution relative aux ouvrages de protection

Conformément aux recommandations méthodologiques du MEDDTL, une bande de précaution est appliquée en arrière des ouvrages de protection de type digue (c'est-à-dire faisant obstacle à l'écoulement) afin de prendre en compte :

- les fortes vitesses d'écoulement de l'eau lors de surverse de l'ouvrage ;
- des vitesses d'écoulement de l'eau d'autant plus importantes en cas de brèche dans l'ouvrage.

La largeur de cette bande de précaution est soit :

- forfaitaire et correspond à une distance de 100 fois la hauteur  $h$  comprise entre le niveau marin de référence du PPRL et la cote du terrain naturel immédiatement derrière l'ouvrage, sauf dans le cas où elle se prolongerait à des cotes au-dessus du niveau marin de référence (Figure 41). La hauteur considérée sera au maximum la hauteur comprise entre la cote de crête de l'ouvrage et la cote du terrain naturel immédiatement derrière l'ouvrage.
- basée sur des éléments techniques (issus de modélisations numériques par exemple) fournis par le gestionnaire de l'ouvrage, sans pouvoir être inférieure à 50 mètres.

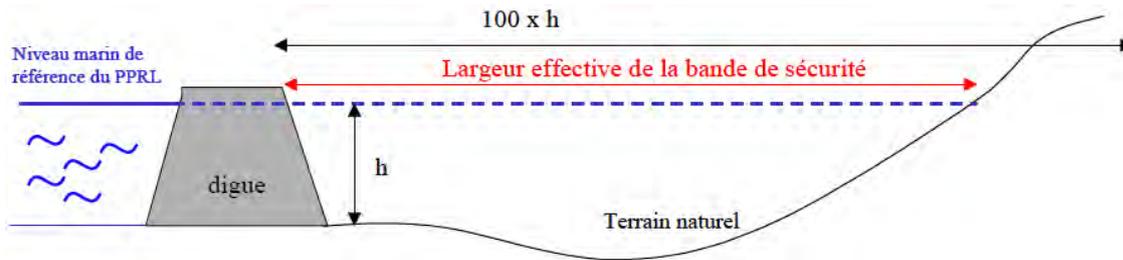


Figure 41 : Définition de la bande de précaution derrière un ouvrage (MEDDTL, 2011).

### 9.3. VERIFICATION DE TERRAIN

La méthode de caractérisation de l'aléa submersion marine basée sur une modélisation numérique peut engendrer des erreurs dues à l'interpolation des modèles numériques de terrain (MNT), au manque de données topographiques ou encore à la faible résolution des mailles de calculs. C'est pourquoi les cartes d'aléas obtenues sont vérifiées et ajustées à partir d'une analyse à dire d'expert basée d'une part sur la connaissance historique et sur l'analyse critique des outils et données utilisés mais aussi sur une analyse de terrain. Cette analyse a été effectuée par les équipes du BRGM et de CASAGEC Ingénierie lors d'une visite sur site les 13 et 14 Février 2013.

Elle a notamment permis de vérifier :

- la prise en compte par la modélisation numérique d'éléments morphologiques tels que les talus, les fossés, les seuils topographiques et autres irrégularités du terrain ;
- la bonne représentation par la modélisation numérique des processus de submersion marine (effet des vagues, effet du frottement sur le sol par exemple, zones d'entrées d'eau, propagation dans l'estuaire) ;
- l'application de la bande de sécurité liée à l'effet des chocs de vagues et de la bande de précaution en arrière des ouvrages (Figure 41 et Figure 42).

La Figure 43 illustre un secteur de débordement possible à l'intérieur de l'estuaire de la Bidassoa, au niveau de la zone des Joncaux. La situation de la zone résidentielle à l'arrière d'un méandre est défavorable car l'extrados du méandre est toujours soumis à des vitesses d'écoulement plus élevées lorsque la Bidassoa sort de son lit.



Figure 42 : Zone d'application de la bande de sécurité liée à l'effet des vagues sur le front de mer d'Hendaye.



Figure 43 : Zone de débordement dans l'estuaire de la Bidassoa, secteur des Joncaux (Hendaye).

## 9.4. RESULTATS DE LA CARTOGRAPHIE

Les aléas dits « actuel » et « 2100 » sont décrits ci-dessous du Nord vers le Sud depuis la plage d'Hendaye jusqu'à la zone des Joncaux. Toutes les cartes décrites ci-dessous sont également présentées en Annexes 16 à 33 et fournies au format SIG.

### 9.4.1. Hendaye plage

Les Figure 44 et Figure 45 présentent la cartographie des aléas dits « actuel » et « 2100 » respectivement, sur le secteur de la plage d'Hendaye.

Il est constaté que le centre d'Hendaye est submergé pour les 2 aléas mais avec une intensité légèrement plus forte pour l'aléa « 2100 ». Cette submersion marine est causée par l'action des vagues provoquant le franchissement de paquets de mer. Les eaux s'introduisent entre la rue d'Irun et le Boulevard du Général Leclerc jusqu'au rond-point des Palmiers et atteignent la baie

de Txingudi. La rue des Eucalyptus est également touchée par les eaux mais sur moins de 100 m.

Alors qu'il n'y a pas de submersion pour l'aléa « actuel », pour l'aléa « 2100 » la lame d'eau pénètre dans les terres sur la promenade de la baie de Txingudy jusqu'aux terrains de sport par la rue des Rosiers.

L'aléa a été cartographié selon les principes suivants :

- la bande de sécurité en aléa fort est appliquée le long de la promenade du Boulevard de la mer car les vagues déferlent directement sur le perré et certaines franchissent la route. Cette bande de 25 à 35 m de largeur est appliquée à partir du pied des ouvrages jusqu'au pied des résidences du front de mer, tous deux identifiés à partir de l'orthophotographie 2009 de l'IGN (à une échelle au 1/5 000<sup>ème</sup>) (bande hachurée en gris sur les Figure 44 et Figure 45).
- L'ancien Casino est classé en aléa très fort car il est au niveau de l'estran qui est en érosion. À chaque marée haute, le bâtiment est entouré par les eaux et est soumis à l'impact du déferlement des vagues.
- Le haut de plage au niveau de Sokoburu est classé en aléa fort jusqu'à la route et au parking du port de plaisance. Ce parking situé entre la plage et le port de plaisance est en aléa de niveau faible pour le scénario de l'aléa « actuel » et présente une zone en aléa de niveau moyen entre le club House et la plage pour le scénario de l'aléa « 2100 »
- L'esplanade des ateliers Tribord et le quai de la Floride sont classés en aléa de niveau faible pour le scénario de l'aléa « actuel » ainsi qu'une partie de la plage au fond la baie de Txingudi avec son centre nautique.

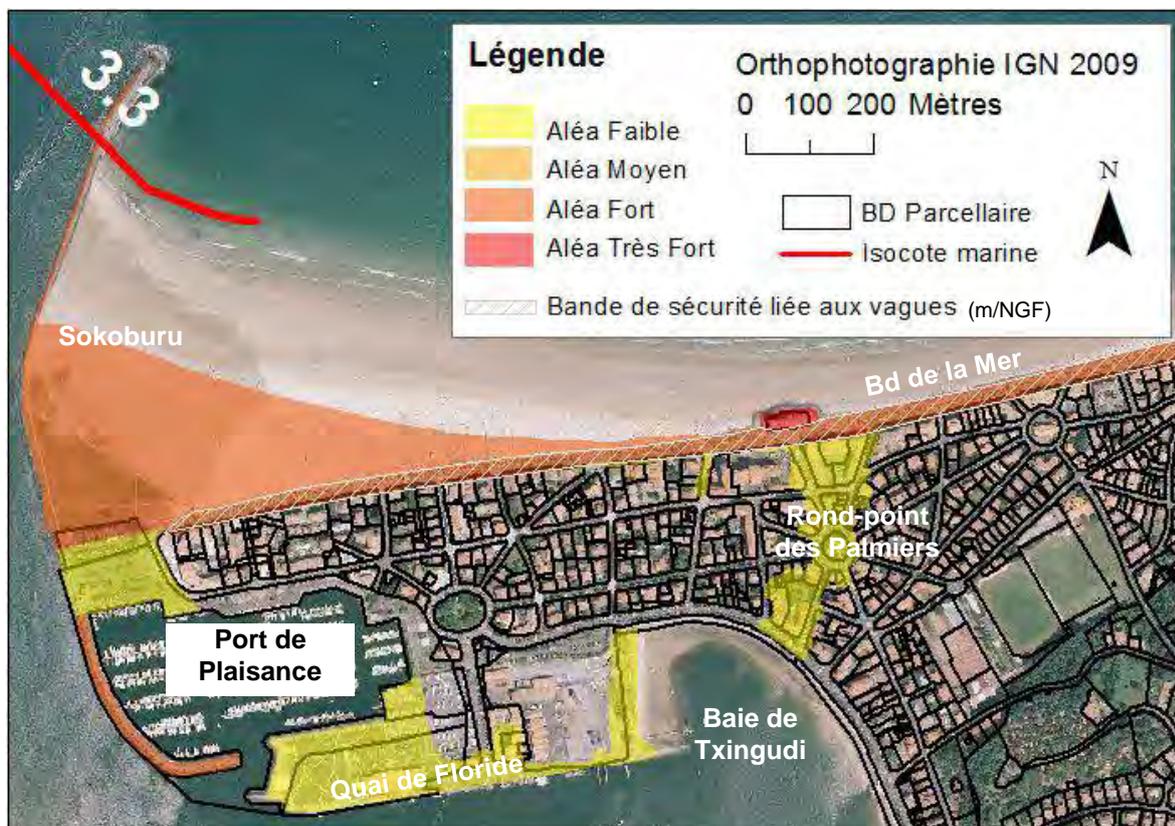


Figure 44 : Aléa « actuel » sur le secteur de la plage d'Hendaye.

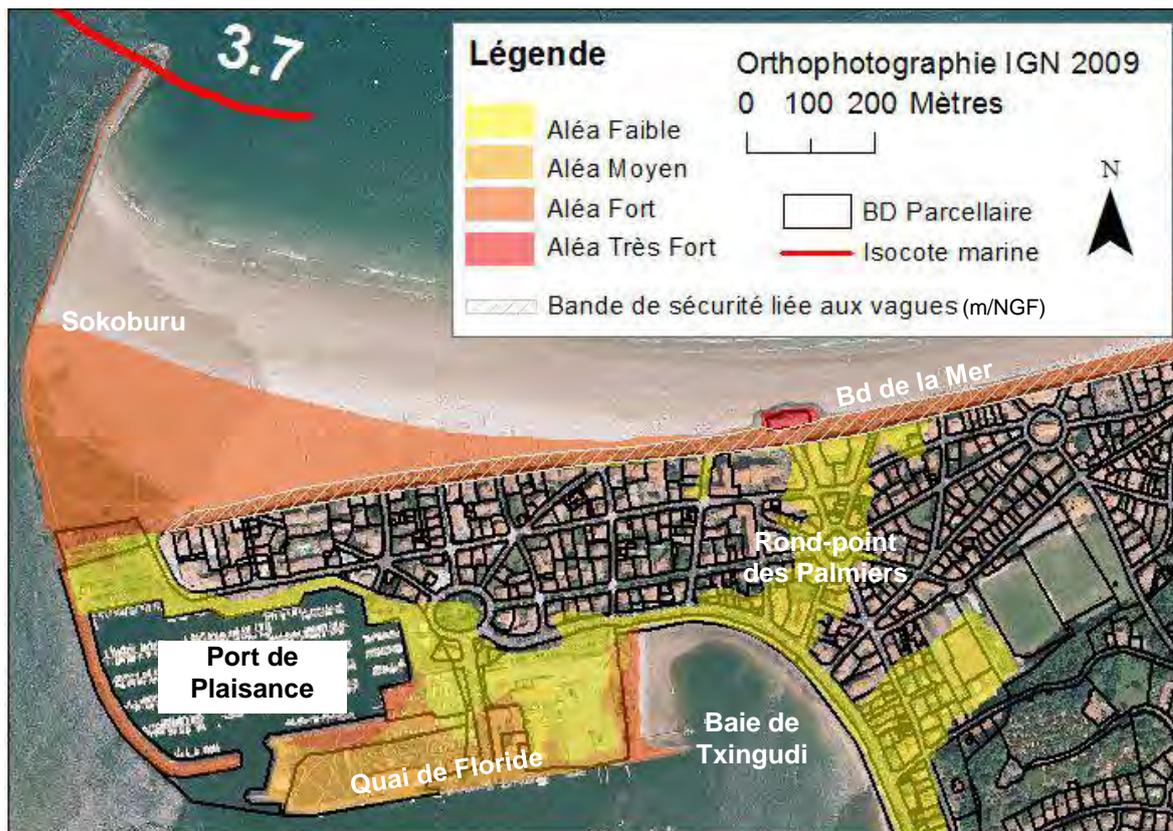


Figure 45 : Aléa « 2100 » sur le secteur de la plage d'Hendaye.

#### 9.4.2. Zone des Joncaux

Les Figure 47 et Figure 48 présentent la carte de synthèse des aléas « actuel » et « 2100 », sur le secteur de la zone des Joncaux, c'est-à-dire la classe d'aléa la plus forte entre les 2 scénarios, avec ou sans ruine du tronçon de la promenade des Joncaux considéré comme ayant un rôle de digue.

##### Niveaux d'eau

Dans ce complément d'étude (2016), la meilleure représentation du terrain naturel (lit mineur du fleuve et complexités géographiques telles que les piles de ponts, par ex.) associée à un modèle numérique plus adapté aux conditions estuariennes ont permis une amélioration de la représentation des écoulements en période de crue. Les niveaux du plan d'eau plus finement calculés sont plus élevés que dans la 1<sup>ère</sup> version de l'étude (jusqu'à 20 cm, Tableau 14 et Figure 46) : en aval de la zone des Joncaux pour l'évènement actuel, la cote est de 3,5 m/NGF (20 cm de plus qu'à l'embouchure) alors que dans la 1<sup>ère</sup> version elle était de 3,3 m/NGF (comme à l'embouchure). Il est ainsi vérifié la meilleure prise en compte de l'influence du fluvial sur la propagation de l'évènement marin qui est plus sensible en amont de l'estuaire (au droit de la zone des Joncaux par exemple) qu'en aval (front de mer et baie de Txingudy). De même, en amont de la zone des Joncaux, à proximité du pont de Béhobie, pour l'évènement actuel, la cote est à 3,8 m/NGF alors qu'elle était à 3,6 m/NGF dans la 1<sup>ère</sup> version.

D'autre part, il est constaté que pour l'évènement actuel, l'influence du fluvial crée un gradient de 30 cm sur la cote marine entre l'amont et l'aval de la zone des Joncaux. Pour l'évènement

2100, ce gradient n'est que de 20 cm car bien qu'entre ces 2 évènements l'altitude du plan d'eau ait été élevée de 40 cm, un débit fluvial décennal est conservé.

	Evènement actuel	Evènement 2100
Niveau d'eau à l'amont de la zone des Joncaux	3,8 m/NGF	4,1 m/NGF
Niveau d'eau à l'aval de la zone des Joncaux	3,5 m/NGF	3,9 m/NGF

Tableau 14 : Niveaux d'eau en m/NGF simulés en amont et aval de la zone des Joncaux pour les 2 évènements actuel et 2100.

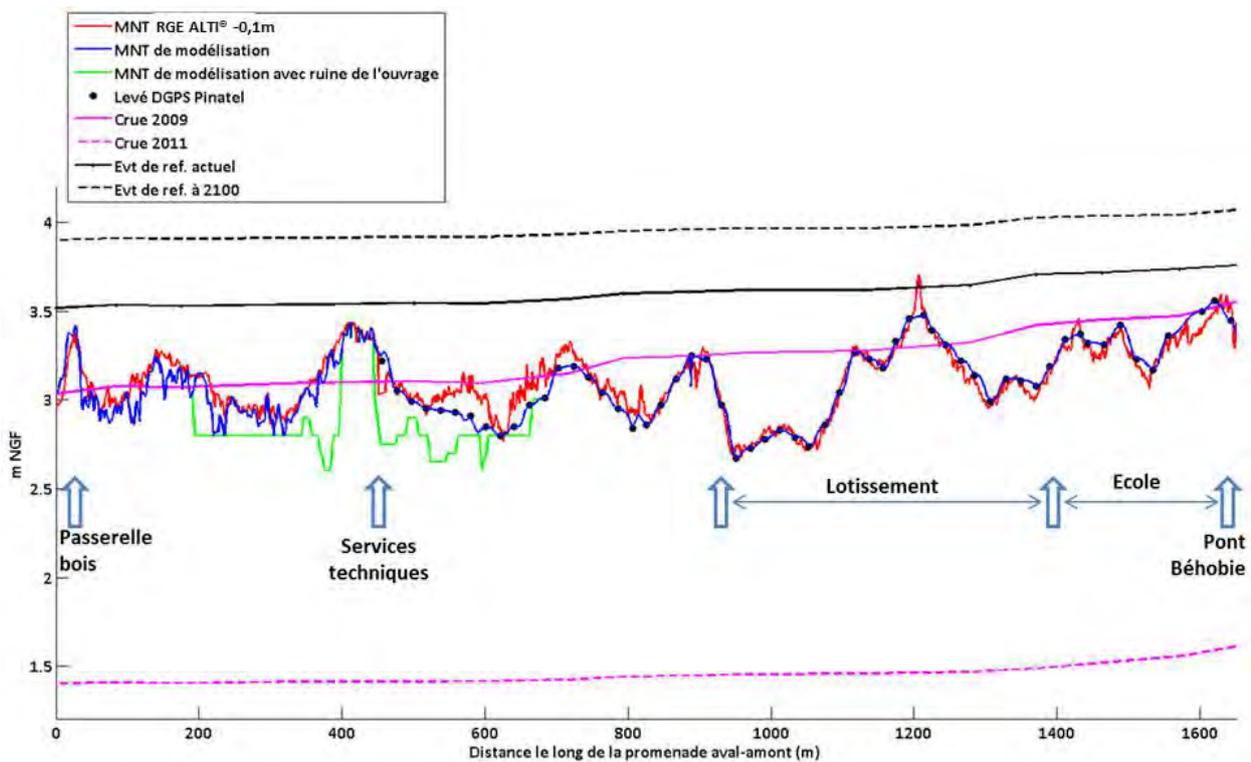


Figure 46 : Présentation des niveaux d'eau simulés le long de la promenade des Joncaux comparativement aux niveaux des crues passées (2009 et 2011).

### Surface de submersion marine

Malgré l'augmentation de niveau d'eau entre les 2 versions de l'étude, l'utilisation d'un MNT de meilleure qualité (meilleure résolution et précision, recalage avec les données DGPS, sous-estimation de l'altitude corrigée), les surfaces de submersion marine au sein de la zone des Joncaux pour l'évènement actuel sont **réduites de 80 %** par rapport à la 1<sup>ère</sup> version de l'étude.

Dans la 1<sup>ère</sup> version de l'étude (2012), la différence entre les 2 évènements actuel et 2100 n'était pas significative en terme de surface de submersion. Dans ce complément (2016), l'élévation de l'altitude du plan d'eau de 40 cm pour l'évènement 2100 (20 cm sont déjà intégré au niveau marin de l'évènement actuel, soit 60 cm au total pour la prise en compte du changement climatique), induit une plus importante pénétration de l'eau dans la zone des Joncaux par rapport à l'évènement actuel (plus du double en m<sup>2</sup>, Tableau 15). Cependant, les

surfaces de submersion marine sont **réduites de 30 %** entre la 1<sup>ère</sup> version de l'étude et ce complément pour l'évènement 2100.

### Classes d'aléa

Outre la modification du code couleur comme présenté précédemment, les classes d'aléa ont également été réduites pour l'évènement actuel : l'aléa fort est limité sur quelques mètres le long de la promenade en raison des vitesses d'écoulement légèrement plus importantes à proximité du lit du fleuve. Hormis ce linéaire en aléa modéré à fort, l'aléa est plus élevé dans un secteur bas situé en arrière du tronçon de la promenade considéré comme ayant un rôle de digue. Dans ce secteur où les vitesses d'écoulement sont faibles (pour rappel : dans le cas de l'évènement marin centennal de référence combiné à une crue décennale de la Bidassoa), c'est bien la hauteur d'eau et donc l'altitude du terrain naturel qui contrôlent la classe d'aléa.

Pour l'évènement 2100, la promenade est également en aléa fort, les vitesses y sont plus importantes. La classe d'aléa dans la zone basse en arrière du tronçon considéré comme ayant un rôle de digue est plus élevée que pour l'évènement actuel en raison essentiellement de l'augmentation des hauteurs d'eau.

Le tronçon de promenade considéré comme ayant un rôle de digue car surélevé par rapport au terrain naturel en arrière a fait l'objet d'une hypothèse de ruine. C'est l'aléa le plus fort entre ce scénario de ruine et le scénario avec la promenade en état fonctionnel qui a été retenu. L'impact du scénario de ruine sur la surface d'aléa est considéré négligeable. Seules les vitesses d'écoulement sont accentuées par la ruine de la promenade mais très localement dans une zone de toute façon incluse dans la bande de précaution dont la largeur est globalement de 50 m.

### Dynamique de submersion marine (cf. Annexes 14 et 15)

Pour l'évènement actuel, les premières entrées d'eau se produisent 1h40 avant la pleine mer principalement par le tronçon de promenade qui a subi une ruine. La zone des Joncaux se vide ensuite dans le lit mineur du fleuve lors de la marée descendante jusque 3 h après la pleine mer.

Au total, la submersion marine de l'évènement actuel dure environ 4h40 même si quelques cuvettes topographiques restent inondées.

Pour l'évènement 2100, les premières entrées d'eau se produisent 1h50 avant la pleine mer toujours par le tronçon de promenade qui a subi une ruine. La zone des Joncaux se vide ensuite dans le lit mineur lors de la marée descendante jusqu'à 3h30 après la pleine mer.

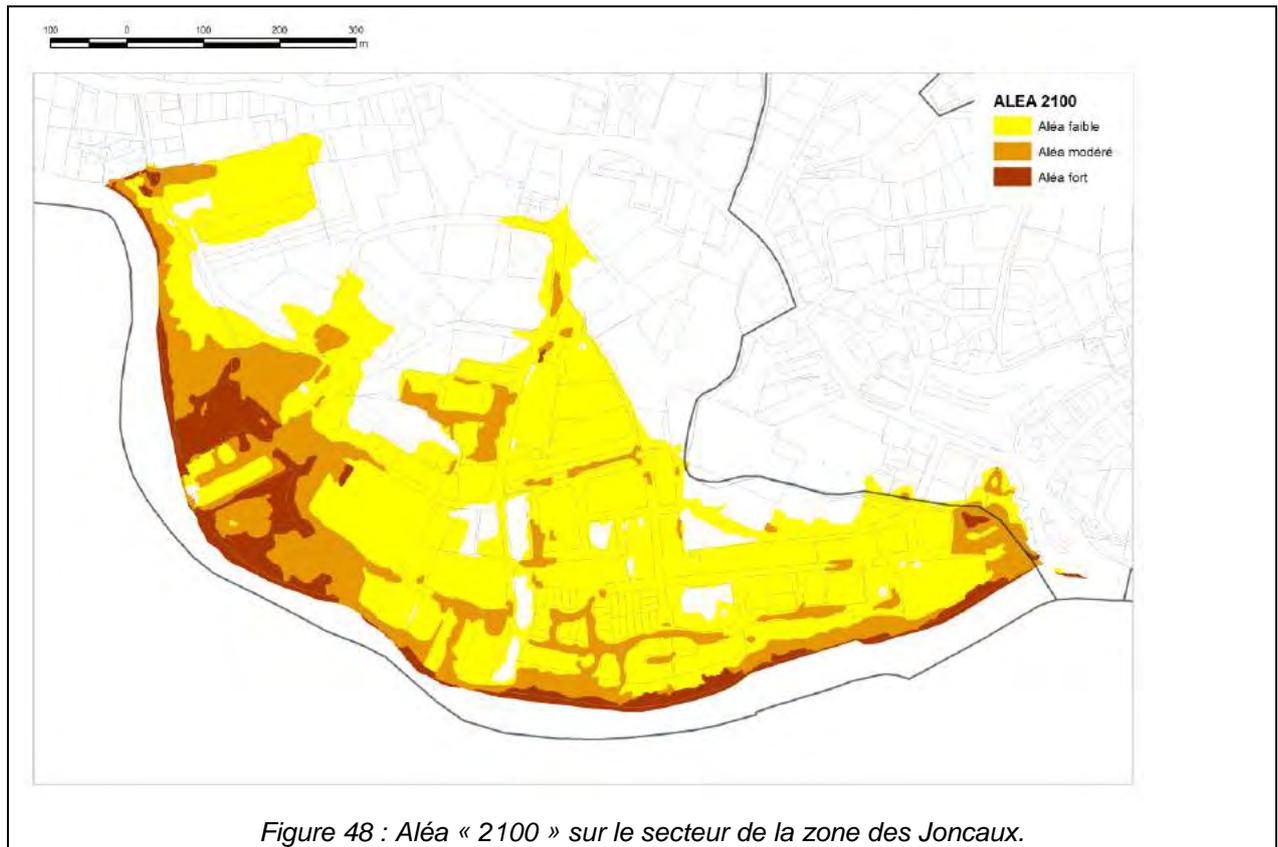
Au total, la submersion marine de l'évènement actuel dure environ 5h20 même si quelques cuvettes topographiques restent inondées (au Sud de la rue de l'Industrie notamment).

	Début de la submersion	Temps de submersion	Volume submergé (m <sup>3</sup> )	Surface de submersion (ha)	Débit de pointe de l'hydrogramme sur la promenade des Joncaux (m <sup>3</sup> /s)
<b>Evènement de référence</b>	1h40 avant la PM	4h40	49 000 m <sup>3</sup>	16 (ha)	8,4 m <sup>3</sup> /s
<b>Evènement de référence à échéance 2100</b>	1h50 avant la PM	5h20	128 660 m <sup>3</sup>	33 (ha)	12,3 m <sup>3</sup> /s

Tableau 15 : Synthèse de la dynamique, des volumes, des surfaces et des débits de la submersion marine pour les 2 évènements actuel et 2100.



Figure 47 : Aléa « actuel » sur le secteur de la zone des Joncaux.



## 10. Conclusion

La caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre des PPRL du secteur d'Hendaye a été réalisée conformément aux recommandations méthodologiques du MEDDTL (rapport de novembre 2011, version 11) pour la 1<sup>ère</sup> version de l'étude en 2012 et conformément à celles du MEDDE (rapport de 2014) pour ce complément d'étude de 2016. Ce travail a été réalisé par le BRGM avec la participation de CASAGEC Ingénierie dans le cadre d'un contrat de sous-traitance avec le BRGM.

L'étude historique ayant mis en évidence qu'aucun évènement de submersion passé et connu est plus défavorable que des évènements centennaux calculés à partir d'analyses statistiques, ces derniers ont été retenus comme évènements naturels de référence. La valeur maximale de niveau marin calculée au rivage pour un évènement centennal est de 3,27 m/NGF alors qu'elle est de 2,88 m/NGF (au marégraphe de Socoa) pour l'évènement historique connu le plus fort.

La méthode mise en œuvre pour la détermination de ces évènements naturels centennaux permet de considérer les effets combinés de la surcote atmosphérique, du niveau de marée mais aussi des vagues. Grâce aux bases de données disponibles, une méthode complète d'analyses statistiques a pu être mise en œuvre. Il s'agit d'une méthode dite « de probabilité conjointe » (Bulteau et *al.*, 2012).

La propagation de la submersion marine pour ces évènements naturels de référence a été effectuée à partir :

- de modélisation numérique permettant de connaître les conditions d'agitation de la mer au pied des ouvrages de protection côtière et de calculer l'élévation du plan d'eau générée par le déferlement des vagues ;
- de formules empiriques permettant de calculer les volumes d'eau franchissant les ouvrages par paquets de mer ;
- de modélisation numérique permettant de prendre en compte le débit de la Bidassoa et la rugosité du sol notamment.

**Les résultats des simulations ont montré que pour des évènements centennaux, il n'y avait pas de submersion marine par débordement sur le secteur d'Hendaye, sauf en cas de brèche dans les ouvrages de protection côtière, car le niveau marin au rivage est inférieur à la cote d'arase des ouvrages.** En concertation avec la DDTM des Pyrénées Atlantiques, le Conseil Général et les services techniques des communes, des hypothèses de défaillance des ouvrages ont donc été retenues afin de simuler 2 scénarios de propagation de la submersion : un scénario « sans ouvrage » (ruine généralisée, arasement des ouvrages) et un scénario de « défaillance » (brèche sur le front de mer à Hendaye et ruine du tronçon de la promenade de la zone des Joncaux qui fait office de digue). **En pratique, ces 2 scénarios reviennent à la même simulation et donc aux mêmes résultats puisque, une fois que les brèches ou ruine sont appliquées, la topographie est ramenée au niveau du terrain naturel.**

D'autre part, les résultats des simulations ont montré que **des franchissements par paquets de mer sur le front de mer d'Hendaye pouvaient générer une submersion marine** avec des entrées d'eau principalement au droit de la rue d'Irun à proximité du Casino.

La cartographie des aléas « actuel » et « 2100 » représente 4 niveaux d'aléas (de faible à très fort) obtenus à partir du croisement des hauteurs d'eau et des vitesses de l'écoulement de l'eau.

Une bande de sécurité en aléa fort d'une largeur de l'ordre de 25-35 m a été appliquée sur le front de mer d'Hendaye afin de prendre en compte l'effet des vagues. Dans le secteur des Joncaux, une bande de précaution de l'ordre de 50 m en aléa fort a également été appliquée en arrière de la promenade côtière (au niveau du tronçon jouant le rôle de digue). Elle est en partie confondue dans une zone déjà en aléa fort pour l'aléa « actuel » et en aléa très fort pour l'aléa « 2100 ».

**Les zones particulièrement exposées à la submersion marine sur le secteur d'Hendaye sont :**

- **un « couloir » qui relie le Casino à la baie de Txingudi par la rue d'Irun et le rond-point des Palmiers ;**
- **la zone en arrière du quai de la Floride ;**
- **la zone des terrains de sport par la rue des Tulipes depuis la baie de Txingudi ;**
- **la zone des Joncaux.**

**Sur le secteur d'Hendaye, l'étendue de la submersion est globalement identique pour l'aléa « actuel » et l'aléa « 2100 ». Les intensités en terme de vitesses et de hauteur d'eau sont légèrement plus fortes pour l'aléa « 2100 ».**

Le complément d'étude sur la zone des Joncaux basé sur l'actualisation des données topographiques pour une meilleure représentation du terrain naturel et l'utilisation d'un modèle hydrodynamique mieux adapté aux conditions estuariennes ont conduit à réduire les surfaces inondables **par submersion marine** de 80% pour l'aléa actuel et de 30% pour l'aléa 2100. Hormis autour de la promenade des Joncaux où les vitesses d'écoulement sont relativement élevées du fait de la proximité du lit du fleuve, les vitesses d'écoulement sont faibles et la classe d'aléa est essentiellement contrôlée par la hauteur d'eau et donc par la topographie du lieu.

## 11. Bibliographie

**Abadie S., Butel R., Dupuis H., Brière C.** (2005) - Paramètres statistiques de la houle au large de la côte sud-aquitaine, *C. R. Geoscience* 337, pp. 769–776

**Bulteau T., Delvallée E., Thiébot J.** (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., Paris F., Pedreros R.** (2013) - Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre des PPRL dans les Pyrénées Atlantiques. Détermination de l'évènement centennal au large. Rapport « intermédiaire ». BRGM/RP-61416-FR, 42 p, 23 fig., 3 tab., 1 ann.

**CETMEF** (2009) - Techniques de protection contre la submersion marine. Bibliographie générale réalisée dans le cadre de l'étude de la protection d'Andernos (33). Décembre 2009, 21 p.

**CETMEF** (2013) - Analyse des surcotes extrêmes le long des côtes métropolitaines – Rapport Avril, 131 p.

**Charles E.** (2012) - Impact du changement climatique sur le climat de vagues en zone côtière, par régionalisation dynamique : application à la côte aquitaine. Thèse de doctorat CNRM, Météo-France, BRGM et Fonds AXA pour la Recherche, 190 p.

**Dugor J., Rihouey D., Weber L.** (2013) - Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre des PPRL des Pyrénées Atlantiques – Secteur d'Hendaye, Rapport d'étude détaillé, Avril, 50p.

**Dugor J.** (2016) – Caractérisation de l'aléa submersion marine pour l'élaboration du PPRL sur le secteur des Joncaux (commune d'Hendaye), complément d'étude, Octobre 2016, CI-16416-rev01, 56p.

**Garcin M., Nicolae Lerma A., Pedreros R. avec la collaboration de F. Paris.** (2013) – Evaluation de la submersion marine maximale à l'échelle régionale. Rapport final. BRGM/RP-62259-FR, p.96, fig.40, tabl.9, ann4.

**Garry G., Graszek E., Toulemont M.** (1997) - Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL). Guide méthodologique. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement et Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, La documentation Française, 54 p.

**Genna A., Capdeville J.-P., Dubreuilh J. et Mallet C.** (2005). Evolution récente et actuelle de la côte basque française (analyse et perspectives). *Géosciences de surface (Géomorphologie)*. *C.R.Geoscience*, Vol. 337, p.1474-1483.

**Hawkes P.J., Gouldby B.P., Tawn J.A.** (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.

**Hervouet, J.M. (2007)** - Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the finite element method. DOI: 10.1002/9780470319628. John Wiley and Sons, Ltd.

**Krien Y., Garcin M., Pedreros R. (2010)** - Méthodes pour l'évaluation à l'échelle nationale de l'emprise maximale de l'aléa submersion marine. Rapport BRGM/RP-58101-FR, 85 p., 28 fig., 5 tab.

**Lazure P., Dumas F. (2007)** - An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). Advances in Water Resources. doi:10.1016/j.advwatres.2007.06.010

**Lecacheux S., Paris F. avec la collaboration de Le Cozannet G. (2012)** – Projet Climats de houle phase 1 : Intercomparaison de simulations rétrospectives et prospectives dans le Golfe de Gascogne. Rapport BRGM/RP-61651-FR, 139p, 57 ill, 1 ann.

**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.

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

**MEDDE (2014)** - Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux, 169 p.

**Mugica J., Nicolae Lerma A., Pedreros R. avec la collaboration de Dugor J. et Rihouey D. (2015)** – Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre du PPRL du secteur d'Hendaye (Pyrénées Atlantiques), Cartographie des aléas « actuel » et « 2100 ». Rapport final. BRGM/RP-62563-FR, 72 p., 39 fig., 10 tabl., 29 ann., 1 CD.

**Pedreros R., Lecacheux S., Idier D. (2009)** - Étude des conditions de vagues sur le littoral de la Côte Basque. Rapport final BRGM/RP-57173-FR. 51 p, 30 illus, 3 Tab.

**Saha S. and co-authors (2010)** - The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 1015–1057. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>.

**SHOM, CETMEF (2008)** - Statistiques des niveaux marins extrêmes de pleine mer en Atlantique et en Manche, ISBN : 978-2-11-098357-2, CD-ROM.

**SHOM (2011)** – Références Altimétriques Maritimes, cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée, 98p.

**TAW (2002)** - Technical Report WAVE Run-up and Wave Overtopping at Dikes. TAW - Advisory Committee on Flood Defence, the Netherlands, May

**Tolman H. L., (2002)** - User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 2.22. Technical note 222, NCEP/NOAA/NWS, National Center for Environmental Prediction, Washington DC.

**Annexe 1**  
**Compte rendu de la 1ère réunion du comité**  
**scientifique 27/05/2011**



Réf. : CR\_AQISUB\_20/06/2011

Pessac, le 20 juin 2011

<b>COMPTE RENDU DE RÉUNION</b>	
Rédacteur : J. Mugica	
Projet : à créer	Numéro :
Objet : <b>Première réunion du Comité Scientifique pour la caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre des PPRL en Aquitaine</b>	
Date : 27/05/2011	Lieu : Pessac (SGR) en visioconférence avec Brest (CETMEF)
Participants : BRGM : E. Delvallée, C. Mallet, J. Mugica, J. Thiébot CASAGEC : D. Rihouey CETE SO : D. Felts, Y. Nedelec CETMEF : A. Creach, C. Perherin SOGREAH : V. Mazeiraud, D. Lartigue	
Absents : RRLA (équipe METHYS du laboratoire EPOC) : P. Bonneton ONF : B. Daubet BRGM : T. Bulteau, M. Garçin, R. Pedreros,	
Diffusion : BRGM + DREAL + DDTM 33/40/64 + GIP Littoral Aquitain + participants + absents	

<b>RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS</b>
<p><b>1. Introduction</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Présentation du contexte (cf. diaporama)</li> <li>- Rappel de la composition et des objectifs du comité scientifique (cf. diaporama)</li> <li>- Objectif de la réunion = présentation puis discussion de la méthodologie que le BRGM propose de mettre en œuvre pour déterminer l'aléa de référence sur chacun des secteurs soumis à un PPRL → méthodologie basée sur la génération de réanalyses de niveaux d'eau et de vagues puis sur l'analyse de leurs probabilités conjointes.</li> </ul> <p>Ne fait pas l'objet de cette réunion mais sera soumis à concertation lors d'éventuelles prochaines réunions :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>o Détermination finale de l'évènement de référence sur chacun des secteurs = analyse des résultats des probabilités conjointes pour le choix de(s) scénario défavorable(s) en considérant les facteurs locaux particuliers à chacun des secteurs</li> <li>o Méthodologie de propagation des facteurs de forçages à la côte puis la propagation de la submersion à terre fera également l'objet d'une prochaine concertation du comité scientifique.</li> </ul>

<p>– Point sur l'état d'avancement de la révision de la doctrine par le CETMEF : Révision de la doctrine pour l'élaboration des PPRL principalement sur la submersion marine suite à la tempête Xynthia afin de prendre en compte :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>○ les interactions entre tous les processus (débordement, changement climatique...),</li><li>○ l'élévation du niveau marin liée au changement climatique,</li><li>○ l'effet des ouvrages.</li></ul> <p>Organisation = 1 comité technique et 4 sous-groupes :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- analyse du fonctionnement naturel de l'hydraulique du littoral</li><li>- évolution du trait de côte</li><li>- caractérisation de l'aléa submersion</li><li>- prise en compte des ouvrages</li></ul> <p>Les principes de doctrine d'élaboration des PPRL feront l'objet d'une circulaire. Celle-ci est actuellement en cours de consultation et disponible sur internet. Elle sera finalisée en juin 2011.</p> <p>Doctrine = guide méthodologique repris depuis janvier 2011 et prévu pour fin 2011. Egalement = de la stratégie nationale de gestion du TC (rapport du Député Cousin à venir).</p>
<p><b>2. Modélisation numérique des données de niveaux d'eau et de vagues pour la détermination de l'évènement de référence</b></p> <p>Objectif = préparer les données de niveaux d'eau et de vagues nécessaires pour l'analyse des probabilités conjointes pour la détermination de l'aléa de référence.</p> <p>Méthodologie présentée et mise en œuvre par le BRGM (cf.diaporama) :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>– Modélisation numérique des niveaux d'eau (marée + surcote atmosphérique) à partir de MARS (Ifremer) afin de combler la faible couverture spatiale sur la côte aquitaine → il existe seulement 2 marégraphes (Arcachon et Socca).</li><li>– Utilisation des conditions de houle au large sur la côte aquitaine issues du modèle couplée Wave Watch III - SWAN (thèse BRGM, E. Charles / jeux de données de 30 ans).</li></ul> <p>Pour l'analyse des probabilités conjointes, les données de vagues et de niveaux d'eau doivent provenir d'un même site → calcul des niveaux d'eau et extraction des conditions de houle au niveau de l'isobathe - 20 m ou - 50 m (à préciser après analyse des données).</p> <p>A noter : les facteurs de forçage correspondant à l'aléa de référence seront donc déterminés au large → la méthodologie pour la propagation de ces forçages à la côte fera l'objet d'une prochaine concertation pour chacun des secteurs étudiés.</p> <p><b>Validation des résultats à partir des données mesurées au niveau de bouées (Biscarrosse, Gascogne, CANDHIS) et de modèles (ERA40, NOA-WW3, ANEMOC) → permet d'estimer des incertitudes.</b></p> <p>Question CETE SO : limite de la validation liée au dysfonctionnement des marégraphes lors des événements extrêmes ? Lors d'événements extrêmes → = de 10-20 cm estimée entre mesures et réalité, même = avec la modélisation ⇒ mais pas de problème si bonne estimation des incertitudes.</p>

Possibilité de dissocier les incertitudes liées à la marée et aux effets atmosphériques.

Données de vagues issues de la thèse BRGM d'E.Charles : mise à disposition au public à définir → probable constitution d'une BDD → Pas de problème pour l'utilisation des données (par le BRGM) dans le cadre de ce projet.

CETMEF : la doctrine prévoit l'utilisation des niveaux d'eau extrêmes (marée + surcote atmosphérique) calculés par le SHOM et des conditions de houle, provenant d'ANEMOC par exemple, pour calculer le wave setup → la doctrine ne contre-indiquera pas l'approche du BRGM avec la génération de réanalyses de vagues et de niveaux d'eau présentant l'avantage d'offrir une très bonne couverture spatiale et temporelle.

Remarque : Il faut aussi calculer les incertitudes à la côte.

### 3. Probabilités conjointes pour la détermination de l'évènement de référence

Objectif = déterminer les différentes combinaisons de facteurs de forçage (hauteur significative des vagues Hs, et niveaux d'eau SWL = marée + surcote atmosphérique) de l'aléa centennal au large (isobathe -20 ou -50 m à préciser, cf. paragraphe 2)

Méthodologie présentée et mise en œuvre par le BRGM (cf.diaporama) : utilisation du logiciel JOIN-SEA (HR Wallingford et université de Lancaster).

Après ajustement des distributions marginales pour chacune des variables analysées (Hs d'une part et SWL d'autre part), le logiciel JOIN-SEA permet d'analyser les relations de dépendance entre les variables → détermination d'un modèle de dépendance = approche innovante en France.

CETMEF : la doctrine prévoit l'analyse des probabilités conjointes (par la méthode du DEFRA) pour déterminer l'aléa centennal. Dans cette approche simplifiée, la dépendance entre niveau d'eau et hauteur de vagues est prise en compte de façon très simplifiée (il n'y a pas de modèle de dépendance ajusté sur la base d'une analyse statistiques mais juste un coefficient reliant les deux variables, ce coefficient est estimé de façon peu rigoureuse) → la doctrine ne contre-indiquera pas la mise en œuvre de l'approche plus fine du BRGM pour ajuster les relations de dépendance entre les variables.

La doctrine prévoit : calcul des niveaux extrêmes (marée + surcote + wave setup (utilisation ANEMOC)) puis application de 20 cm d'incertitude. 2 cartes d'aléas à fournir :

- Aléa actuel ou « court terme » + 20 cm (élévation à 20 ans / ONERC)
- Aléa à 100 ans : idem + 1 m

JOIN-SEA permet de déterminer les différentes combinaisons de forçage (Hs,SWL) correspondant à un aléa centennal. Ces forçages seront propagés afin de calculer le setup (élévation locale du plan d'eau sous l'effet du déferlement des vagues) et éventuellement le runup (zone de battement des vagues à l'interface terre-mer) à la côte soit par une formule empirique de type Stockdon soit par modélisation numérique (MARS et SWAN pour le setup). La combinaison la plus défavorable, c'est-à-dire générant le niveau d'eau maximal, sera ainsi déterminée sur chacun des secteurs. Les effets locaux seront ainsi considérés.

Remarque : l'ajustement par JOIN-SEA de la loi marginale pour SWL a tendance à sous-estimer les niveaux d'eau centennaux (marée + surcote atm.) d'environ 10 cm (voir

diaporama). Au lieu d'ajuster une distribution statistique directement sur le signal marégraphique (marée + surcote atm.), il serait préférable (i) de séparer la partie déterministe du signal qui est liée à la marée seule et la partie aléatoire du signal qui est liée à la surcote de pleine mer (i.e. faire une analyse en composante harmonique), (ii) d'ajuster une distribution de probabilité sur les deux variables séparément (marée, surcote de pleine mer) et (iii) de convoluer les deux distributions pour estimer la distribution de SWL.

Depuis la réunion, nous avons développé un outil permettant de réaliser les étapes précitées. Les valeurs de SWL centennales ne sont plus sous-estimées à présent.

**4. Prochaines étapes, calendrier prévisionnel**

1. Juillet 2011 : détermination de l'évènement de référence par secteur = combinaison Hs, SWL défavorable, c'est-à-dire générant un niveau total (marée + surcote + setup (+ runup)) maximal.
2. Août 2011 : détermination d'une méthodologie de propagation des facteurs de forçage correspondant à l'évènement de référence pour calculer le niveau total à la côte : formules empiriques de type Stockdon ou bien modélisation numérique (MARS et SWAN).
3. Septembre : détermination d'une méthodologie de propagation de la submersion à terre : statique = croisement des niveaux d'eau simulés avec la topographie ou bien dynamique = modélisation numérique (vitesses de courant).

→ échanges du comité scientifique à prévoir (mail, téléphone, éventuelle réunion)

Action	Responsable	Délai	Soldé
Rédaction d'un rapport présentant la méthodologie proposée pour déterminer l'aléa centennal et l'évènement de référence par secteur	BRGM	Août 2011	

**Annexe 2**  
**Compte rendu de la 2<sup>ème</sup> réunion du comité**  
**scientifique 20/09/2012**



Réf. :

Pessac, le 20/09/2012

<b>COMPTE RENDU DE RÉUNION</b>	
Rédacteur : Mugica J.	Entité : BRGM, DIR Aquitaine
Diffusion externe : oui Visa et nom du responsable : Lenotre N.	
Projet : AQUISUB 33, AQUISUB-40 et AQUISUB-64	Numéro : PSP11AQI24/25/26
Objet : Réunion intermédiaire du Comité Scientifique	
Date : 20/09/2012	Lieu : <b>BRGM Pessac</b>
Participants : BRGM - DR AQI : C. Mallet, J. Mugica BRGM R3C : R. Pedreros, F. Paris CETMEF : C. Perhrerin CETE SO : D. Felts, G. Arnaud, CASAGEC : D. Rihouey, J. Dugor	
Absents : SOGREAH : V. Mazeiraud, D. Lartigue, CETE SO : Y. Nedelec, EPOC : P. Bonneton	
Diffusion : Participants + absents + DREAL Aquitaine + DDTMs 33, 40 et 64	

<b>RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS</b>
<p><b><u>Rappel du contexte</u></b></p> <p>Le BRGM a été sollicité par les DDTM de la Gironde, des Landes et des Pyrénées Atlantiques en association avec la DREAL Aquitaine pour caractériser l'aléa submersion marine sur les secteurs soumis à un PPRL :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Convention cadre DREAL/BRGM en date du : 19/11/2011</li> <li>• Convention d'application DDTM Gironde/BRGM en date du : 14/11/2011</li> <li>• Convention d'application DDTM Landes/BRGM en date du : 29/03/2012</li> <li>• Convention d'application DDTM Pyrénées Atlantiques/BRGM en date du : 05/04/2012</li> </ul> <p>Les principales étapes de cette étude sont les suivantes :</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Préparation des données (météorologiques, océanographiques, bathymétriques et topographiques) → utilisation de mesures de terrain + utilisation ou génération de simulations rétrospectives (vagues, vent, niveaux d'eau)</li> <li>2. Etudes historiques des événements de submersion marine (CETE SO pour la Gironde, C. Lavigne archéogéographe pour les Landes, CASAGEC pour les Pyrénées Atlantiques)</li> <li>3. Détermination de l'évènement de référence → analyses statistiques pour la détermination d'évènements centennaux au large + modélisation numérique pour propagation vers le rivage</li> <li>4. Cartographie de l'aléa submersion → modélisation numérique dans les Landes et les Pyrénées Atlantiques, calcul des volumes d'eau pénétrant à terre + croisement avec la topo (lidar 2005) en Gironde.</li> <li>5. Analyse à dire d'expert (visite de terrain notamment)</li> </ol>

## 6. Restitution (réunion, rapport)

La plupart de ces étapes sont réalisées par le BRGM mais sur certains secteurs, certaines étapes sont réalisées par un sous-traitant (CASAGEC, C. Lavigne archéogéographe) ou par un service de l'Etat partenaire (CETE SO).

Afin de réunir les compétences régionales, de réaliser l'étude dans l'état actuel des connaissances et des recommandations méthodologiques du ministère, le BRGM a constitué un comité scientifique composé du BRGM, CASAGEC, CETE SO, CETMEF, Laboratoire EPOC de l'Université Bordeaux 1 et SOGREAH.

### Introduction :

Réunion intermédiaire du Comité Scientifique de l'étude PPRL submersion marine en Aquitaine organisée à l'initiative du BRGM. (cf. *diaporama BRGM intro*)

### Objectifs :

- Présentation et discussion des résultats des analyses statistiques pour déterminer les événements centennaux → résultats BRGM pour l'ensemble de la région Aquitaine (cf. *diaporamas BRGM étapes 1 et 3*)
  - Présentation et discussion des événements de référence au rivage :
    - o Résultats BRGM pour la Gironde et les Landes (cf. *diaporamas BRGM étapes 3 et 4*)
    - o Résultats CASAGEC pour les Pyrénées Atlantiques (cf. *diaporama CASAGEC*)
  - Proposition et discussion d'une méthodologie de propagation à terre et de cartographie de l'aléa pour chacun des secteurs (discussion notamment des points suivants : incertitudes, changement climatique, ouvrages) (cf. *diaporama BRGM étape 5 et diaporama CASAGEC*)
- ☞ En préalable, il est décidé la rédaction d'une note par le comité scientifique pour valider les résultats du BRGM et de CASAGEC sur la base des rapports d'étude, des diaporamas présentés en réunions et des discussions → Le CETMEF se charge de rédiger le premier jet de la note avant diffusion pour avis et validation au comité scientifique

### Remarques :

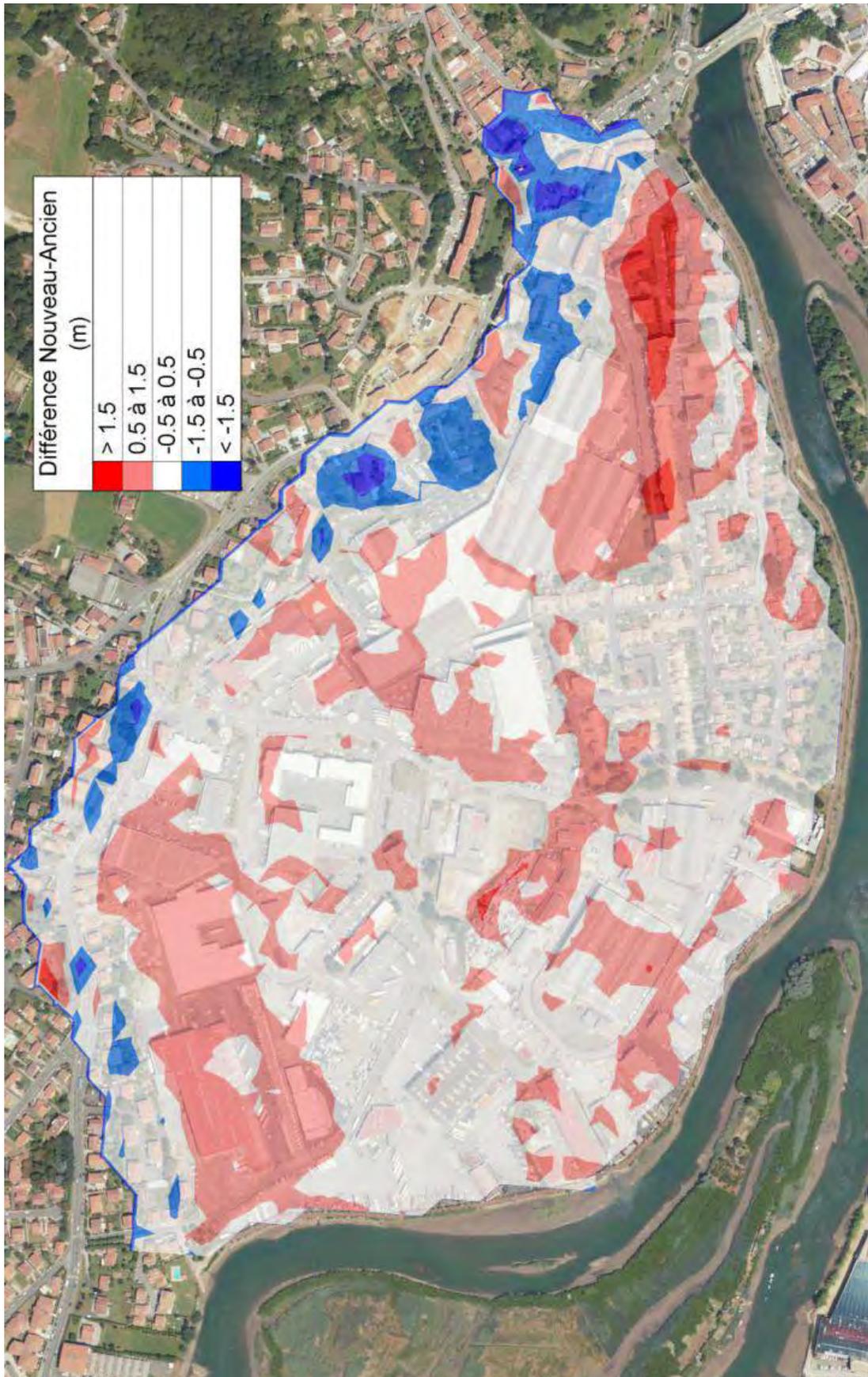
- Volonté des membres du comité scientifique d'être sollicité plus en amont par rapport aux livrables et plus fréquemment.
- Pas de mandat de la DREAL pour une participation du CETE SO et du CETMEF à ce comité scientifique → CETE SO et CETMEF doivent vérifier s'ils ont besoin d'être missionnés.

### Questions techniques sur les diaporamas

- Pourquoi génération de simulations rétrospectives de niveaux d'eau uniquement à partir de 1979 et non à partir de 1958 comme les données de vagues (BD BoBWA) ?
- Utilisation des données météo CFSR uniquement disponibles à partir de 1979 et de meilleure qualité que les vents ERA40 utilisées pour la génération de la BD BoBWA (thèse E. Charles, 2012)
- Pourquoi relation de dépendance entre Hs (hauteur significative des vagues) et SWL (niveaux d'eau comprenant marée + surcote atmosphérique) ?
- Hypothèse de dépendance car la surcote atmosphérique et Hs proviennent d'un même événement de tempête

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour les analyses statistiques, cela revient au même d'analyser la dépendance entre Hs et SWL ou Hs et la surcote atmosphérique (car marée = part déterministe de SWL) .</li> <li>- Calcul Incertitude dans les Landes</li> </ul> <p>Il existe une incertitude liée à la pente → différence qui peut atteindre 30 à 40 cm sur les niveaux marins si variation de 2% de la pente. Quelle pente retenir ? la pente la plus préjudiciable pour le niveau marin au rivage a été retenue.</p>
<p><b><u>Analyses et compléments recommandés :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vérifier l'existence de seiches sur le Bassin d'Arcachon</li> </ul> <p>Remarque : les directions de vents testées proviennent de l'analyse des relations de dépendance entre les vents et les vagues et de l'analyse de la fréquence de ces directions sur le Bassin d'Arcachon.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Présentation des résultats de CASAGEC :             <ul style="list-style-type: none"> <li>o mettre échelle sur les figures et légendes, signaler les ouvrages (digue Arta par exemple) et valeurs de setup</li> <li>o ajouter marge de 20 cm à SWL (première prise en compte de l'élévation du niveau marin) avant propagation vers le rivage</li> </ul> </li> <li>- Extraire et fournir combinaisons centennales à CASAGEC pour le secteur du Bourret Boudigau pour comparaison méthode Stockdon (BRGM) / méthode SWAN (CASAGEC).</li> <li>- Considérer le niveau marin total fourni dans la version 11 (nov. 2011) du rapport du MEDDTL « 1<sup>er</sup> éléments méthodologiques pour l'élaboration ni les tableaux des combinaisons centennales (Hs, Zo, setup, etc.) comme exemple → pas de comparaison entre méthode simplifiée et complète à réaliser.</li> </ul> <p>Etat de l'art sur les méthodes d'analyse des concomitances du CETMEF à paraître.</p>
<p><b><u>Recommandations méthodologiques d'après le rapport du MEDDTL « 1<sup>er</sup> éléments méthodologique pour l'élaboration des PPRL » → confirmation CETMEF sur ces points :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Si estimation de l'incertitude liée à l'ensemble des étapes de la méthode, ajout de cette incertitude au niveau marin total au rivage plutôt que la marge de sécurité de 25 cm recommandée             <ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ accord pour ajout de l'incertitude estimée à 15 cm sur le Bassin d'Arcachon (cf. diaporama BRGM)</li> </ul> </li> <li>- Les marges de 20 cm et de 40 cm pour la prise en compte de l'élévation du niveau marin liée au changement climatique pour l'aléa actuel et l'aléa à 2100 respectivement, sont à ajouter au large.</li> <li>- Prise en compte uniquement des ouvrages de protection contre la submersion marine (digues). Autres ouvrages de fixation du trait de côte arasés (épis par exemple) ou intégrés (perrés, ouvrages portuaires et structurant par exemple) à la topographie, pas de scénario de défaillance pour ces ouvrages ni d'estimation de la surface érodée en cas de défaillance → cas des Landes et des Pyrénées Atlantiques évoqués.</li> </ul>

**Annexe 3**  
**Cartes des différences topographiques entre l'ancien**  
**(1<sup>ère</sup> version de l'étude 2012) et le nouveau**  
**(complément d'étude 2016) MNT**



## **Annexe 4**

# **Liste des évènements historiques de submersion marine et de leurs conséquences sur la commune d'Hendaye**

Date	Id phénomène	Secteurs touchés		Réf	Type	Hauteur d'eau (m NGF)	Hauteur des vagues (m)	Précipitation	Dégâts notables / précisions
		Hendaye - Plage	Hendaye Joncaux						
23 au 27/02/1925	HP1			5	Tempête				Quelques blocs arrachés par les vagues au niveau du boulevard de la mer
nov-31	HP2			5	tempête				A l'Ouest, au niveau de la pointe de Sokoburu, le parapet a été enlevé sur plusieurs mètres, et des crevasses se sont formées derrière le mur
16/06/1933	SJ13			4	tempête				une tempête a inondé une partie de la ville et a causé de nombreux dégâts
01/09/1942	HP3			2	tempête				Tempête de septembre. Dégâts très importants sur le boulevard de la mer. Perré partiellement détruit, une partie de la route est emportée
28 et 29 /12/1951	HP4			2,3,4,5,6	tempête	2.88	periode 18.5s		A Hendaye : Perré du Boulevard de la mer endommagé
17 au 21/01/1965	ClB03			3,5	tempête	2.7			Une forte tempête ouvre une brèche de 5m sur la jetée de Ciboure. Dégâts causés à la voie urbaine de la baie de Txingudi
14 au 18/10/1974	HP5			2,5	tempête	2.59			Dégâts importants à l'épi de Sokoburu (partie s'étendant vers l'intérieur de l'estuaire). Dans la baie de Txingudi, le talus protégeant la voie urbaine a été submergé et détruit, nécessitant une reconstruction complète
11/01/1978	HP6			5	tempête	2.69			Dégâts graves sur le chantier de prolongement de l'épi de Sokoburu
1 9 8 2	HP7			5	tempête	2.49			Désordres importants à l'épi de Sokoburu. Musoir endommagé
25 au 29/12/1999	HP8			2,8	tempête Martin	2.53			Arrêté de reconnaissance de catastrophe naturelle à Hendaye « Inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues
24 au 27/01/2009	HP9			8	Tempête Klaus	2.35	13.7		Inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues
11 et 12/02/2009	HP10				Inondation	coef.106	8.5	124mm	Inondation de plusieurs terrains
8 et 9/11/2010	HP11			8,10	Tempête				Dégâts sur le boulevard de la mer. Arrachement et destruction du perré en trois endroits, respectivement sur 15, 40 et 88 mètres. Poste de secours de la plage déchaussé et endommagé par les flots

**Annexe 5**  
**Compte rendu de la réunion du 11/12/2012 pour la**  
**détermination des hypothèses de défaillance des**  
**ouvrages côtiers**

## REUNION PPRL-SUBMERSION MARINE DU 11/12/2012

**OBJET : CONSULTATION DES SERVICES QUANT A LA PRISE EN COMPTE DES OUVRAGES DE PROTECTION.**

### Personnes présentes :

- CG 64 : B.Gourgand, C. Sarrade, A. Roudil
- DDTM 64 : B.Pallas
- DDEA 64 / SGPEPC : J.Vaudel
- Ville d'Hendaye : B.Laville
- Ville d'Urrugne : C. Courriol
- Ville de Ciboure : JB.Boye
- Ville de Saint-Jean-de-Luz : V.Toral, M.Sallaberry
- CASAGEC Ingénierie : D.Rihouey, J.Dugor, B.Cavalier

### Rappel du contexte de l'étude et des grandes étapes techniques (Jacques Vaudel)

Les PPRL-SM ont été lancés après la tempête Xynthia de 2010, qui a entraîné un épisode de submersion marine sans précédent en Vendée.

L'étude se divise en deux étapes fondamentales :

- La détermination d'un niveau d'eau de référence au large (BRGM), issu d'études statistiques sur les variables de vent et de houle. 14 triplets (Niveau d'eau statique SWL, Hauteur significative de la Houle Hs, et Période de pic de la houle Tp) sont ainsi retenus pour une occurrence centennale.
- La propagation des paramètres du large à la côte, et le croisement des niveaux obtenus avec la topographie des sites pour obtenir la cartographie de l'aléa (CASAGEC).

### Présentation de l'état d'avancement des études (CASAGEC Ingénierie)

(Cf. Présentation)

*La prise en compte ou non de la « surcote » dans le niveau « au large » a été évoquée.*

Oui, ce niveau prend en compte la surcote atmosphérique. Par ailleurs, la méthode des probabilités conjointes, plus précise, permet l'étude en détail des paramètres en jeu, qui peuvent être plus ou moins corrélés.

### Scénarios de ruine et brèches retenus sur les ouvrages

Les scénarios de brèches sont déterminés en accord avec les documents de référence :

- La circulaire du 27 Juillet 2011 (DEVP1119962C).
- Rapport de Novembre 2011 V11 du MEDDTL « Premiers éléments méthodologiques pour l'élaboration des PPRL ».

Pour toutes les simulations, les parapets seront effacés (petits murets surplombant perrés et digues).

*La question de l'intérêt de l'étude menée ici vis-à-vis des études de danger réalisées et à venir a été soulevée.*

Il faut différencier ces deux travaux qui n'ont pas les mêmes objectifs. L'étude de danger vise à évaluer l'efficacité et l'état de l'ouvrage, les points de fragilité nécessitant un entretien, ainsi que sa durabilité. Il s'agit d'une étude très détaillée, dont la précision et l'exhaustivité ne sont pas requises pour le PPRL-SM. Ce dernier s'appuie néanmoins sur une partie de l'étude de danger lorsque celle-ci existe, dans le choix et la localisation des brèches ou ruines à prendre en compte dans les simulations.

Un tour de table a été réalisé pour valider par toutes les personnes présentes, les scénarios de brèches ou de ruine généralisée des ouvrages. Les scénarios retenus sont les suivants :

#### *Secteur d'Hendaye*

- Tronçon N°4 : Brèche de 100m
- Tronçon N°6 : Brèche de 50m, 50m à l'Ouest du casino.
- Tronçons N°20 à 22 : Ruine (effacement du léger talus formé par la promenade)

#### *Secteur de Saint-Jean-de-Luz*

- Tronçon N°1 (digue de l'Artha): 2 brèches (musoir Ouest et milieu de la digue), et scénario supplémentaire de ruine de la partie maçonnée uniquement
- Tronçon N°2 (digue de Socoa): Brèche de 100m sur le musoir
- Tronçon N°4 : Brèche de 50m
- Tronçons N°19 et 20 : Pas de brèche, mais simulation de volumes franchissant
- Tronçon N°21 : Brèche de 50m
- Tronçon N°38 : Brèche de 50m côté Sud-Ouest à hauteur de la brèche de 1951
- Tronçon N°39 : Pas de brèche, mais simulation de volumes franchissant
- Tronçon N°42 : Brèche de 50m au niveau de l'avenue Pellot
- Tronçon N°43 (digue Sainte Barbe): Ruine de l'ouvrage (partie maçonnée)

#### *Secteur d'Erromardie*

- Tronçon N°46 : Ruine de l'ouvrage
- Tronçon N°49 : Ruine de l'ouvrage

Les différents scénarios de brèches définis ci-dessus ont été définis grâce :

- Aux éléments historiques connus,
- A l'aspect visuel des différents ouvrages,
- A l'étude de danger existante sur la commune de Saint-Jean-de-Luz.

#### **Calendrier prévisionnel**

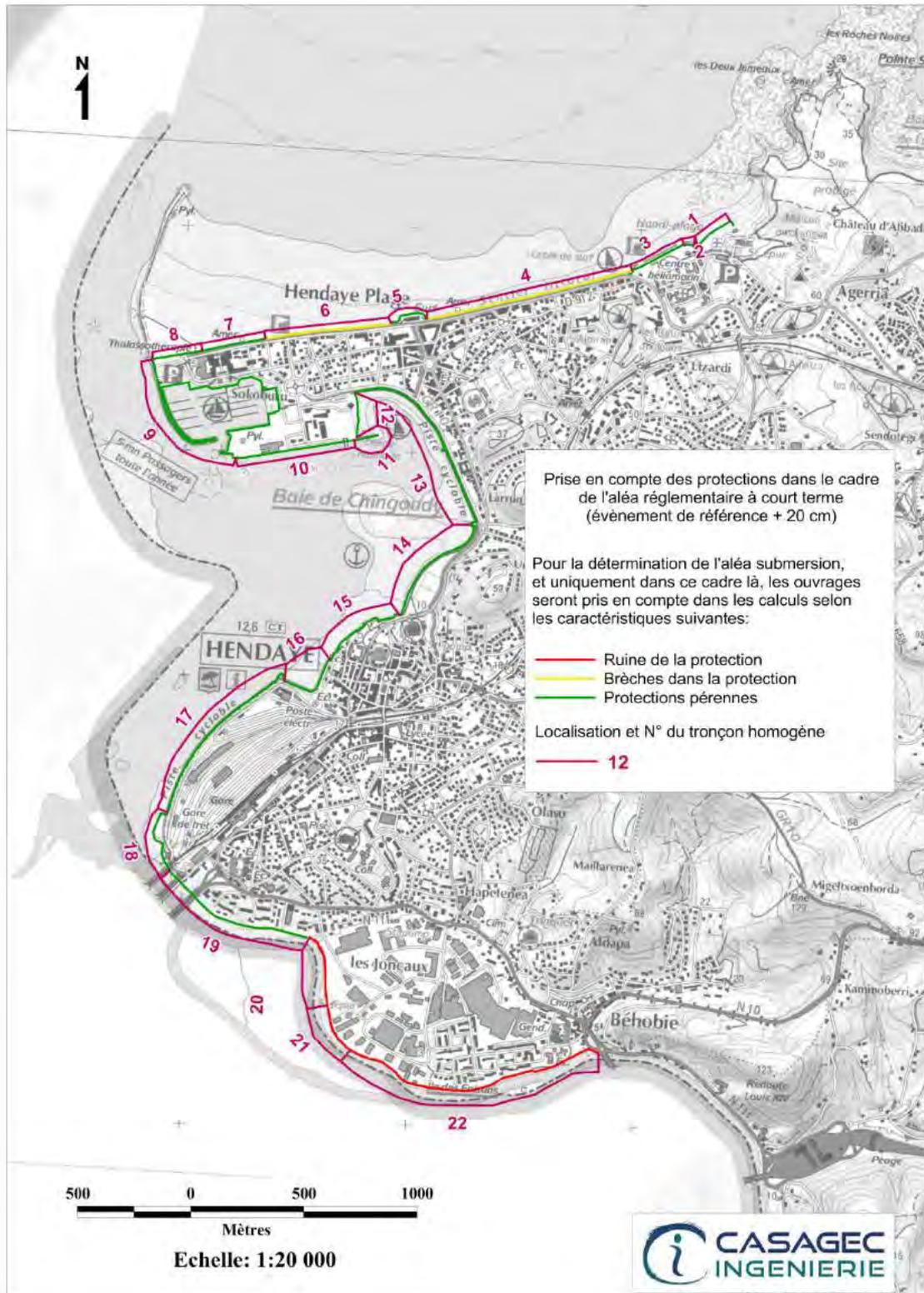
---

- Février 2013 (semaine 9) : première version des cartes d'aléa après visite de terrain avec le BRGM.
- Courant mars 2013 (semaine 11) : réunion similaire avec les services techniques locaux, présentation des cartes.

*Cf. Annexe 6 pour la localisation des tronçons*

## **Annexe 6**

# **Recensement et nature des ouvrages côtiers de la commune d'Hendaye**



## **Annexe 7**

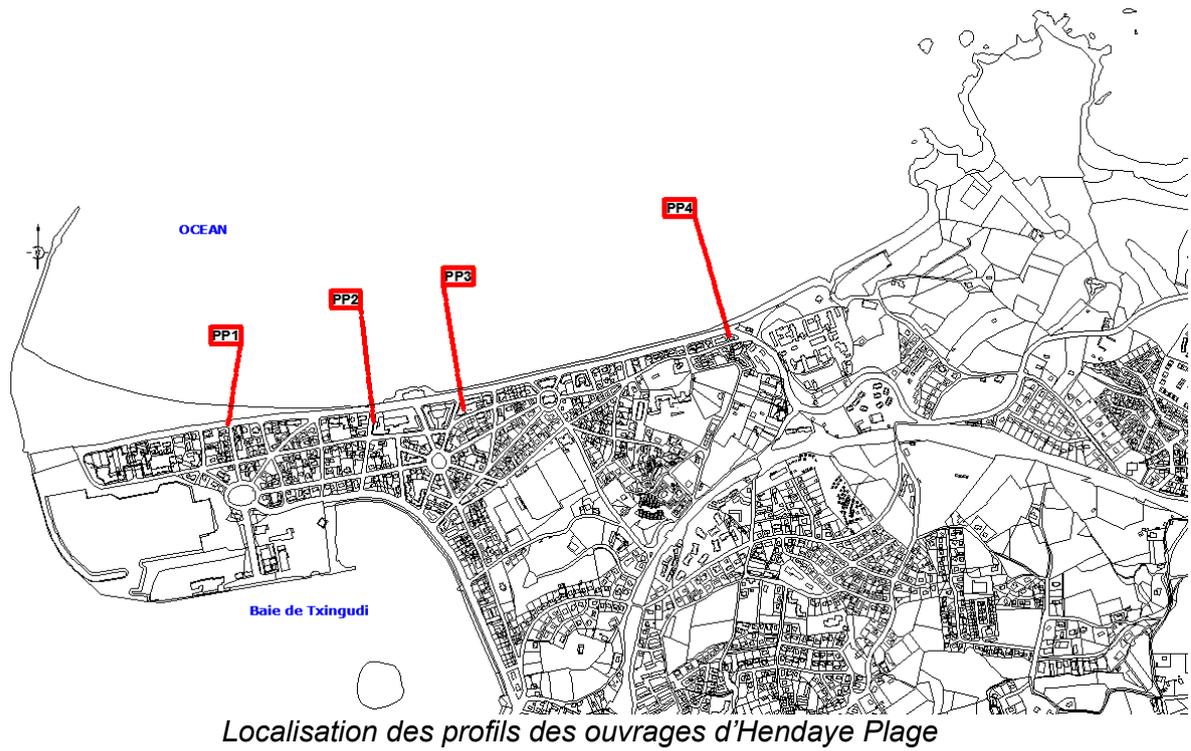
# **Caractéristiques détaillées des ouvrages côtiers de la commune d'Hendaye**

Secteur d'Hendaye															
Num secteur	Id tronçon	Nom	Type terrain arrière	nature défense	type défense	parapet	longueur	Cote anse (MGF)	Etat classif	Niveau marin statique	Niveau marin statique + 20cm	Niveau marin statique + 60cm	Z ouvrage retenu	Franchis-sabilité evt de ref. +20 cm	Etat retenu evt de ref. +20 cm
1	HDYPL01	Station d'Épuration	Dé nivelé	Ouvrage longitudinal	Maçonné	sans	268	NA	Moyen	3,07	3,27	3,67	NA	NA	/
2	HDYPL02	Centre Heliomarin	Dé nivelé	Ouvrage longitudinal	Maçonné	sans	64	NA	Moyen	3,07	3,27	3,67	NA	NA	/
3	HDYPL03	Débouché Ruisseau	Dé nivelé	Ouvrage longitudinal	Maçonné	sans	292	NA	Moyen	3,07	3,27	3,67	NA	NA	/
4	HDYPL04	Hendaye Plage Est	Même niveau	Ouvrage longitudinal	Maçonné + enrochement	avec	933	5,4	Moyen	3,07	3,27	3,67	5,4	-2,13	Breche 100m en face de l'office de tourisme + érosion
5	HDYPL05	Casino	Même niveau	Ouvrage longitudinal	enrochement	avec	190	6,63	Moyen	3,07	3,27	3,67	6,63	-3,36	/
6	HDYPL05	Hendaye Plage Ouest	Même niveau	Ouvrage longitudinal	Maçonné + route	avec	564	5,3	Moyen	3,07	3,27	3,67	5,3	-2,03	érosion
7	HDYPL05	Sokoburu Plage	Même niveau	Ouvrage longitudinal	Parapet	avec	286	4,73	Moyen	3,07	3,27	3,67	4,73	-1,46	/
8	HDYPL05	Dune	Même niveau	Naturel	Cordon dunaire	avec	220	3,61	\	3,07	3,27	3,67	3,61	-0,34	/
9	HDYPORT01	Digue du port	Même niveau	longitudinal lépis	enrochement	sans	2148	3,43	ant	3,07	3,27	3,67	3,43	-0,16	/
10	HDYPORT02	Quai Floride	Même niveau	Ouvrage longitudinal	Maçonné	sans	516	3,13	ant	3,07	3,27	3,67	3,13	0,14	/
11	HDYBAE01	Epi plage Txingudi	Même niveau	Epi	Enrochement	sans	107	3,53	Moyen	3,07	3,27	3,67	3,53	-0,26	/
12	HDYBAE02	Plage Txingudi	Même niveau	Naturel	Cordon dunaire	sans	197	3,33	Moyen	3,07	3,27	3,67	3,33	-0,06	/
13	HDYBAE01	Pere txingudi Est	Même niveau	Ouvrage longitudinal	Maçonné	avec	957	3,53	Moyen	3,07	3,27	3,67	3,53	-0,26	/
14	HDYBAE02	Promenade Ile aux oiseaux	Même niveau	Ouvrage longitudinal	Enrochement	sans	546	3,48	Moyen	3,07	3,27	3,67	3,48	-0,21	/
15	HDYBAE03		Surélevé	Ouvrage longitudinal	Maçonné	sans	418	>5	Moyen	3,07	3,27	3,67	>5	NA	/
16	HDYBAE04	Port Txingudi	Dé nivelé	Ouvrage longitudinal	Maçonné	avec	316	NA	Moyen	3,07	3,27	3,67	NA	NA	/
17	HDYBAE05	Remblais SNCF	Même niveau	Ouvrage longitudinal	Enrochement	sans	865	NA	Moyen	3,07	3,27	3,67	NA	NA	/
18	HDYBAE06	Remblais SNCF_Sud	Même niveau	Ouvrage longitudinal	Enrochement	sans	322	NA	Moyen	3,07	3,27	3,67	NA	NA	/
19	HDYBAE07		Surélevé	Ouvrage longitudinal	Enrochement	sans	705	>5	Moyen	3,07	3,27	3,67	>5	NA	/
20	HDYJON01	Promenade Joncaux_Nord	Même niveau	Ouvrage longitudinal	Enrochement	sans	328	3,03	Moyen	3,07	3,27	3,67	3,03	0,24	Ruine
21	HDYJON02	Promenade Joncaux_Ouest	Plus bas	Ouvrage longitudinal	Enrochement	sans	233	3,04	Moyen	3,07	3,27	3,67	2,65	0,62	Ruine
22	HDYJON03	Promenade Joncaux_Sud	Même niveau	Ouvrage longitudinal	Enrochement	sans	1180	2,91	Moyen	3,07	3,27	3,67	3,07	0,2	Ruine

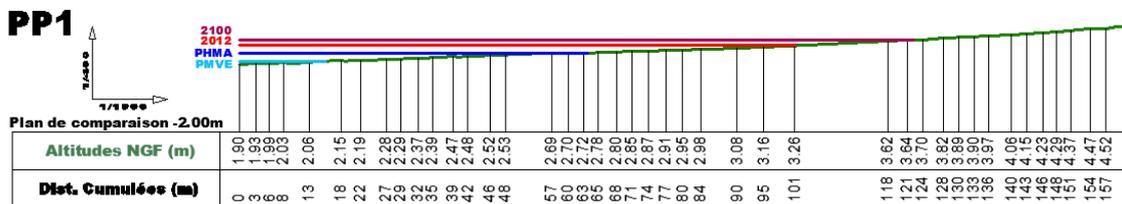
	Protection Pérenne
	Brèches dans la protection
	Ruine généralisée de la protection

# **Annexe 8**

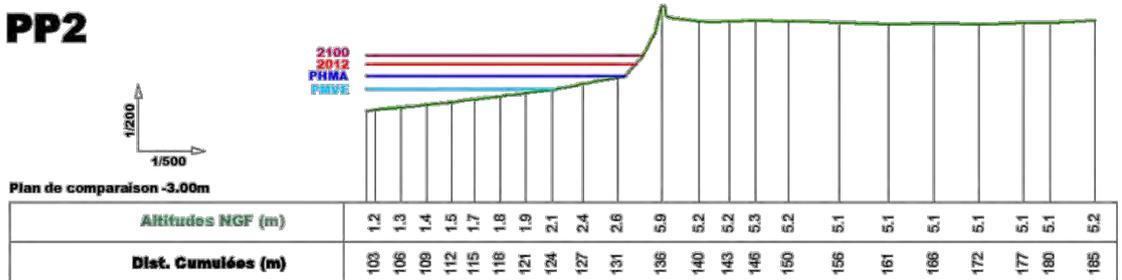
## **Géométrie des ouvrages de protection côtière du front de mer d'Hendaye**



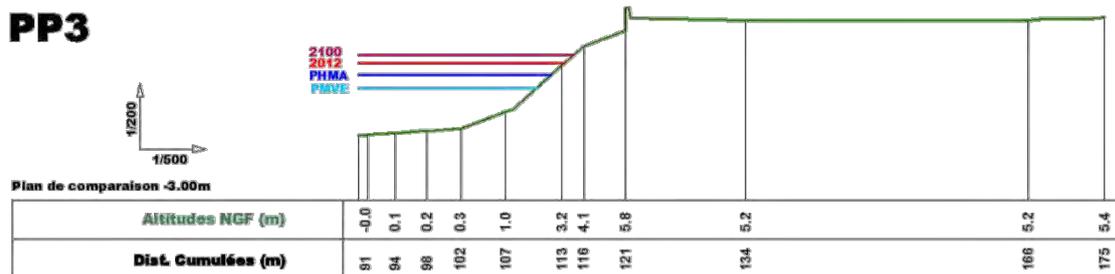
**Profil PP1 : Au droit du local des sauveteurs « La Baleine »**



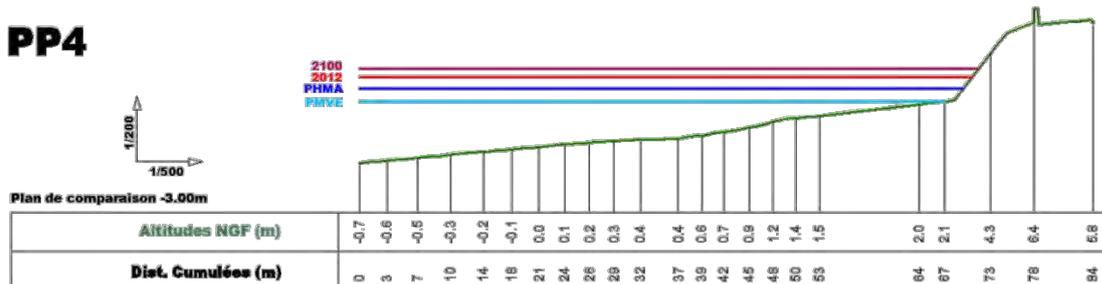
**Profil PP2 : à l'Ouest du Casino**



**Profil PP3 : à l'Est du Casino**



**Profil PP4 : à l'extrémité Est de la route côtière (juste avant le centre Hélio Marin)**

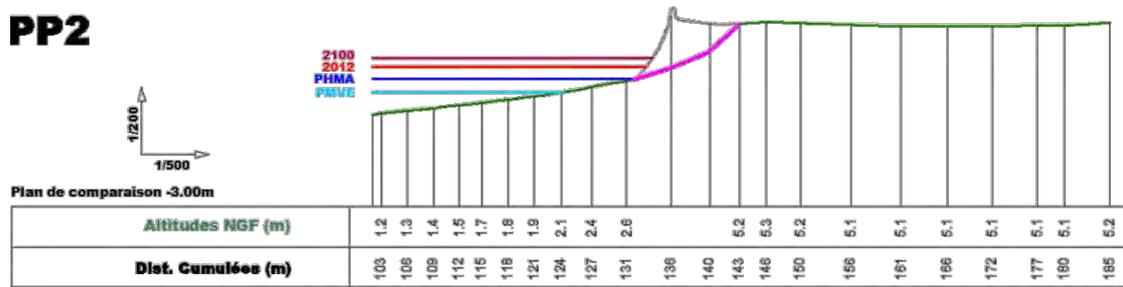


- PMVE : Pleine mer de vive eau
- PHMA : Plus haute marée astronomique
- 2012 : Niveau d'eau total calculé à la côte pour l'aléa actuel (3,27 m NGF)
- 2100 : Niveau d'eau total calculé à la côte pour l'aléa 2100 (3,68 m NGF)

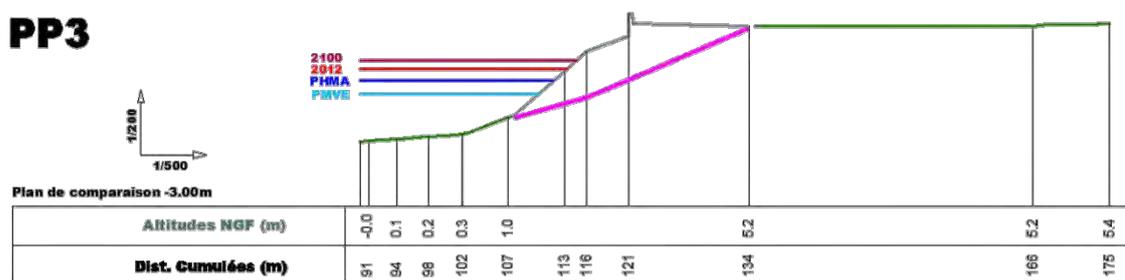
## **Annexe 9**

# **Scénario avec défaillance des ouvrages côtiers – géométrie de la brèche**

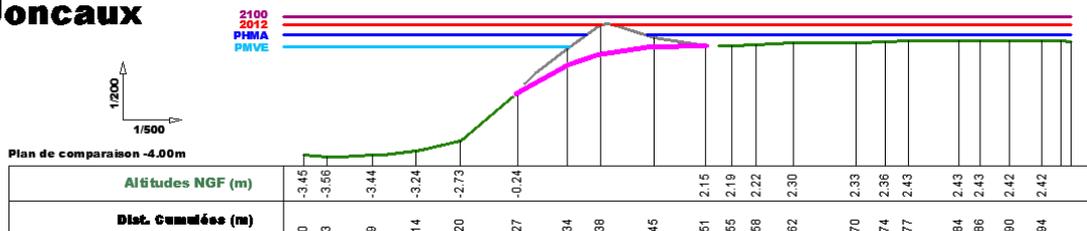
## PP2



## PP3



## Joncaux



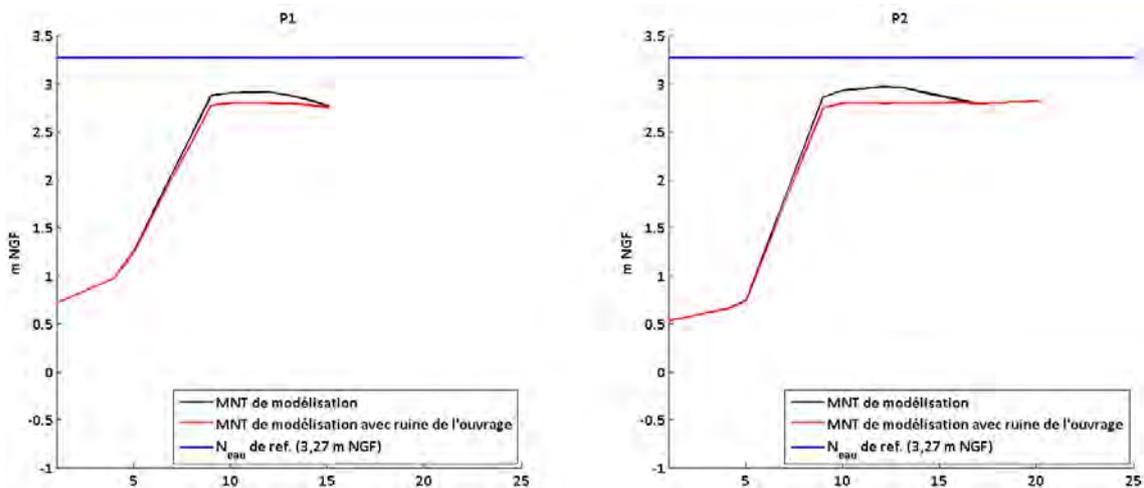
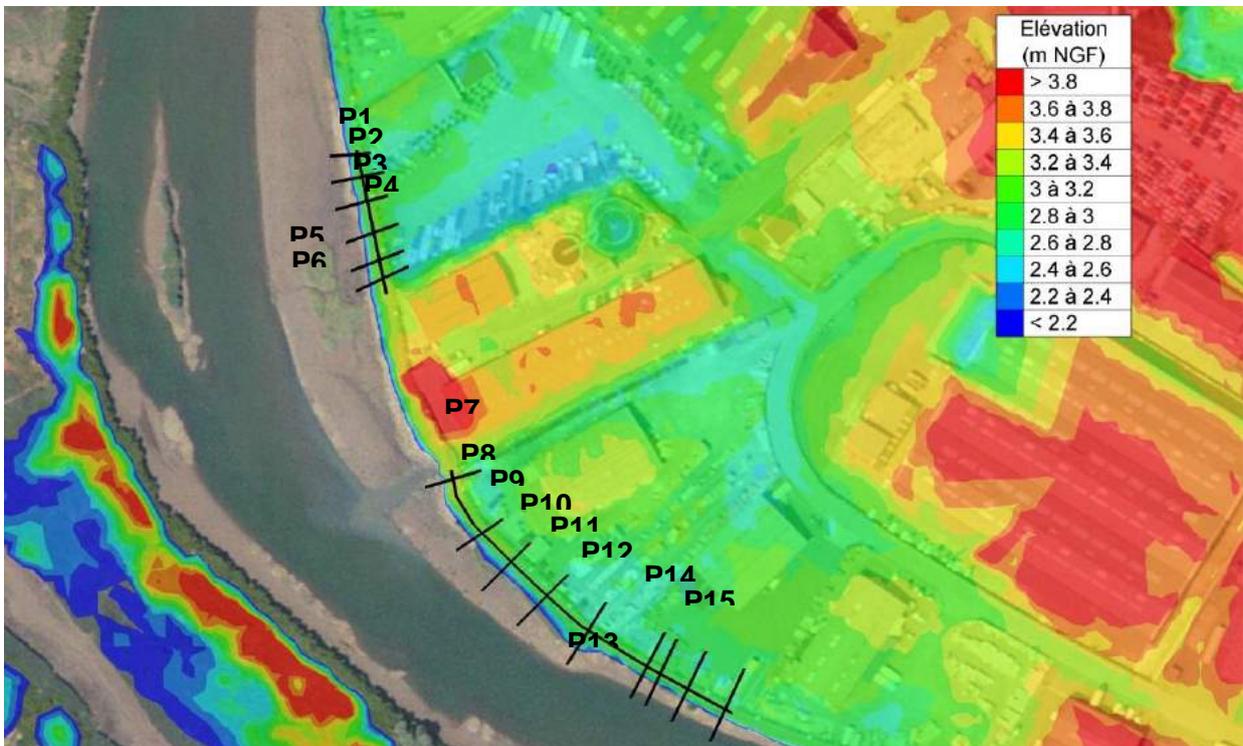
- PMVE : Pleine mer de vive eau
- PHMA : Plus haute marée astronomique
- 2012 : Niveau d'eau total calculé à la côte pour l'aléa actuel (3,27 m NGF)
- 2100 : Niveau d'eau total calculé à la côte pour l'aléa 2100 (3,68 m NGF)

*Cf. Annexe 7 pour la localisation des profils.*

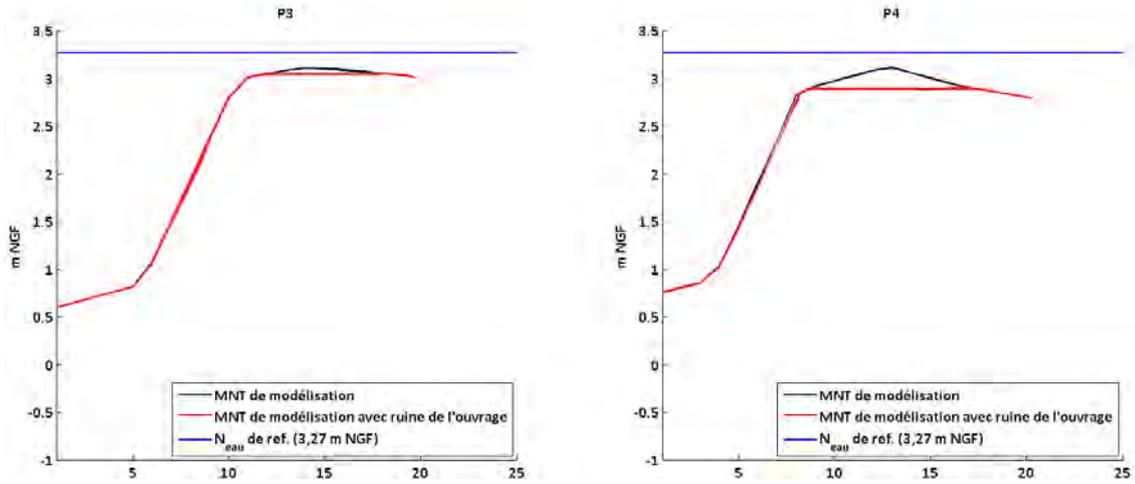
## **Annexe 10**

# **Scénario avec défaillance de la promenade des Joncaux – géométrie de la ruine**

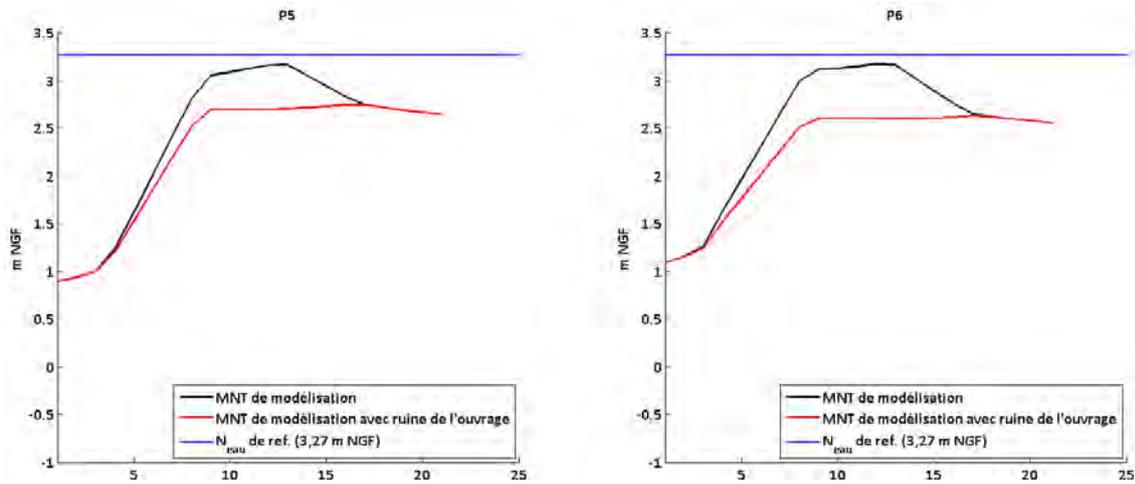
La figure ci-dessous localise les tronçons de la promenade considérés comme digue car le sommet est surélevé par rapport au terrain naturel situé en arrière. Les profils topographiques sont également localisés afin d'illustrer la morphologie de la promenade avec et sans ruine.



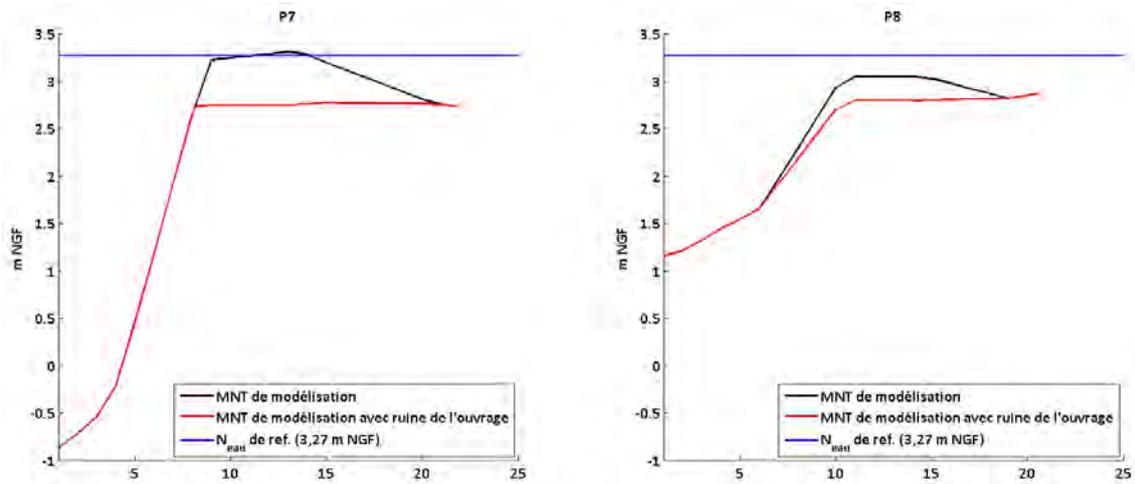
Comparaison des MNT avec et sans ruine pour les profils P1 et P2



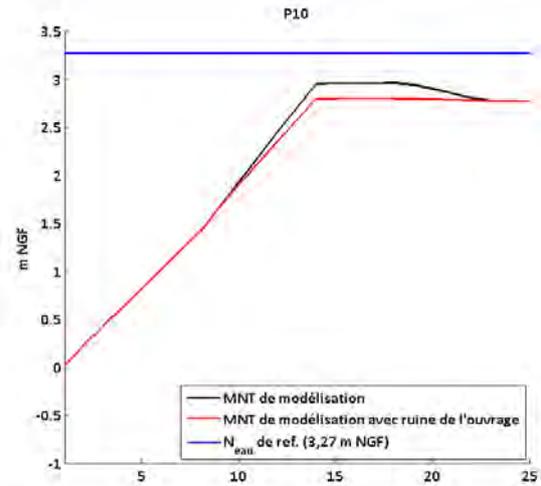
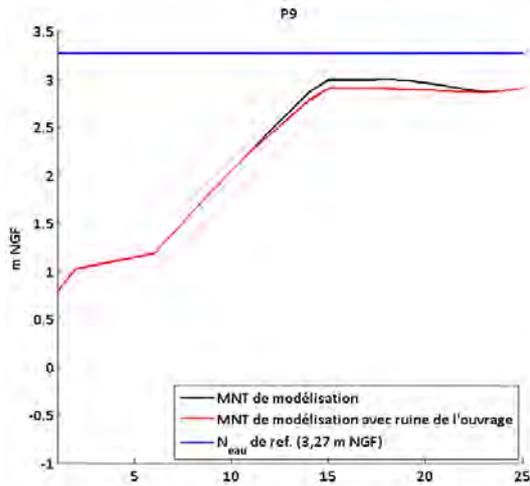
Comparaison des MNT avec et sans ruine pour les profils P3 et P4



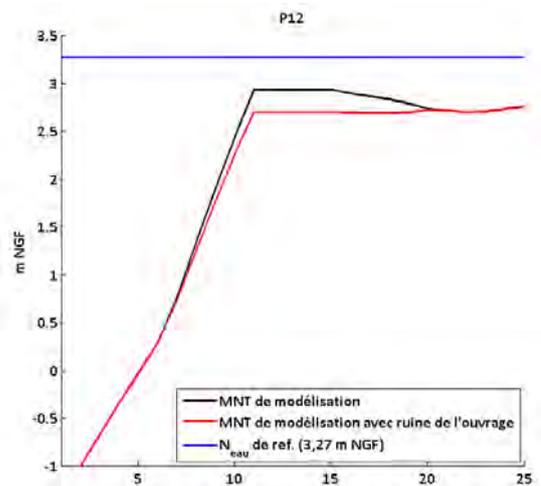
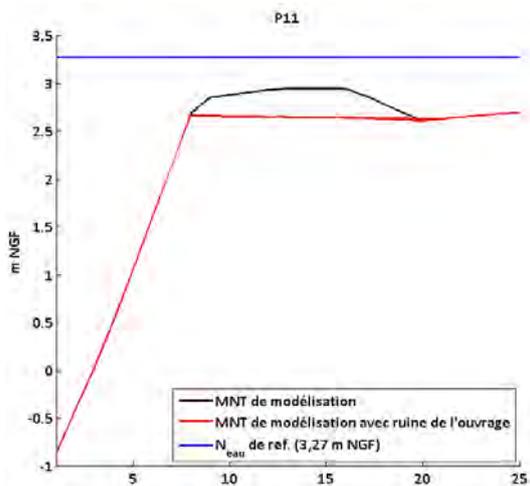
Comparaison des MNT avec et sans ruine pour les profils P5 et P6



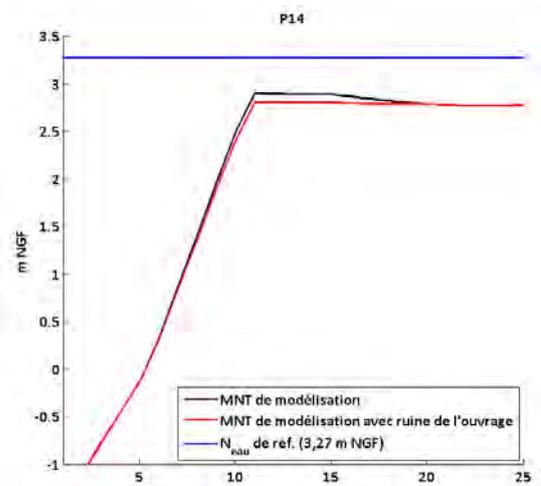
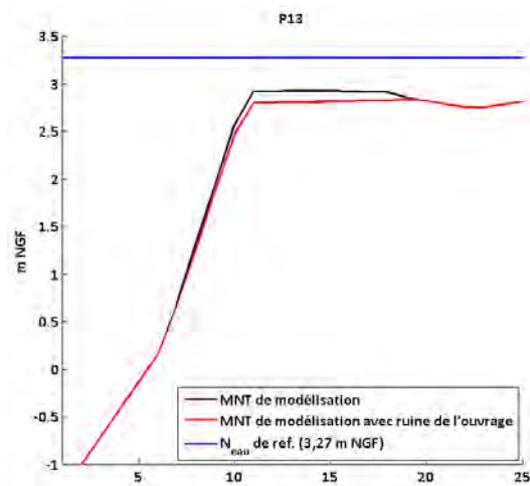
Comparaison des MNT avec et sans ruine pour les profils P7 et P8



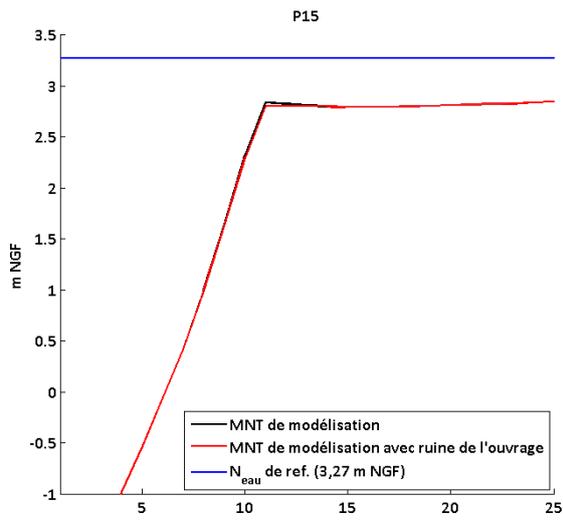
Comparaison des MNT avec et sans ruine pour les profils P9 et P10



Comparaison des MNT avec et sans ruine pour les profils P11 et P12



Comparaison des MNT avec et sans ruine pour les profils P13 et P14



Comparaison des MNT avec et sans ruine pour le profil P15

## **Annexe 11**

# **Tableaux des hauteurs significative des vagues et des surcotes liées aux vagues pour l'aléa « actuel »**

**Hauteurs significatives des vagues (m) – Aléa actuel**

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
C 1	1.17	2.98	3.32	3.84	4.29	4.29	4.54
C 2	1.22	3.01	3.40	3.95	4.40	4.40	4.69
C 3	1.24	3.00	3.42	4.01	4.45	4.45	4.78
C 4	1.22	2.95	3.37	3.97	4.39	4.39	4.76
C 5	1.20	2.87	3.29	3.86	4.27	4.28	4.67
C 6	1.16	2.78	3.17	3.71	4.09	4.11	4.52
C 7	1.10	2.67	3.00	3.51	3.86	3.87	4.29
C 8	1.03	2.50	2.80	3.27	3.60	3.61	4.00
C 9	0.96	2.34	2.60	3.00	3.30	3.30	3.66
C 10	0.86	2.14	2.33	2.68	2.95	2.95	3.26
C 11	0.75	1.89	2.06	2.36	2.60	2.60	2.86
C 12	0.64	1.65	1.76	2.01	2.22	2.21	2.43
C 13	0.51	1.34	1.42	1.63	1.80	1.80	1.97
C 14	0.24	0.66	0.71	0.82	0.92	0.93	1.01
C 15	0	0	0	0	0	0	0

**Surcote liée aux vagues (setup, m) – Aléa actuel**

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
C 1	0.19	0.43	0.48	0.55	0.53	0.54	0.53
C 2	0.18	0.39	0.42	0.48	0.46	0.47	0.45
C 3	0.16	0.34	0.37	0.42	0.39	0.41	0.39
C 4	0.15	0.30	0.33	0.38	0.36	0.38	0.35
C 5	0.13	0.26	0.29	0.34	0.32	0.33	0.31
C 6	0.11	0.23	0.26	0.30	0.28	0.29	0.28
C 7	0.10	0.19	0.22	0.26	0.25	0.25	0.24
C 8	0.08	0.16	0.19	0.23	0.21	0.22	0.20
C 9	0.07	0.13	0.15	0.19	0.18	0.18	0.17
C 10	0.05	0.10	0.12	0.15	0.14	0.14	0.13
C 11	0.04	0.07	0.08	0.11	0.10	0.10	0.09
C 12	0.03	0.04	0.05	0.08	0.07	0.06	0.06
C 13	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03
C 14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C 15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

## **Annexe 12**

# **Tableaux des hauteurs significative des vagues et des surcotes liées aux vagues pour l'aléa « 2100 »**

**auteurs significatives des vagues (m) – Aléa 2100**

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
C 1	1.21	3.01	3.39	3.93	4.39	4.38	4.66
C 2	1.25	3.04	3.45	4.03	4.48	4.48	4.79
C 3	1.27	3.04	3.49	4.09	4.53	4.54	4.89
C 4	1.25	2.98	3.42	4.02	4.44	4.45	4.83
C 5	1.22	2.91	3.33	3.91	4.31	4.32	4.73
C 6	1.18	2.82	3.21	3.75	4.12	4.14	4.56
C 7	1.12	2.70	3.03	3.54	3.88	3.90	4.31
C 8	1.05	2.53	2.83	3.30	3.62	3.63	4.02
C 9	0.97	2.37	2.63	3.02	3.32	3.32	3.67
C 10	0.86	2.15	2.34	2.70	2.96	2.96	3.26
C 11	0.76	1.91	2.07	2.37	2.61	2.61	2.86
C 12	0.65	1.66	1.77	2.02	2.22	2.22	2.43
C 13	0.52	1.34	1.43	1.64	1.81	1.81	1.97
C 14	0.24	0.67	0.71	0.83	0.93	0.94	1.01
C 15	0	0	0	0	0	0	0

**Surcote liée aux vagues (setup, m) – Aléa actuel**

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
C 1	0.18	0.40	0.43	0.49	0.47	0.48	0.46
C 2	0.17	0.35	0.39	0.44	0.41	0.43	0.41
C 3	0.15	0.30	0.33	0.38	0.36	0.37	0.35
C 4	0.14	0.27	0.30	0.35	0.33	0.34	0.32
C 5	0.13	0.23	0.26	0.31	0.29	0.30	0.29
C 6	0.12	0.20	0.23	0.28	0.26	0.26	0.25
C 7	0.10	0.16	0.19	0.24	0.22	0.22	0.21
C 8	0.09	0.13	0.16	0.21	0.19	0.19	0.18
C 9	0.07	0.10	0.12	0.17	0.15	0.15	0.14
C 10	0.06	0.07	0.09	0.13	0.12	0.11	0.11
C 11	0.04	0.04	0.06	0.10	0.08	0.08	0.07
C 12	0.03	0.02	0.03	0.06	0.05	0.04	0.04
C 13	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01
C 14	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	-0.01
C 15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

## **Annexe 13**

### **Détail de l'analyse à « dires d'expert » pour la cartographie de l'aléa**

A l'issue de la phase de modélisation numérique, la phase cartographique comprend notamment l'analyse à dire 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.

Sur la zone des Joncaux, l'analyse à dire d'expert est relativement limitée dans ce complément 2016. Elle porte sur :

1. **Parcelles pour lesquelles le levé RGE ALTI® présente une anomalie liée à l'effacement de grands bâtiments (Figure 49).** Lorsque ces parcelles sont entourées d'aléa sur au moins 3 faces (Figure 50), elles sont intégrées dans la surface d'aléa avec la classe d'aléa située à proximité (Figure 51). A noter que l'exemple Figure 49, présente le cas particulier d'une anomalie topographique supplémentaire inexplicée. Elle se situe en dehors de l'emprise du bâtiment (zone en blanc) et sera corrigée (voir ci-après point 3).
2. **Pixels isolés :** toute surface de moins de 50 m<sup>2</sup> isolée (en aléa ou pas, Figure 51) a été intégrée dans la classe d'aléa située à proximité (Figure 52);
3. **Le lissage des contours des surfaces de submersion :** afin de faciliter l'interprétation des résultats et leur exploitation pour établir la réglementation du PPRL par l'Etat, les contours de chaque classe d'aléa suivant initialement les mailles hexagonales du modèle numérique, ont été lissés avec un pas de 20m (Figure 53).

A noter le cas particulier d'une zone hors d'eau (ateliers municipaux) pour laquelle la donnée topographique présente une anomalie inexplicée et qui a donc été incluse dans la surface d'aléa.

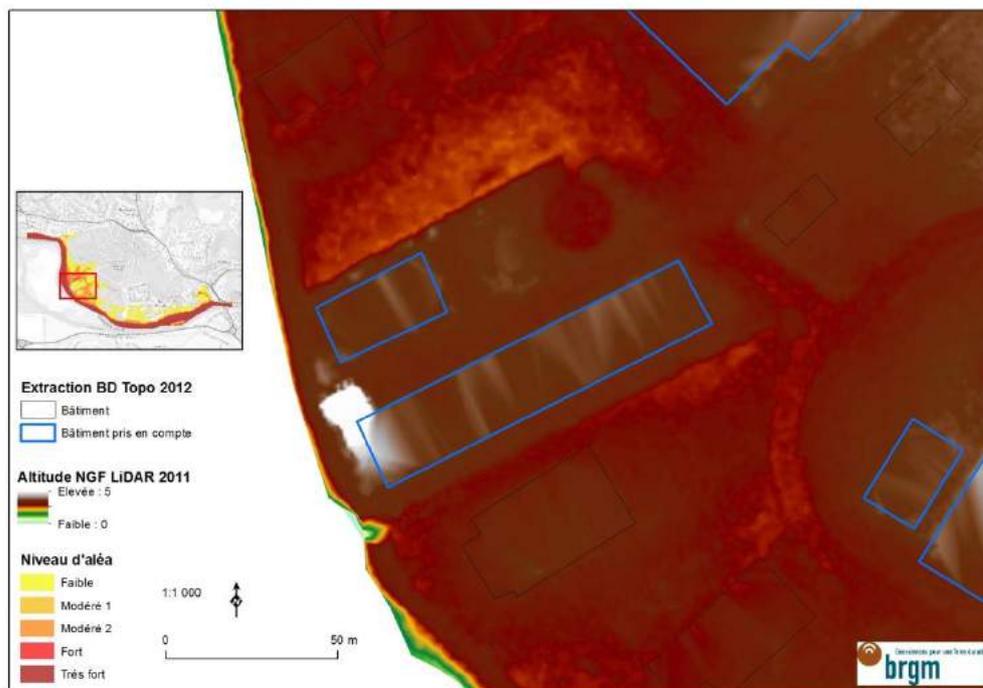


Figure 49 : Parcelles du RGE ALTI® présentant une anomalie topographique (encadrées en bleu) liée à l'effacement du bâtiment.

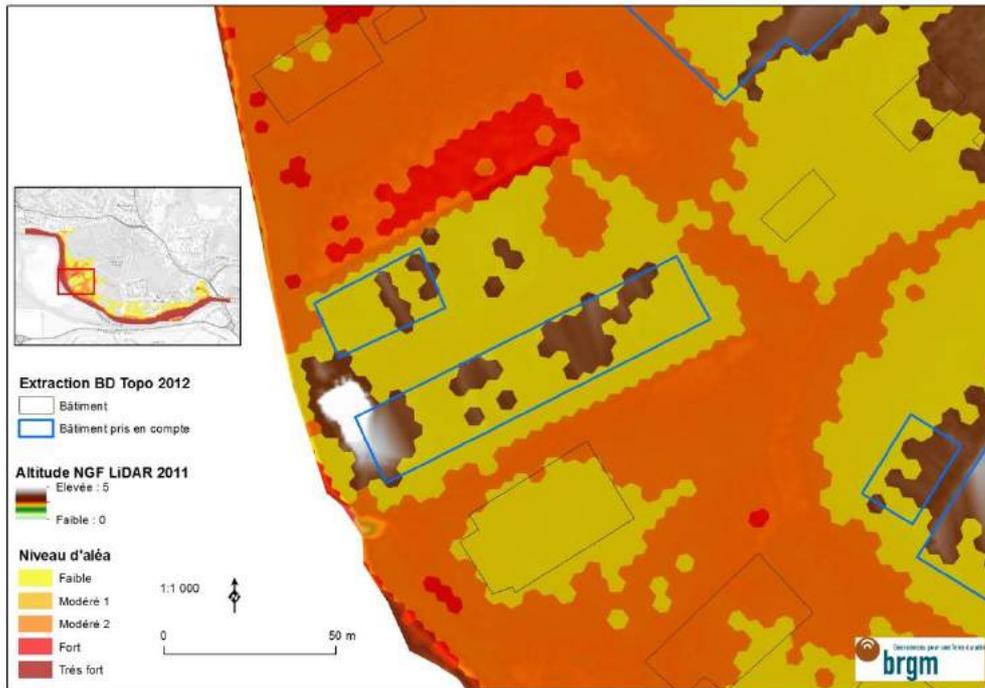


Figure 50 : Résultat brut de modélisation numérique mettant en évidence les zones hors aléa au niveau des parcelles présentant une anomalie topographique.

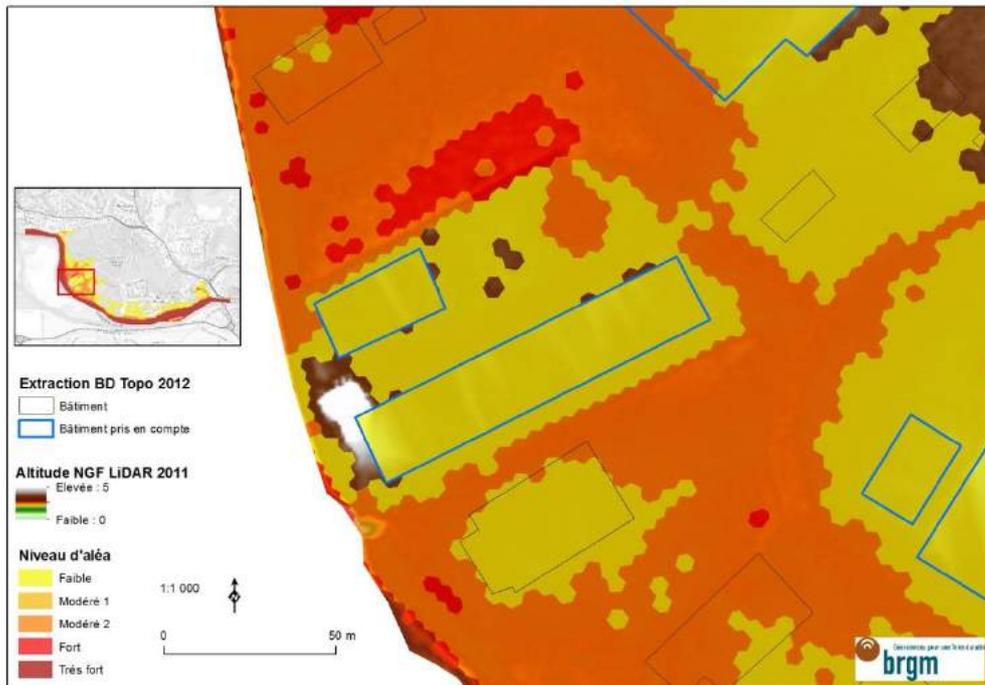


Figure 51 : Ajustement manuel de l'aléa au niveau des parcelles présentant une anomalie topographique liée à la présence de bâtiment.

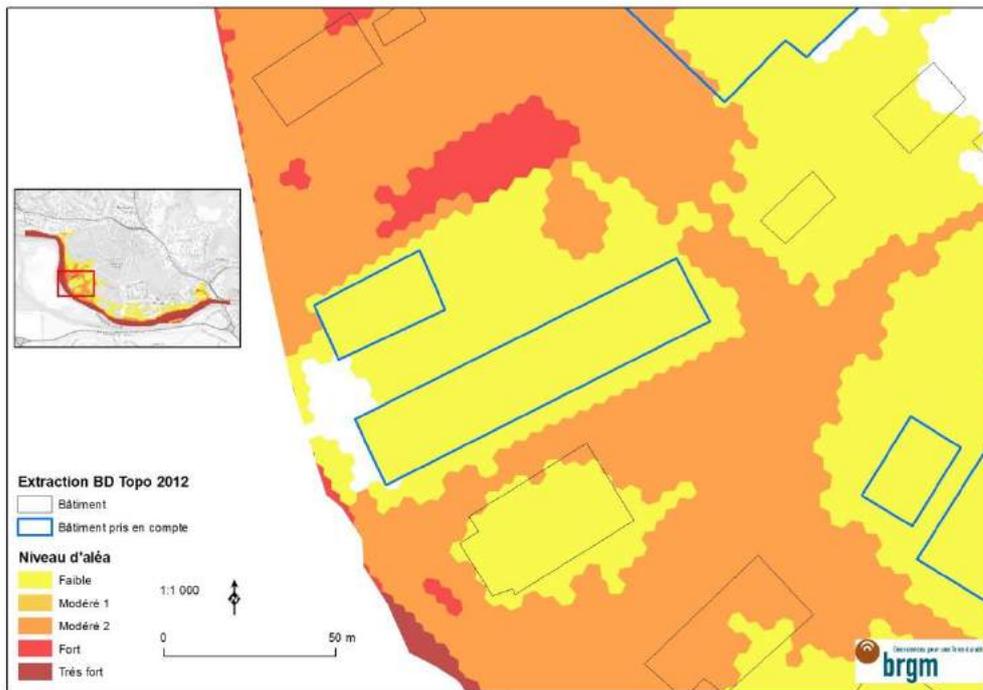


Figure 52 : Intégration dans la surface de submersion les surfaces isolées de moins de 50 m<sup>2</sup>.

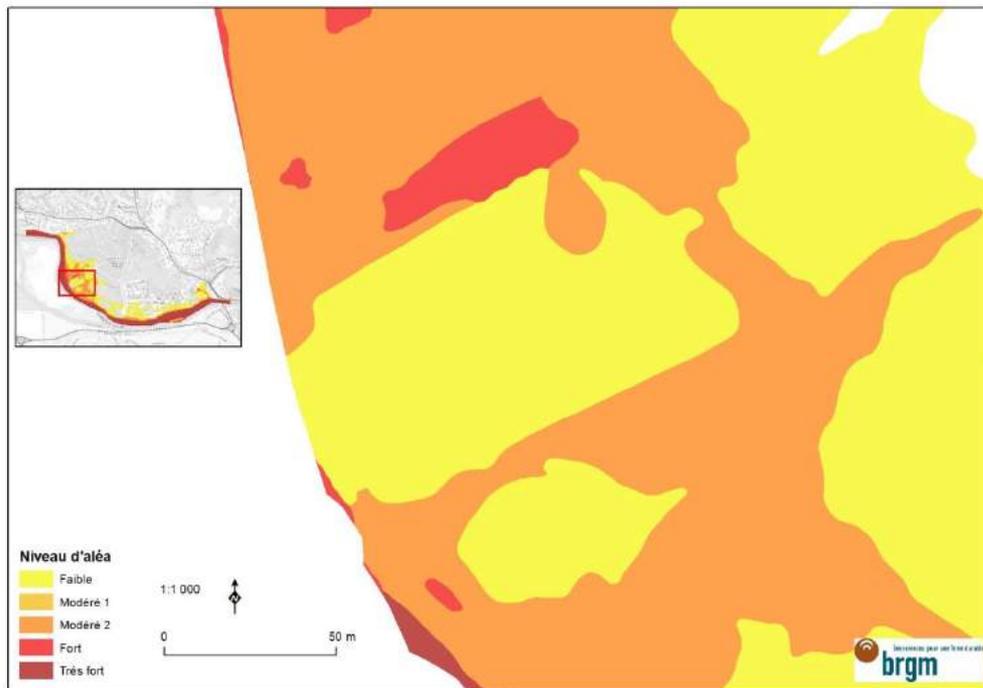
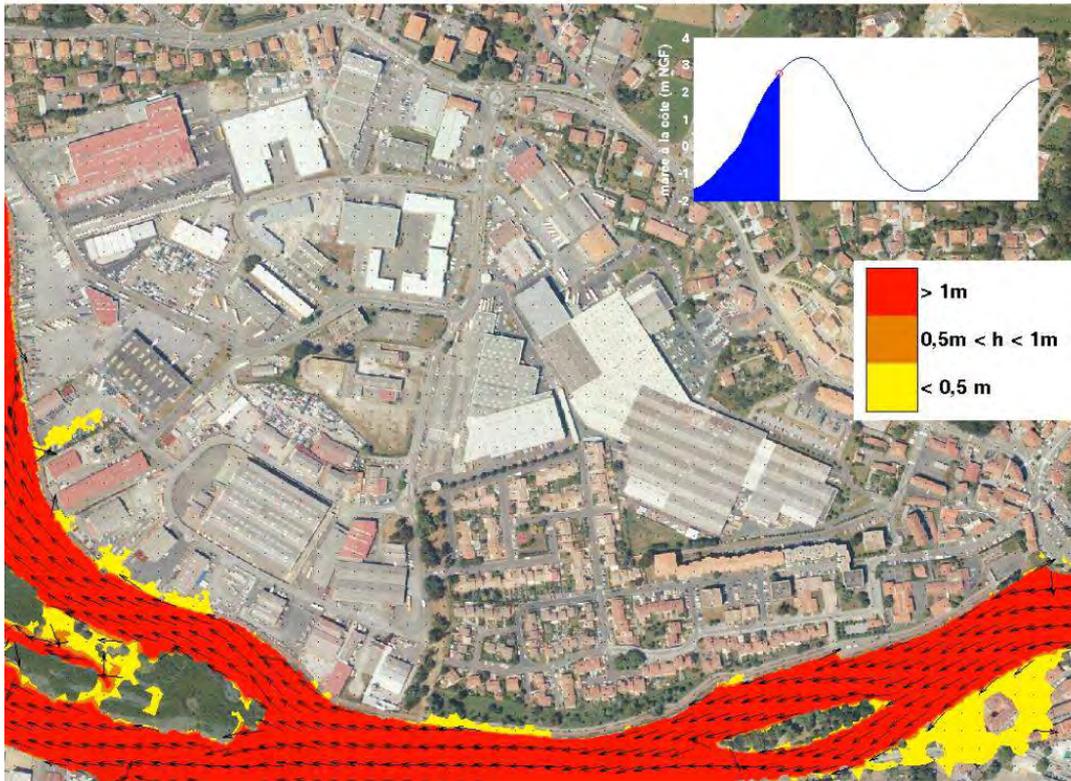


Figure 53 : Lissage des contours avec un pas de 20 m.

## **Annexe 14**

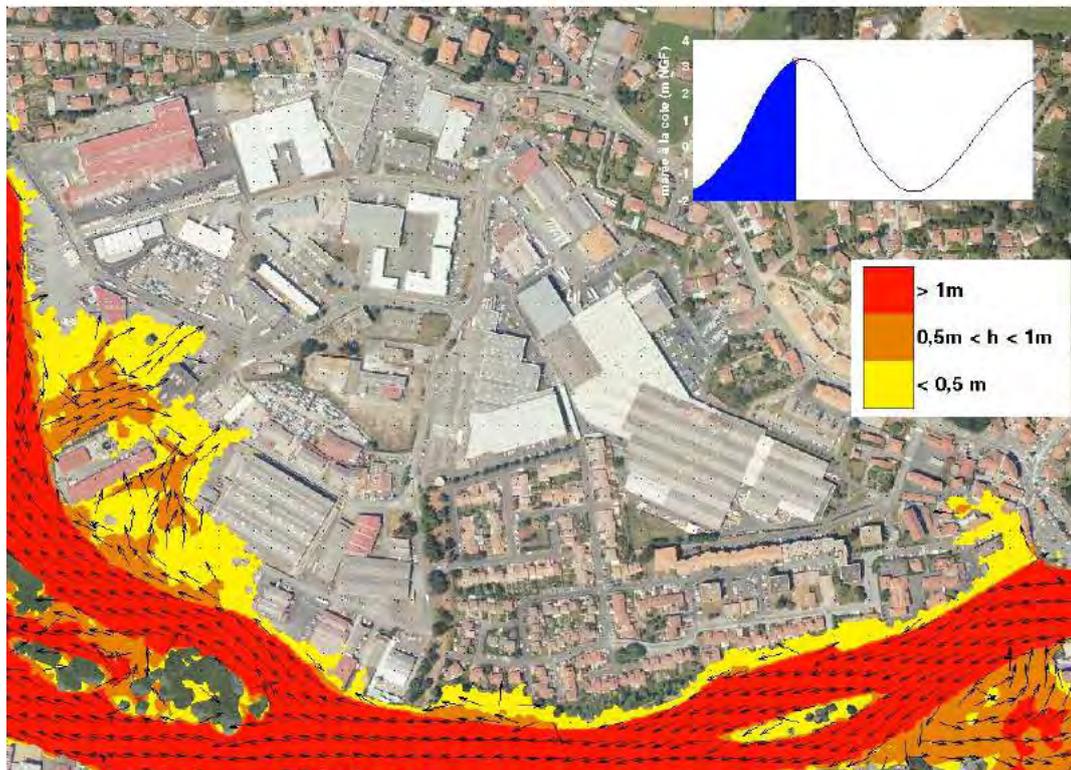
# **Illustration de la dynamique de submersion pour l'évènement « actuel »**

Durée de la simulation : 9h30 /27h

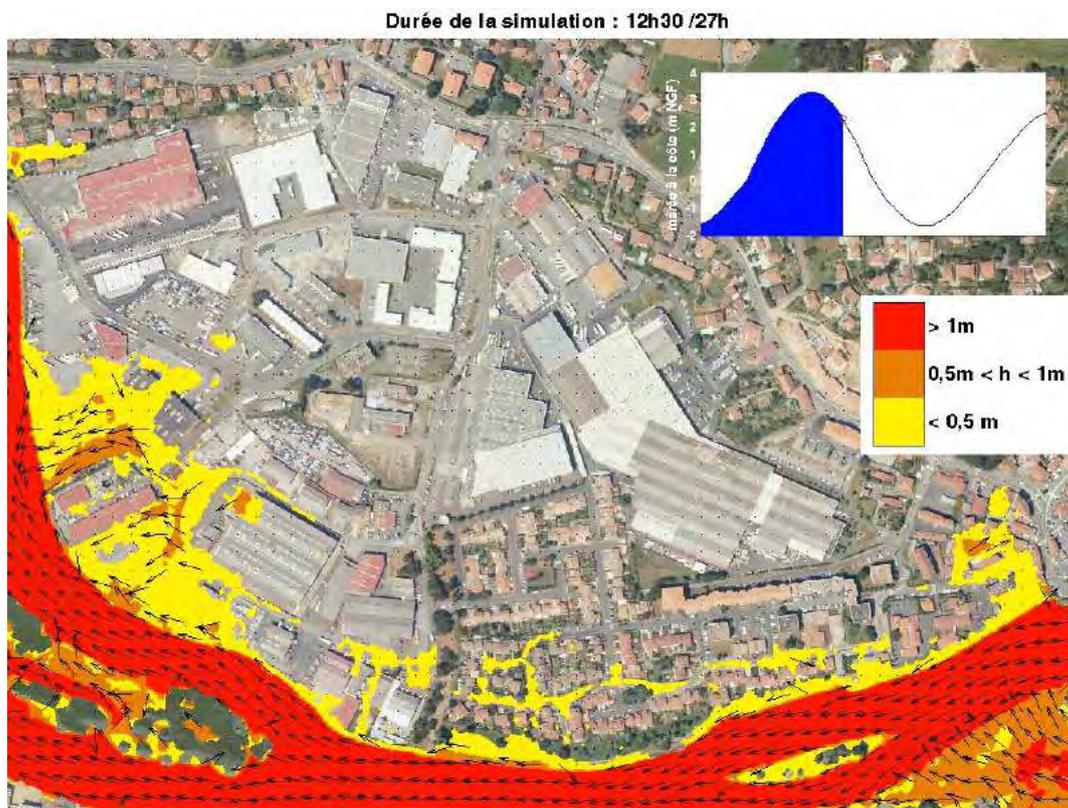
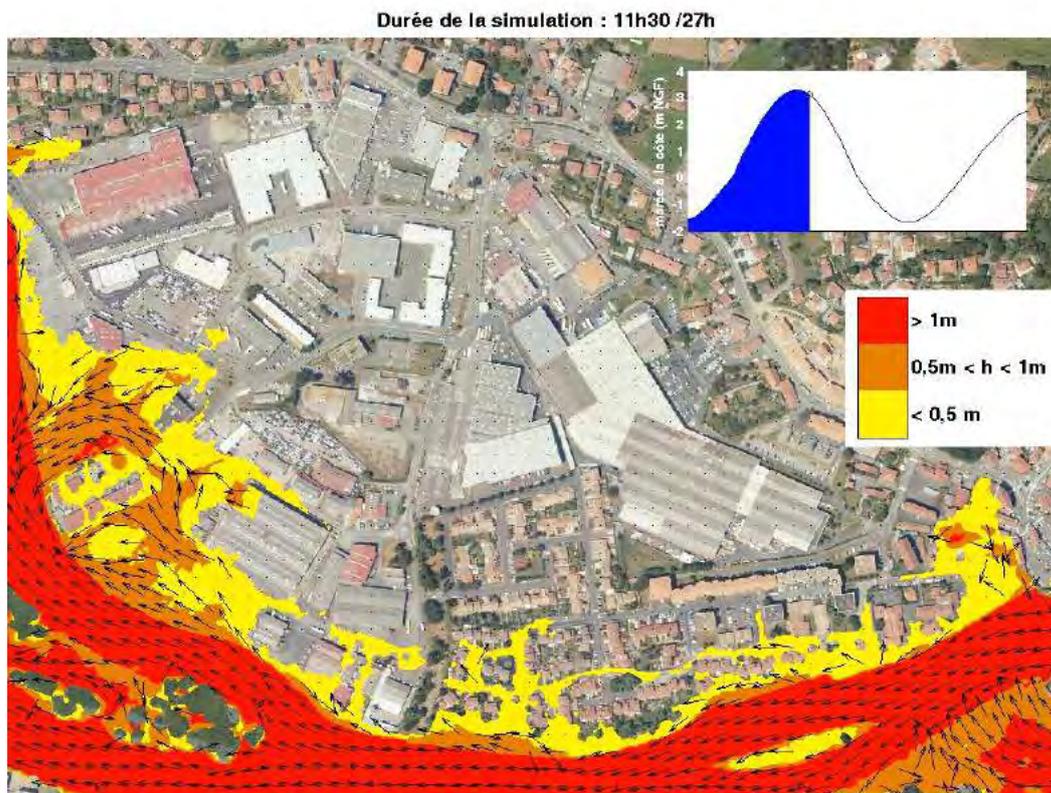


Hauteur d'eau et vitesses 9h30 après le début de la simulation

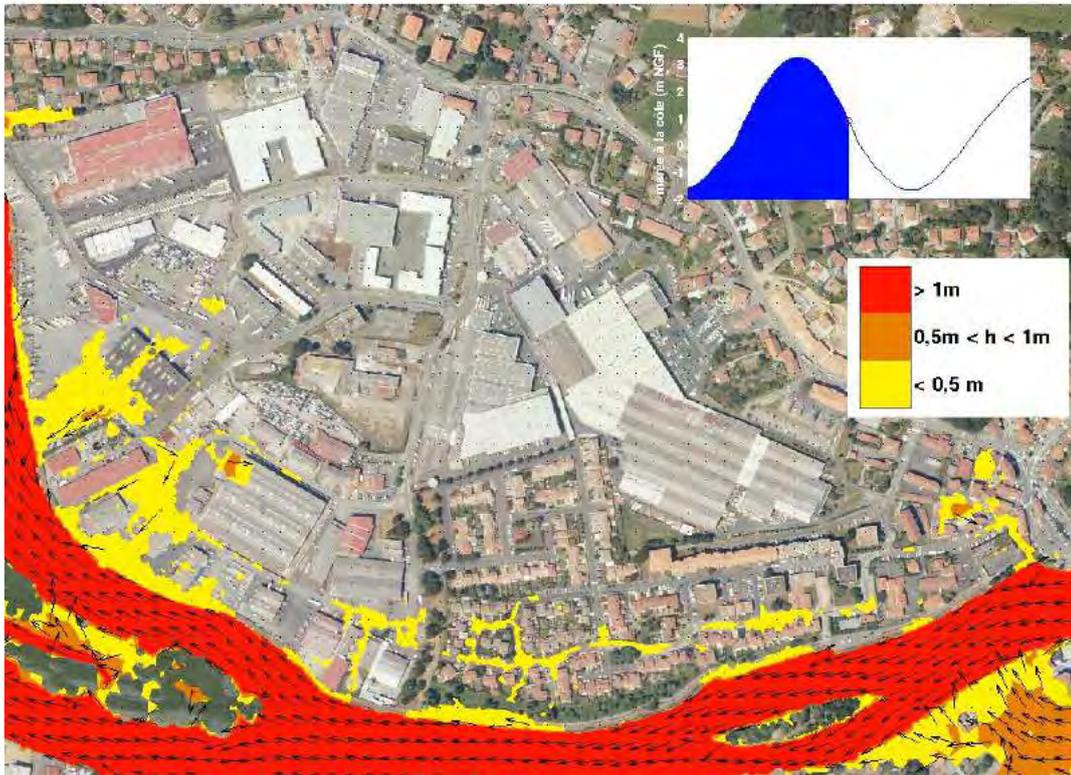
Durée de la simulation : 10h30 /27h



Hauteur d'eau et vitesses 10h30 après le début de la simulation

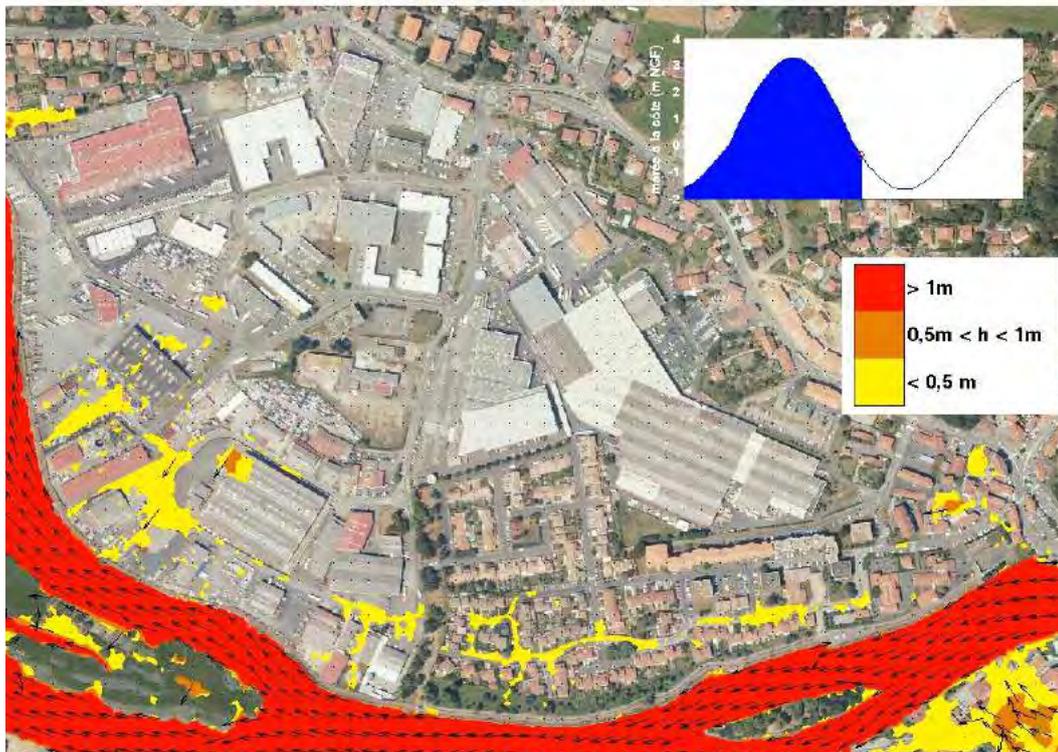


Durée de la simulation : 13h30 /27h



Hauteur d'eau et vitesses 13h30 après le début de la simulation

Durée de la simulation : 14h30 /27h

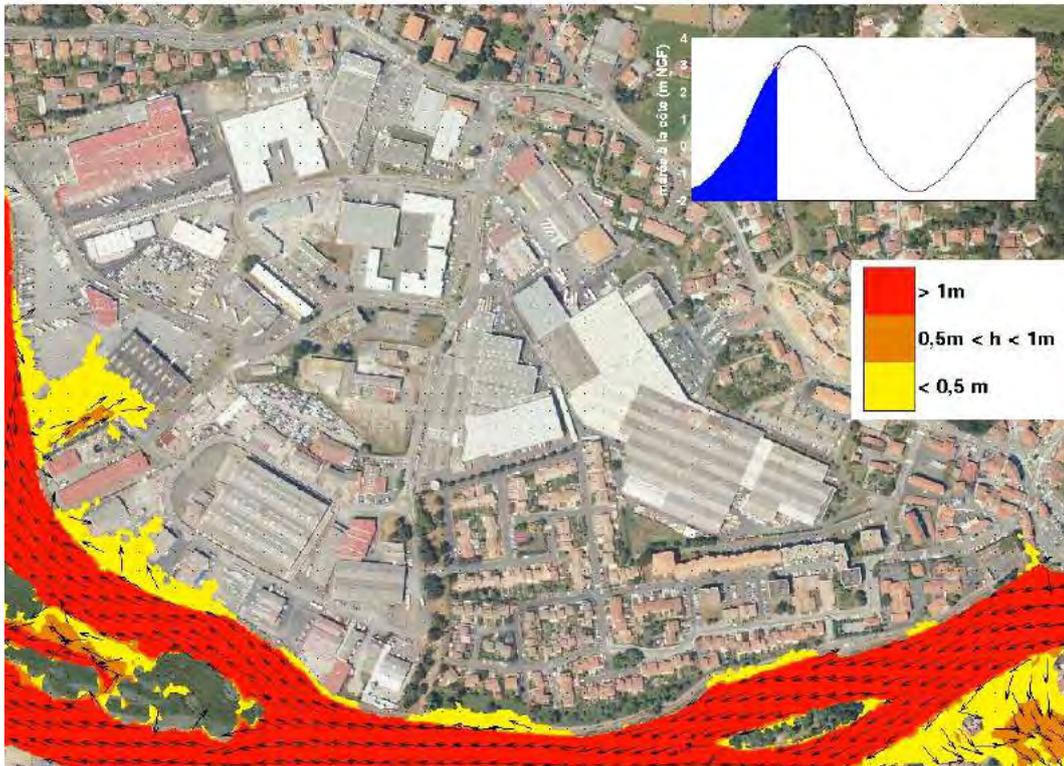


Hauteur d'eau et vitesses 14h30 après le début de la simulation

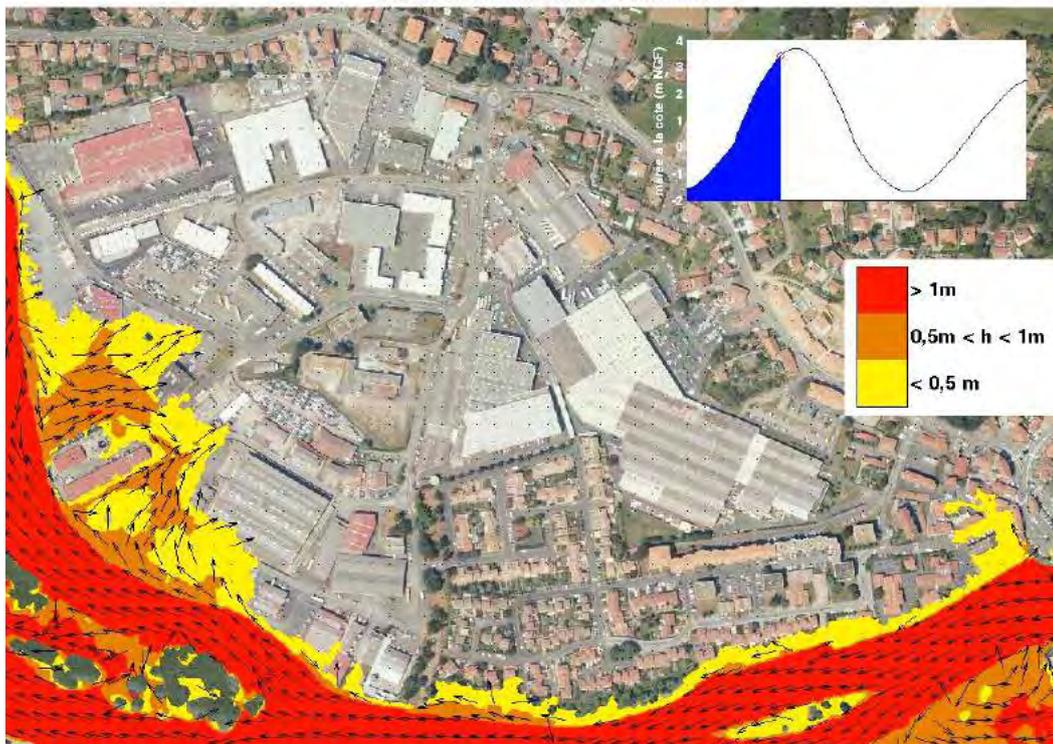
## **Annexe 15**

# **Illustration de la dynamique de submersion pour l'évènement « 2100 »**

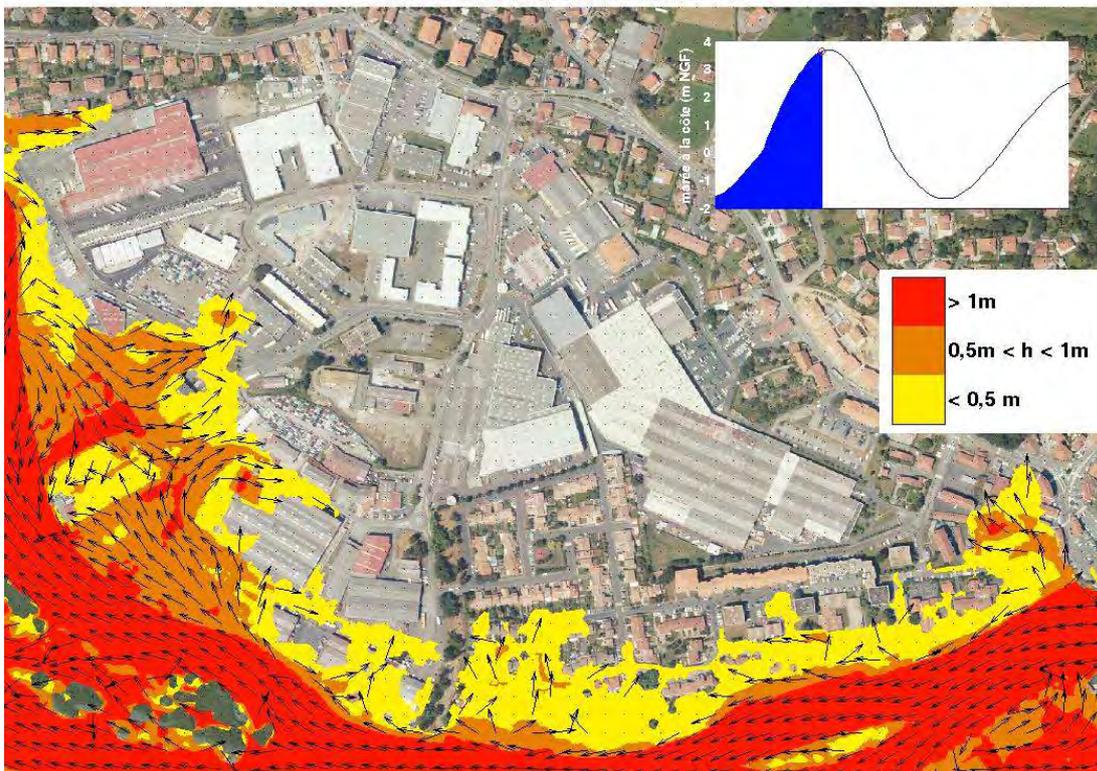
Durée de la simulation : 9h30 /27h



Durée de la simulation : 10h0 /27h

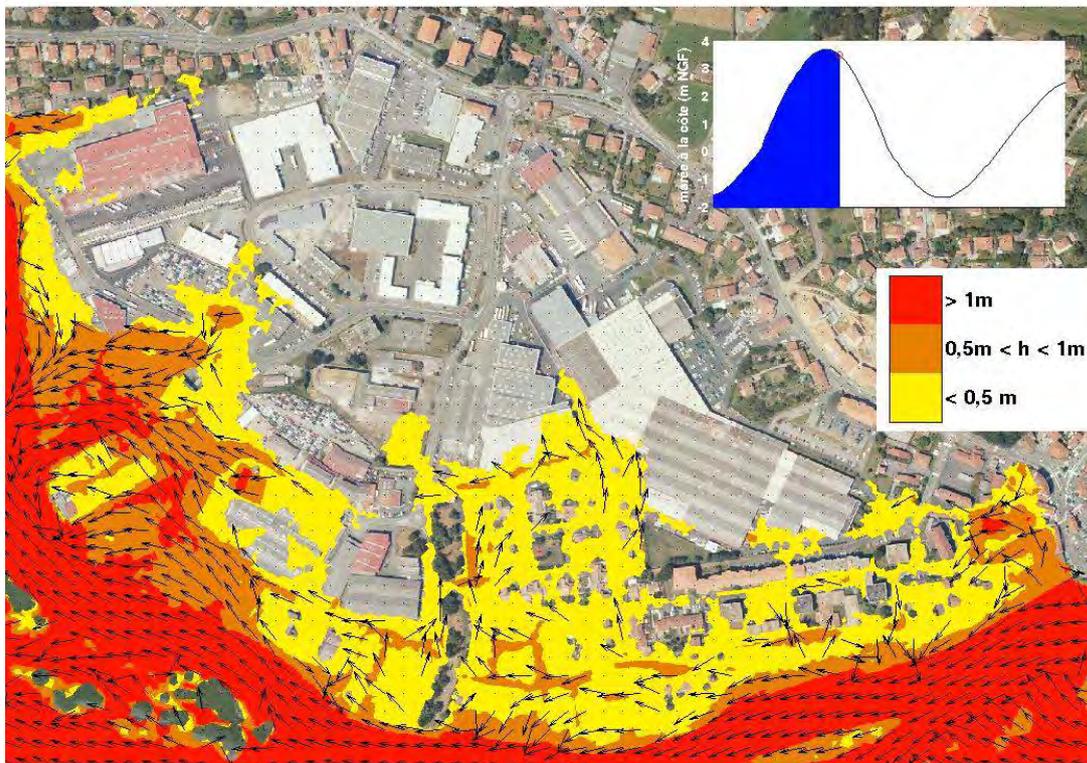


Durée de la simulation : 10h30 /27h



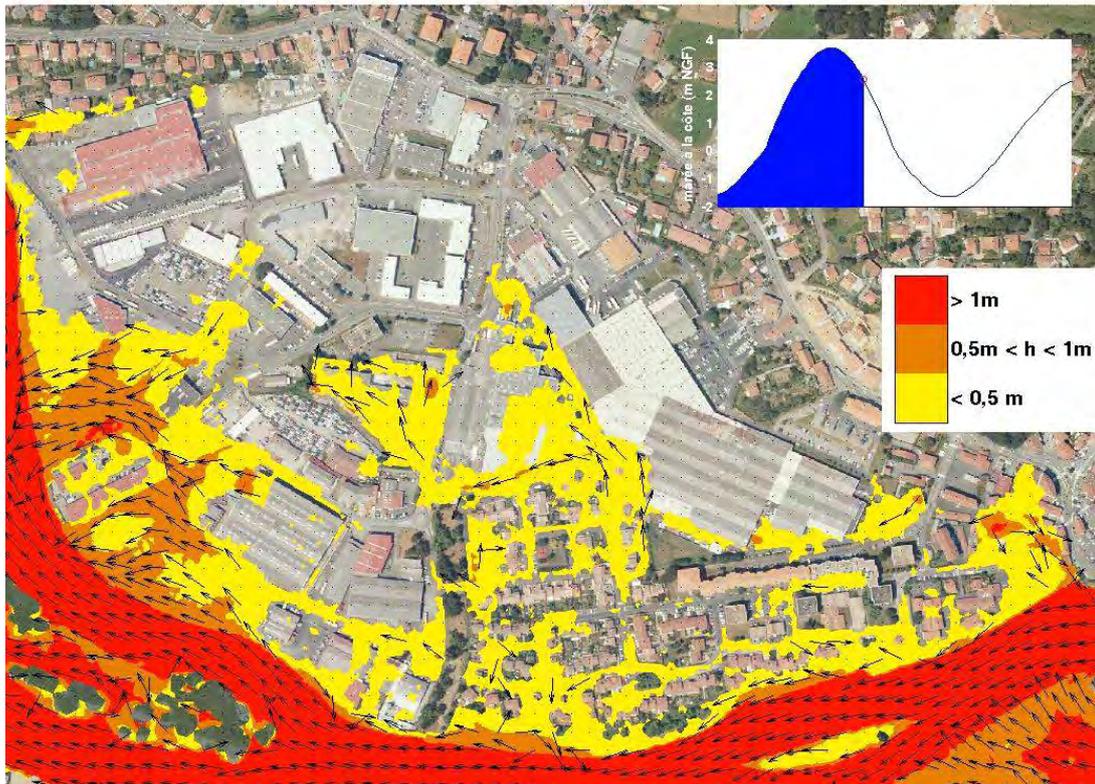
Hauteur d'eau et vitesses 10h30 après le début de la simulation

Durée de la simulation : 11h30 /27h



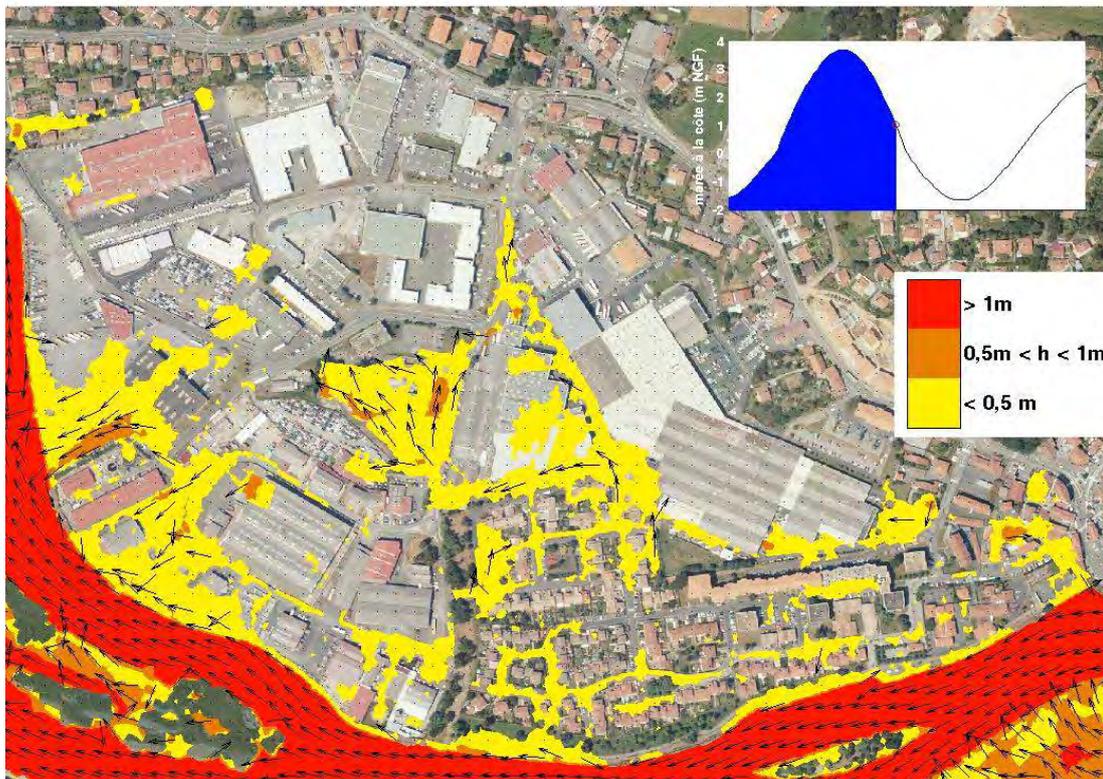
Hauteur d'eau et vitesses 11h30 après le début de la simulation

Durée de la simulation : 12h30 /27h



Hauteur d'eau et vitesses 12h30 après le début de la simulation

Durée de la simulation : 13h30 /27h



Hauteur d'eau et vitesses 13h30 après le début de la simulation

