



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Le Préfet du Calvados

PPRL Bessin & Dives-Orne

Rapport de modélisation

Houles, test de dune et de digue, transport sédimentaire



Maître d'ouvrage :

DDTM du Calvados

*Alp'Géorisques
IMDC*



Références

*Alp'Géorisques
D1301002*

*IMDC
I/RA/12107/14.273/PHI*

Version

2.0

Édition du 28/10/2015


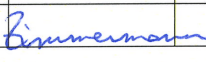
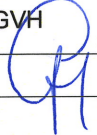
Date

31/10/2015

Identification du document

Projet	PPRL Bessin & Dives-Orne		
Titre	Rapport de modélisation		
Document	RA14273_Rapport des modélisations_v2.0.odt		
Références	Réf. Alp'Géorisques D1301002	Réf. IMDC I/RA/12107/14.273/PHI	
Proposition n°	D1301002	Référence commande	
Maître d'ouvrage	DDTM du Calvados	Adresse	
Maître d'œuvre ou AMO	-	Adresse	

Modifications

Version	Date	Description	Auteur	Vérifié	Approuvé
1.0	04/02/2015	Rapport concept	PHI	ABO	GVH
2.0	31/10/2015	Rapport final - ajout commentaires DDTM / figures test de digue	PHI	NZI	GVH
					

Diffusion

Alp'Géorisques	Jean-Pierre Rossetti	04 76 77 92 00	jeanpierre.rossetti@alpgeorisques.com
IMDC	Nicolas Zimmermann	+32 3 270 92 70	nicolas.zimmermann@imdc.be
Diffusion	Papier		
	Numérique	✓	DDTM Calvados

Archivage

N° d'archivage (référence)	-
Titre	PPRL Bessin & Dives-Orne – Rapport de modélisation
Département	Calvados
Commune(s) concernée(s)	
Cours d'eau concerné(s)	Sans objet
Région naturelle	Basse-Normandie
Thème	Cartographie réglementaire
Mots-clefs	Submersion marine risque littoral PPRL

Résumé

Ce rapport s'inscrit dans le cadre de la Phase 2 de la procédure PPRL des secteurs Bessin et Dives-Orne en Basse-Normandie. Il concerne les études de modélisation nécessaire à la cartographie des aléas du PPRL.

Il décrit le modèle de houle (Chapitre II), les test de stabilité de digues et de dunes (Chapitre III) ainsi que le modèle d'évolution du trait de côte (Chapitre IV).

SOMMAIRE

I. INTRODUCTION.....	1
I.1. Contexte de l'étude.....	1
I.2. Objet de l'étude.....	1
I.3. Démarche de l'étude.....	1
I.4. Structure du rapport.....	3
II. MODÈLE DE HOULE.....	3
II.1. Le modèle Swan.....	3
II.2. Bathymétrie et maillage.....	4
II.3. Points étudiés.....	5
II.4. Paramètres.....	6
II.4.1. Période moyenne de houle.....	7
II.4.2. Direction moyenne.....	8
II.4.3. Vent extrême.....	9
II.4.4. Réduction des vents d'Ouest.....	10
II.5. Calibration du modèle.....	11
II.5.1. Calibration des conditions extrêmes.....	12
II.5.1.1. Conditions du Nord – Nord-Est.....	12
II.5.1.2. Conditions d'Ouest.....	15
II.5.2. Calibration des conditions fréquentes.....	18
II.6. Tests de sensibilité.....	20
II.6.1. Période de houle.....	20
II.6.1.1. Conclusion.....	24
II.6.2. Direction moyenne.....	24
II.6.2.1. Conclusion.....	27
II.6.3. Niveau d'eau.....	27
II.6.3.1. Conclusion.....	29
II.7. Simulations des conditions extrêmes.....	30
II.8. Conditions extrêmes à la côte.....	33
II.8.1. Houle.....	33
II.8.2. Niveaux d'eau.....	35
II.8.2.1. Surcote de la houle en bordure littorale.....	36
II.8.2.2. Surcote de houle sur les plages.....	39
II.8.2.3. Surcote de houle : conclusion.....	39
III. ÉVALUATION DES STRUCTURES CÔTIÈRES : TEST DE DIGUES ET DUNES.....	40
III.1. Introduction, objectif et conditions testées.....	40
III.2. Le test de dunes.....	41
III.2.1. Méthode.....	41

III.2.2. Secteur Bessin.....	43
III.2.2.1. Marais de L'Edit.....	44
III.2.2.2. Marais de Graye – Ver-sur-Mer.....	45
III.2.2.3. Marais de Ver-sur-Mer et Meuvaines.....	47
III.2.3. Secteur Dives-Orne.....	52
III.2.3.1. Dune de la Pointe de Cabourg.....	52
III.2.3.2. Dune de Varaville et Franceville-Merville.....	54
III.2.3.3. Dune de Riva-Bella.....	60
III.2.3.4. Dune de Colleville-Montgomery.....	62
III.3. Le test des digues.....	67
III.3.1. Méthode.....	67
III.3.1.1. Calcul d'érosion avec Durosta.....	67
III.3.1.2. Conditions hydrodynamiques avec Swan.....	67
III.3.1.3. Débits de franchissement (guide Eurotop, 2007).....	68
III.3.1.4. Résultat.....	68
III.3.2. Secteur Bessin.....	69
III.3.2.1. Falaise du Cap Romain et la Rive plage.....	71
III.3.2.2. Digue de Courseulles.....	74
III.3.2.3. Digue de La Plage.....	75
III.3.2.4. Le Paisty Vert.....	79
III.3.2.5. Enrochements du marais de Ver-sur-Mer (Le Pont Chaussé).....	81
III.3.2.6. Enrochements Roseau Plage et digue d'Asnelles.....	82
III.3.2.7. La Guerre.....	84
III.3.2.8. Digue d'Arromanches-les-Bains.....	85
III.3.2.9. Résultats du scénario de référence +60cm.....	87
III.3.2.10. Résultats du scénario décennal (T10).....	88
III.3.2.11. Résultats du scénario extrême (T1000).....	89
III.3.3. Secteur Dives-Orne.....	90
III.3.3.1. Remblai de Cabourg.....	91
III.3.3.2. Franceville-Merville : parking Boulevard Wattier.....	93
III.3.3.3. Riva Bella (Ouistreham).....	95
III.3.3.4. Remblai de Hermanville-sur-Mer.....	96
III.3.3.5. Résultats du scénario de référence +60cm.....	98
III.3.3.6. Résultats du scénario décennal (T10).....	98
III.3.3.7. Résultats du scénario extrême (T1000).....	99
IV. MODÉLISATION DE L'ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE.....	99
IV.1. Description du logiciel Litpack.....	100
IV.1.1. Paramètres et construction du modèle.....	100
IV.1.1.1. Paramètres.....	100
IV.1.1.2. Construction du modèle.....	102
IV.1.1.3. Conclusions de l'étude diachronique et de la littérature.....	104
IV.1.1.4. Mise en œuvre du modèle.....	105
IV.2. Résultat du modèle.....	106
IV.2.1. Evolution du trait de côte et transit littoral.....	106
IV.2.1.1. Recul moyen annuel par section homogène.....	110
IV.2.1.2. Conclusion.....	112

V. BIBLIOGRAPHIE ET RÉFÉRENCES.....	113
Points de sortie secteur Bessin.....	116
Points de sortie secteur Dives-Orne.....	117
Conditions centennales (T100).....	118
C.1 Scénario de référence +0,20m.....	122
MARAIS DE L'ÉDIT (BERNIÈRES-COURSEULLES).....	214
Scénario à échéance 100 ans (T100 +60cm).....	214
Scénario fréquent (T10).....	216
Scénario extrême (T1000).....	218
MARAIS DE GRAYE- ET VER-SUR-MER.....	220
Scénario à échéance 100 ans (T100 +60cm).....	220
Scénario fréquent (T10).....	222
Scénario extrême (T1000).....	224
MARAIS DE VER-S/M ET MEUVAINES.....	226
Scénario à échéance 100 ans (T100 +60cm).....	226
Scénario fréquent (T10).....	230
Scénario extrême (T1000).....	234
POINTE DE CABOURG.....	238
Scénario à échéance 100 ans (T100+60cm).....	238
Scénario fréquent (T10).....	240
Scénario extrême (T1000).....	242
DUNE DE VARAVILLE ET FRANCEVILLE/MERVILLE-PLAGE	244
Scénario à échéance 100 ans (T100+60cm).....	244
Scénario fréquent (T10).....	246
Scénario extrême (T1000).....	248
DUNE DE RIVA BELLA (OUISTREHAM).....	250
Scénario à échéance 100 ans (T100+60cm).....	250
Scénario fréquent (T10).....	252
Scénario extrême (T1000).....	254
DUNE DE COLLEVILLE-MONTGOMERY.....	256
Scénario à échéance 100 ans (T100+60cm).....	256
Scénario fréquent (T10).....	258
Scénario extrême (T1000).....	260

Figures

Figure II.1: Emprise du modèle à grande échelle et bathymétrie utilisée (en m CM).....	5
Figure II.2: Zoom du modèle détaillé, avec indication des différents points étudiés.....	6
Figure II.3: Régression entre la période de moyenne de houle et les hauteurs significatives de houle.....	8
Figure II.4: Régression entre la houle et le vent extrême, conditions d'Ouest.....	9
Figure II.5: Régression entre la houle et le vent extrême, conditions du Nord – Nord-Est.....	10
Figure II.6: Corrélacion entre le vent au large (OCEANOR) et en bordure littorale (Luc-sur-Mer) du secteur Ouest à Sud-Ouest : nuage de points et régression.....	11
Figure II.7: Résultat caractéristique de la calibration des conditions du NNE, exemple d'une planche des hauteurs significatives de houle (exemple de la tempête du 20 février 1996).....	13
Figure II.8: Calibration des tempêtes du NNE : comparaison données de base et résultats du modèle.....	14
Figure II.9: Conditions extrêmes NNE, corrélation au point COAST-2577 entre les données ANEMOC et le modèle.....	14
Figure II.10: Résultat caractéristique de la calibration des conditions d'Ouest, exemple d'une planche des hauteurs significatives de houle (exemple de la tempête de 6 décembre 1994).....	16
Figure II.11: Corrélacion entre les sorties du modèle et les données ANEMOC au point COAST-2577 au large de Ouistreham, conditions extrêmes d'Ouest.....	17
Figure II.12: Corrélacion entre les sorties du modèle et les mesures au large de Ouistreham, conditions extrêmes d'Ouest.....	18
Figure II.13: Comparaison des conditions fréquentes (modèle IMDC) au point COAST-2577 (modèle ANEMOC).....	19
Figure II.14: Calibration des conditions fréquentes : résultats au point de mesure au large de Ouistreham (1994-1995).....	20
Figure II.15: Sensibilité à la période moyenne de houle (Tm), secteur Bessin, conditions d'Ouest.....	21
Figure II.16: Sensibilité à la période moyenne de houle (Tm), secteur Bessin, conditions du NNE.....	22
Figure II.17: Sensibilité à la période moyenne de houle (Tm), secteur Dives-Orne, conditions d'Ouest.....	22
Figure II.18: Sensibilité à la période moyenne de houle (Tm), secteur Dives-Orne, conditions du Nord – Nord-Est.....	23
Figure II.19: Sensibilité à la direction moyenne de houle au large, secteur Bessin, conditions d'Ouest.....	25
Figure II.20: Sensibilité à la direction moyenne de houle au large, secteur Bessin, conditions du NNE.....	25
Figure II.21: Sensibilité à la direction moyenne de houle au large, secteur Dives-Orne, conditions d'Ouest.....	26
Figure II.22: Sensibilité à la direction moyenne de houle au large, secteur Dives-Orne, conditions du NNE.....	26
Figure II.23: Sensibilité au niveau d'eau, secteur Bessin, conditions d'Ouest.....	28
Figure II.24 : Sensibilité au niveau d'eau, secteur Bessin, conditions du Nord – Nord-Est.....	28
Figure II.25 : Sensibilité au niveau d'eau, secteur Dives-Orne, conditions d'Ouest.....	29
Figure II.26 : Sensibilité au niveau d'eau, secteur Dives-Orne, conditions du Nord – Nord-Est.....	29
Figure II.27: Résultats du modèle de houle par section homogène sur le secteur Bessin, période de retour centennal en conditions Ouest et Nord – Nord-Est.....	34
Figure II.28: Résultats du modèle de houle par section homogène sur le secteur Dives-Orne, période de retour centennal en conditions Ouest et Nord – Nord-Est.....	35
Figure III.1: Définition du profil limite du test de dune (RIKZ, 2007).....	42
Figure III.2: Exemple du test de dune, effectué sur un profil de la dune du marais de Graye – Ver-sur-Mer ; le profil érodé sans (rouge) et avec (noir) soustraction du « supplément » (25 % du volume érodé au-dessus du niveau de l'eau). Le « profil limite » (vert) continue sur l'arrière pays (situé sous le niveau marin), et la dune ne résiste par conséquent pas aux conditions testées.....	43
Figure III.3: Résultat du test de dune, marais de l'Edit, couple T100 k10 Ouest, érosion maximale de 6 m (profil 3_17).....	44
Figure III.4: Recul de dune en conditions de référence NNE, marais de Graye – et Ver-sur-Mer (positif = recul).....	45
Figure III.5 : Recul de dune en conditions de référence Ouest, marais de Graye – et Ver-sur-Mer (positif = recul).....	46
Figure III.6: Résultat du test de dunes, conditions T100 k10 W, marais de Graye – et Ver-sur-Mer, profil 5-30.....	47
Figure III.7: Recul de dune, conditions de référence NNE, marais de Ver-sur-Mer (BSH 7).....	48

Figure III.8: Recul de dune en conditions de référence d'Ouest, marais de Ver-sur-Mer (BSH7).....	49
Figure III.9: Recul de dune, conditions de référence NNE, marais de Meuvaines (BSH 8).....	49
Figure III.10: Recul de dune en conditions de référence d'Ouest, marais de Meuvaines (BSH8).....	50
Figure III.11: Exemple d'un profil de dune exposée à une surverse après érosion, condition T100 k9 W, profil 7-3 (le Paisty Vert).....	51
Figure III.12: Résultat du test de dunes, conditions T100 k9 W, marais de Meuvaines, profil 8-3.....	51
Figure III.13: Recul ponctuel en conditions de référence NNE : Pointe de Cabourg.....	52
Figure III.14: Recul ponctuel en conditions de référence Ouest : Pointe de Cabourg.....	53
Figure III.15: Résultat du test de dune sur la Pointe de Cabourg (profil 2-11, condition T100 k7W).....	54
Figure III.16: Recul ponctuel en conditions de référence NNE, dune de Varaville.....	55
Figure III.17: Recul ponctuel en conditions de référence Ouest, dune de Varaville.....	56
Figure III.18: Recul ponctuel en conditions de référence NNE, dune Franceville-Merville-plage.....	57
Figure III.19: : Recul ponctuel en conditions de référence NNE, dune Franceville-Merville-plage.....	57
Figure III.20: Localisation du profil 4-17, Impasse Jeanne Thérèse, Le Hôme (Varaville).....	58
Figure III.21: Résultat du test de dune : recul de côte critique sur 17 m (profil 4-17, le Hôme), k4W.....	58
Figure III.22: Localisation du profil 4-85 à Franceville-Merville-Plage.....	59
Figure III.23: Résultat du test de dune, recul de côte critique sur 17 m (profil 4-85).....	59
Figure III.24: Recul ponctuel en conditions de référence NNE, dune de Riva Bella à Ouistreham.....	60
Figure III.25: Recul ponctuel en conditions de référence Ouest, dune de Riva Bella à Ouistreham.....	61
Figure III.26: Résultat du test de dunes, recul sur 11 m de la dune de Riva Bella, profil 9-19, condition k6W.	61
Figure III.27: Résultat du test de dunes, recul maximal de la dune de Riva Bella, profil 9-26, condition k5W.	62
Figure III.28: Recul ponctuel en conditions de référence NNE, dune de Colleville-Montgomery.....	63
Figure III.29: Recul ponctuel en conditions de référence Ouest, dune de Colleville-Montgomery.....	64
Figure III.30: Localisation des profils (de gauche à droite) 11-11, 11-9, 11-8, 11-6 et 11-4 à Colleville-Montgomery.....	64
Figure III.31: Résultat du test de dune, condition k4W, profil 11-4, Colleville-Montgomery.....	65
Figure III.32: Résultat du test de dune, condition k4W, profil 11-6, Colleville-Montgomery.....	65
Figure III.33: Résultat du test de dune, condition k4W, profil 11-8, Colleville-Montgomery.....	66
Figure III.34: Résultat du test de dune, condition k6W, profil 11-9, Colleville-Montgomery.....	66
Figure III.35: Superposition de marée astronomique (astronomical spring tide) et surcote atmosphérique (storm surge).....	68
Figure III.36: Exemple d'un test de digue.....	69
Figure III.37: Profil 1-5, le Cap Romain, conditions historiques (tempête de 1996).....	72
Figure III.38: Résultat du test de digue, profil 1-10 (Avenue Georges Pierre, La Rive Plage), conditions de la tempête de 1996.....	73
Figure III.39: Résultat du test de digue, profil 2-2 (rue des Hirondelles, La Rive Plage), conditions de la tempête de 1996.....	74
Figure III.40: Profil 3-36 de la digue digue de Courseulles-sur-Mer.....	75
Figure III.41: Résultat du test de digue sur la digue de la Plage (Ver-sur-Mer), Est, condition k10W.....	76
Figure III.42: Test de digue et débit de franchissement par paquets de mer calculées en conditions Xynthia (février 2010) au niveau de la digue de Ver-sur-Mer (profil s6p1).....	77
Figure III.43: Endommagement du revêtements de la digue par les paquets de mer, lors de la tempête Xynthia, février 2010 (source : DDTM Bayeux).....	78
Figure III.44: Franchissement de la digue de Ver-sur-Mer, tempête de mars 2013 (photo : S. Boulay).....	79
Figure III.45: Profils de la Plage, du Paisty-Vert et enrochement du marais de Ver-sur-Mer.....	79
Figure III.46: Résultat du test de digue au Paisty Vert, profil 6-32, condition k10W.....	80
Figure III.47: Relevés des profondeurs d'eau par la submersion marine lors de Xynthia (février 2010) à la Plage et au Paisty Vert à Ver-sur-Mer (source : DDTM de Bayeux).....	80
Figure III.48: Résultat du test de digue Le Pont Chaussé à Ver-sur-Mer, conditions de la tempête de 1996. 81	81
Figure III.49: Aspect de l'enrochement au Pont Chaussé à Ver-sur-Mer. Faible altimétrie de l'enrochement et signes de franchissement par la mer assez fréquent : plage à galets en crête d'ouvrage et ligne de végétation poussée en arrière (photo AGR & IMDC, 2013).....	82
Figure III.50: Profils à Asnelles, Roseau plage et digue d'Asnelles.....	83
Figure III.51: Franchissements par paquets de mer et submersion marine sur la digue d'Asnelles (photo prise en novembre 2013 au niveau de la rue du Débarquement, transmise par la DDTM Bayeux).....	83
Figure III.52: Profils de la Guerre, la Fontaine Saint-Côme et Arromanches.....	84

. Figure III.53: Résultat du test de digue, digue/enrochement de La Guerre (profil 11-6), condition k10W.....	85
Figure III.54: Résultat du test de digue, Pérré d'Arromanches-les-Bains, condition de la tempête de 1996.....	86
Figure III.55: Profil remblai de Cabourg.....	92
Figure III.56: Résultat du test de digue, remblai de Cabourg, couple k10 conditions d'Ouest (T100W k1).....	93
Figure III.57: Profil Parking Franceville-Merville.....	94
Figure III.58: Profil parking Bd. Wattier à Franceville-Merville-Plage, conditions T100 Ouest, couple 5.....	94
Figure III.59: Profils plage de Riva Bella ²	95
Figure III.60: Résultat du test de digue, sur la plage de Riva Bella (Oustreham), faible débit de franchissement en conditions historiques de la tempête de février 1996.....	96
Figure III.61: Profils du remblai de Hermanville.....	97
Figure III.62: Résultat du test de digue, avenue Fichot à Hermanville-sur-Mer, conditions historiques de la tempête de 1996.....	97
Figure III.63: Résultat du test de digue, Pérré d'Arromanches-les-Bains, condition de la tempête de 1996.....	98
Figure IV.1: Emprise du modèle morphodynamique, ligne de référence (en noire), trait de côte initial (en rouge) et entrées de houle (points jaunes).....	103
Figure IV.2: Identification des zones à risque d'érosion côtière (IFREMER, 2013).....	104
Figure IV.3: Évolution du trait de côte entre 1880 et 2005 d'après le rapport ACTIMAR (2010).....	106
Figure IV.4: Résultat du modèle morphodynamique : secteur Dives – Orne.....	107
Figure IV.5: Résultat du modèle morphodynamique : secteur Bessin.....	108
Figure IV.6: Zone érosive au niveau entre Roseau Plage (Asnelles) et Le Paisty Vert (Ver-sur-Mer) : trait noir : côte initiale, trait rouge côte à échéance 50 ans.....	109
Figure IV.7: Comparaison du trait de côte actuel (noir) et à échéance 50 ans (rouge) au niveau du Port de Courseulles-sur-Mer : accrétion de la dune de Courseulles, érosion à l'Est du port.....	110
Figure V.1: Test de digue référence +20cm, profil s1p5.....	122
Figure V.2: Test de digue référence +20cm, profil s1p10.....	123
Figure V.3: Test de digue référence +20cm, profil s2p2.....	124
Figure V.4: Test de digue référence +20cm, profil s2p5.....	125
Figure V.5: Test de digue référence +20cm, profil s3p36.....	126
Figure V.6: Test de digue référence +20cm, profil s6p1.....	127
Figure V.7: Test de digue référence +20cm, profil s6p14.....	128
Figure V.8: Test de digue référence +20cm, profil s6p26.....	129
Figure V.9: Test de digue référence +20cm, profil s6p32.....	130
Figure V.10: Test de digue référence +20cm, profil s7p24.....	131
Figure V.11: Test de digue référence +20cm, profil s9p7.....	132
Figure V.12: Test de digue référence +20cm, profil s10p1.....	133
Figure V.13: Test de digue référence +20cm, profil s10p6.....	134
Figure V.14: Test de digue référence +20cm, profil s11p6.....	135
Figure V.15: Test de digue référence +20cm, profil s11p3.....	136
Figure V.16: Test de digue référence +20cm, profil s11p6.....	137
Figure V.17: Test de digue référence +20cm, profil s11p14.....	138
Figure V.18: Test de digue référence +20cm, profil s13p9.....	139
Figure V.19: Test de digue référence +60cm, profil s1p5.....	140
Figure V.20: Test de digue référence +60cm, profil s1p10.....	141
Figure V.21: Test de digue référence +60cm, profil s2p2.....	142
Figure V.22: Test de digue référence +60cm, profil s2p5.....	143
Figure V.23: Test de digue référence +60cm, profil s3p36.....	144
Figure V.24: Test de digue référence +60cm, profil s6p1.....	145
Figure V.25: Test de digue référence +60cm, profil s6p14.....	146
Figure V.26: Test de digue référence +60cm, profil s6p26.....	147
Figure V.27: Test de digue référence +60cm, profil s6p32.....	148
Figure V.28: Test de digue référence +60cm, profil s7p24.....	149
Figure V.29: Test de digue référence +60cm, profil s9p7.....	150
Figure V.30: Test de digue référence +60cm, profil s10p1.....	151
Figure V.31: Test de digue référence +60cm, profil s10p6.....	152
Figure V.32: Test de digue référence +60cm, profil s11p3.....	153
Figure V.33: Test de digue référence +60cm, profil s11p14.....	154
Figure V.34: Test de digue référence +60cm, profil s13p9.....	155

Figure V.35: Test de digue condition T10, profil s1p5.....	156
Figure V.36: Test de digue condition T10, profil s1p10.....	156
Figure V.37: Test de digue condition T10, profil s2p2.....	157
Figure V.38: Test de digue condition T10, profil s2p5.....	158
Figure V.39: Test de digue condition T10, profil s3p36.....	159
Figure V.40: Test de digue condition T10, profil s6p1.....	160
Figure V.41: Test de digue condition T10, profil s6p14.....	161
Figure V.42: Test de digue condition T10, profil s6p26.....	162
Figure V.43: Test de digue condition T10, profil s6p32.....	163
Figure V.44: Test de digue condition T10, profil s7p24.....	164
Figure V.45: Test de digue condition T10, profil s9p7.....	165
Figure V.46: Test de digue condition T10, profil s10p1.....	166
Figure V.47: Test de digue condition T10, profil s10p6.....	167
Figure V.48: Test de digue condition T10, profil s11p3.....	168
Figure V.49: Test de digue condition T10, profil s11p6.....	169
Figure V.50: Test de digue condition T10, profil s11p14.....	170
Figure V.51: Test de digue condition T10, profil s13p9.....	171
Figure V.52: Test de digue condition T1000, profil s1p5.....	172
Figure V.53: Test de digue condition T1000, profil s1p10.....	173
Figure V.54: Test de digue condition T1000, profil s2p2.....	174
Figure V.55: Test de digue condition T1000, profil s3p36.....	175
Figure V.56: Test de digue condition T1000, profil s6p1.....	176
Figure V.57: Test de digue condition T1000, profil s6p14.....	177
Figure V.58: Test de digue condition T1000, profil s6p26.....	178
Figure V.59: Test de digue condition T1000, profil s6p32.....	179
Figure V.60: Test de digue condition T1000, profil s7p24.....	180
Figure V.61: Test de digue condition T1000, profil s9p7.....	181
Figure V.62: Test de digue condition T1000, profil s10p1.....	182
Figure V.63: Test de digue condition T1000, profil s10p6.....	183
Figure V.64: Test de digue condition T1000, profil s11p3.....	184
Figure V.65: Test de digue condition T1000, profil s11p6.....	185
Figure V.66: Test de digue condition T1000, profil s11p14.....	186
Figure V.67: Test de digue condition T1000, profil s13p9.....	187
Figure V.68: Test de digue référence+20cm, profil s3p6.....	188
Figure V.69: Test de digue référence+20cm, profil s4p93.....	189
Figure V.70: Test de digue référence+20cm, profil s10p2.....	190
Figure V.71: Test de digue référence+20cm, profil s10p10.....	191
Figure V.72: Test de digue référence+20cm, profil s11p32.....	192
Figure V.73: Test de digue référence+20cm, profil s11p37.....	193
Figure V.74: Test de digue référence+20cm, profil s11p44.....	194
Figure V.75: Test de digue référence+60cm, profil s3p6.....	195
Figure V.76: Test de digue référence+60cm, profil s4p93.....	196
Figure V.77: Test de digue référence+60cm, profil s10p2.....	197
Figure V.78: Test de digue référence+60cm, profil s10p10.....	198
Figure V.79: Test de digue référence+60cm, profil s11p32.....	199
Figure V.80: Test de digue référence+60cm, profil s11p37.....	200
Figure V.81: Test de digue référence+60cm, profil s11p44.....	201
Figure V.82: Test de digue condition fréquente (T10), profil s3p6.....	202
Figure V.83: Test de digue condition fréquente (T10), profil s4p93.....	203
Figure V.84: Test de digue condition fréquente (T10), profil s10p2.....	203
Figure V.85: Test de digue condition fréquente (T10), profil s10p10.....	203
Figure V.86: Test de digue condition fréquente (T10), profil s11p32.....	204
Figure V.87: Test de digue condition fréquente (T10), profil s11p37.....	204
Figure V.88: Test de digue condition fréquente (T10), profil s11p44.....	205
Figure V.89: Test de digue condition extrême (T1000), profil s3p6.....	206
Figure V.90: Test de digue condition extrême (T1000), profil s4p93.....	207
Figure V.91: Test de digue condition extrême (T1000), profil s10p2.....	208
Figure V.92: Test de digue condition extrême (T1000), profil s10p2.....	209

Figure V.93: Test de digue condition extrême (T1000), profil s10p10.....	210
Figure V.94: Test de digue condition extrême (T1000), profil s11p32.....	211
Figure V.95: Test de digue condition extrême (T1000), profil s11p37.....	212
Figure V.96: Test de digue condition extrême (T1000), profil s11p44.....	213
Figure 1: Recul ponctuel, marais de l'Edit, conditions de référence +60cm NNE.....	214
Figure 2: Recul ponctuel, marais de l'Edit, conditions de référence +60cm Ouest.....	215
Figure 3: Recul ponctuel, marais de l'Edit, conditions fréquentes (T10) NNE.....	216
Figure 4: Recul ponctuel, marais de l'Edit, conditions fréquentes (T10) Ouest.....	217
Figure 5: Recul ponctuel, marais de l'Edit, conditions extrêmes (T1000) NNE.....	218
Figure 6: Recul ponctuel, marais de l'Edit, conditions extrêmes (T1000) Ouest.....	219
Figure 1: Recul ponctuel, marais de Graye et Ver, conditions de référence +60cm, NNE.....	220
Figure 2: Recul ponctuel, marais de Graye et Ver, conditions de référence +60cm, Ouest.....	221
Figure 3: Recul ponctuel, marais de Graye et Ver, conditions fréquentes (T10), NNE.....	222
Figure 4: Recul ponctuel, marais de Graye et Ver, conditions fréquentes (T10), Ouest.....	223
Figure 5: Recul ponctuel, marais de Graye et Ver, conditions extrêmes (T1000), NNE.....	224
Figure 6: Recul ponctuel, marais de Graye et Ver, conditions extrêmes (T1000), Ouest.....	225
Figure 1: Recul ponctuel, marais de Ver, conditions de référence +60cm, NNE.....	226
Figure 2: Recul ponctuel, marais de Meuvaines, conditions de référence +60cm, NNE.....	227
Figure 3: Recul ponctuel, marais de Ver, conditions de référence +60cm, Ouest.....	228
Figure 4: Recul ponctuel, marais de Meuvaines, conditions de référence +60cm, Ouest.....	229
Figure 5: Recul ponctuel, marais de Ver, conditions fréquentes (T10), NNE.....	230
Figure 6: Recul ponctuel, marais de Ver, conditions fréquentes (T10), Ouest.....	231
Figure 7: Recul ponctuel, marais de Meuvaines, conditions fréquentes (T10), NNE.....	232
Figure 8: Recul ponctuel, marais de Meuvaines, conditions fréquentes (T10), Ouest.....	233
Figure 9: Recul ponctuel, marais de Ver, conditions extrêmes (T1000), NNE.....	234
Figure 10: Recul ponctuel, marais de Ver, conditions extrêmes (T1000), Ouest.....	235
Figure 11: Recul ponctuel, marais de Meuvaines, conditions extrêmes (T1000), NNE.....	236
Figure 12: Recul ponctuel, marais de Meuvaines, conditions extrêmes (T1000), Ouest.....	237
Figure 1: Recul ponctuel, Pointe de Cabourg, conditions de référence +60cm, NNE.....	238
Figure 2: Recul ponctuel, Pointe de Cabourg, conditions de référence +60cm, Ouest.....	239
Figure 3: Recul ponctuel, Pointe de Cabourg, conditions fréquentes (T10), NNE.....	240
Figure 4: Recul ponctuel, Pointe de Cabourg, conditions fréquentes (T10), Ouest.....	241
Figure 5: Recul ponctuel, Pointe de Cabourg, conditions extrêmes (T1000), NNE.....	242
Figure 6: Recul ponctuel, Pointe de Cabourg, conditions extrêmes (T1000), Ouest.....	243
Figure 1: Recul ponctuel, dune de Varaville et Merville-Franceville-pl., référence +60cm, NNE.....	244
Figure 2: Recul ponctuel, dune de Varaville et Merville-Franceville-pl., référence +60cm, Ouest.....	245
Figure 3: Recul ponctuel, dune de Varaville et Merville-Franceville-pl., conditions fréquentes (T10), NNE.....	246
Figure 4: Recul ponctuel, dune de Varaville et Merville-Franceville-pl., conditions fréquentes (T10), Ouest.....	247
Figure 5: Recul ponctuel, dune de Varaville et Merville-Franceville-pl., conditions extrêmes (T1000), NNE.....	248
Figure 6: Recul ponctuel, dune de Varaville et Merville-Franceville-pl., conditions extrêmes (T1000), Ouest.....	249
Figure 1: Recul ponctuel, dune Riva Bella (Ouistreham), référence +60cm, NNE.....	250
Figure 2: Recul ponctuel, dune Riva Bella (Ouistreham), référence +60cm, Ouest.....	251
Figure 3: Recul ponctuel, dune Riva Bella (Ouistreham), conditions fréquentes (T10), NNE.....	252
Figure 4: Recul ponctuel, dune Riva Bella (Ouistreham), conditions fréquentes (T10), Ouest.....	253
Figure 5: Recul ponctuel, dune Riva Bella (Ouistreham), conditions extrêmes (T1000), NNE.....	254
Figure 6: Recul ponctuel, dune Riva Bella (Ouistreham), conditions extrêmes (T1000), Ouest.....	255
Figure 1: Recul ponctuel, dune Colleville-My., référence +60cm, NNE.....	256
Figure 2: Recul ponctuel, dune Colleville-My., référence +60cm, Ouest.....	257
Figure 3: Recul ponctuel, dune Colleville-My., conditions fréquentes (T10), NNE.....	258
Figure 4: Recul ponctuel, dune Colleville-My., conditions fréquentes (T10), Ouest.....	259
Figure 5: Recul ponctuel, dune Colleville-My., conditions extrêmes (T1000), NNE.....	260
Figure 6: Recul ponctuel, dune Colleville-My., conditions extrêmes (T1000), Ouest.....	261

Tableaux

Calibration des tempêtes du secteur Nord – Nord-Est.....	12
Paramétrage du modèle de houle, conditions extrêmes Nord – Nord-Est.....	13
Sélection de tempêtes d'Ouest pour la calibration du modèle.....	15
Paramétrage du modèle de houle, conditions extrêmes d'Ouest.....	16
: Paramètres du test de sensibilité à la hauteur de houle (entrées au large).....	20
Paramètres du test de sensibilité à la direction moyenne de houle au large.....	24
: Paramètres du test de sensibilité au niveau d'eau.....	27
Simulations extrêmes conditions d'Ouest.....	31
Simulations extrêmes, conditions du Nord – Nord-Est.....	32
: Surcote de houle au large (en m), conditions extrêmes du Nord – Nord-Est.....	37
: Surcote de houle au large (en m), conditions extrêmes d'Ouest.....	38
: Surcote de la houle : valeurs maximales par section homogène dans les conditions de référence (+20 cm).	39
Conditions du test de dunes : marais de l'Edit.....	44
Conditions du test de dunes : marais de Graye – Ver-sur-Mer.....	45
Conditions du test de dunes : marais de Ver-sur-Mer et Meuvaines.....	47
Profils étudiés avec le test de digue, secteur Bessin.....	69
Débits de franchissement par paquets de mer : conditions de référence NNE (T100N+20cm).....	70
Débits de franchissement par paquets de mer : conditions de référence Ouest (T100W+20cm).....	71
Débits de franchissement par paquets de mer : conditions de référence (T100W+60cm).....	87
Débits de franchissement critiques, secteur Bessin (T10).....	88
Débits de franchissement par paquets de mer critiques : millénaires (T1000).....	89
: Profils du test de digue, secteur Dives – Orne.....	90
: Débits de franchissement par paquets de mer : conditions de référence Nord (T100N+20 cm).....	90
: Débits de franchissement par paquets de mer : conditions de référence Ouest (T100W+20 cm).....	91
: Débits de franchissement par paquets de mer : conditions de référence Ouest (T100W+60 cm).....	98
: Débits de franchissement par paquets de mer critiques : conditions décennales (T10).....	99
: Débits de franchissement par paquets de mer critiques : conditions millénaires (T1000).....	99
Paramètres du modèle morphodynamique.....	101
Recul moyen par section homogène du secteur Dives – Orne (modèle Litpack, sur 50 ans).....	111
Recul moyen par section homogène du secteur Bessin (modèle Litpack sur 50 ans).....	111
Hauteurs de houle par section homogène sur le secteur Bessin, conditions du NNE, T100.....	118
Hauteurs de houle par section homogène sur le secteur Bessin, conditions d'Ouest, T100.....	119
Hauteurs de houle par section homogène sur le secteur Dives-Orne, conditions du NNE, T100.....	120
Hauteurs de houle par section homogène sur le secteur Dives-Orne, conditions d'Ouest, T100.....	120

PPRL Bessin & Dives-Orne

Rapport de modélisation Houles, test de dune et de digue, transport sédimentaire

I. Introduction

I.1. Contexte de l'étude

La Direction Départementale des Territoires du Calvados a en charge l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) sur le département. Elle a confié la réalisation des études techniques à Alp'Géorisques et IMDC.

Le PPRL est un cas particulier du Plan de Prévention des Risques Naturels prévisibles (PPRN) mis en place à la suite de la tempête meurtrière et très dévastatrice Xynthia qui a fortement impacté le littoral français entre le 26 février et le 1^{er} mars 2010 (59 morts et près de deux milliards d'euros de dommages).

I.2. Objet de l'étude

L'étude doit aboutir à une caractérisation précise des aléas littoraux et inondations terrestres présents sur le territoire de ces communes ainsi qu'à l'établissement de cartographies en vue de l'établissement de PPRL couvrant la zone étudiée.

I.3. Démarche de l'étude

La mission comporte **six phases** :

Phase 1 : Analyse du fonctionnement du littoral sur l'ensemble de la zone d'étude.

L'analyse du site permet de connaître :

- les phénomènes naturels entant en jeu sur le périmètre d'étude ;
- l'historique des événements majeurs et de leurs conséquences ;
- la description du trait de côte (recensement des ouvrages de défense notamment).

Une carte informative des phénomènes naturels sera ainsi élaborée. Cette analyse sera réalisée sur l'ensemble du littoral de la zone d'étude. La compréhension du fonctionnement des secteurs géographiques permettra de choisir les hypothèses et la méthode de caractérisation des aléas les plus adaptées.

Phase 2 : Caractérisation et cartographie des aléas littoraux par secteur

Cette phase 2 consiste à :

- définir l'événement de référence ;
- caractériser l'aléa de submersion marine ;
- caractériser l'aléa d'évolution du trait de côte et d'avancées dunaires ;
- définir les phénomènes concomitants d'inondation au niveau des cours d'eau côtiers.

Cette phase permet ainsi d'élaborer la carte des aléas.

Phase 3 : Définition et cartographie des enjeux.

Cette phase consiste à :

- Définir les enjeux surfaciques (type d'occupation du sol, enjeux potentiels, enjeux fonctionnels, zones protégées par un ouvrage) ;
- Définir les enjeux stratégiques (enjeux opérationnels, à sensibilité particulière, et spécifiques) ;
- Relever les infrastructures de transport.

Une carte des enjeux est ainsi établie. L'analyse de cette carte permet d'apprécier la population exposée avec une précision satisfaisante.

Le croisement entre la cartes des enjeux et la carte des aléas permet de produire la carte des enjeux exposés.

Phase 4 : Cartographie de zonage réglementaire et proposition de règlement.

La cartographie de zonage réglementaire peut définir :

- Une zone inconstructible ;
- Une zone de projet possible sous maîtrise collective (le cas échéant) ;
- Une zone constructible sous conditions.

Une carte est établie afin de distinguer les zones naturelles exposées au phénomène de référence, les zones urbaines classiques et à enjeux fort en fonction du niveau d'aléa.

Le règlement précise en particulier :

- La définition des objectifs ;
- Les principes généraux ;
- Les interdictions ;
- Les prescriptions ;
- Les recommandations ;
- Les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde.

Phase 5 : Consultation – Rédaction des pièces.

Cette phase consiste à rédiger une note de présentation et réaliser le montage des dossiers :

- Le rapport de présentation ;
- La cartographie des aléas ;
- La cartographie des enjeux ;
- Le zonage réglementaire ;
- Le projet de règlement.

Phase 6 : Assistance à la maîtrise d'ouvrage avant et après l'enquête publique

I.4. Structure du rapport

Le présent document traite les différentes modélisations préliminaires aux calculs de submersion marine pour le PPRL. Le modèle de propagation de houle est décrit au chapitre II.. L'évaluation des défenses côtières (digues, dunes) avec le « test de digues » et le « test de dunes » est effectuée au chapitre III.. Le modèle morphodynamique (évolution du trait de côte à long terme) est décrit au chapitre IV..

II. Modèle de houle

L'analyse statistique des conditions limites (pour la définition des événements de référence) donne la hauteur de la houle au large. Un modèle de houle est nécessaire pour transformer les houles au large vers la côte afin d'obtenir les conditions de houle extrêmes et fréquentes le long de la côte pour chaque zone littorale des secteurs « Bessin » et « Dives – Orne ». Les conditions de houle extrême sont utilisées pour les calculs d'érosion des dunes et plages (test de dunes) et les calculs de franchissement (test de digues, voir chapitre II.). Le climat de houle fréquent est utilisé dans le modèle de recul de trait de côte à long terme (voir chapitre IV.).

II.1. Le modèle Swan

Swan est un modèle de houle spectral de la troisième génération qui calcule les états de mer générés par le vent dans les régions côtières et les eaux intérieures à partir des conditions de vent, de fond et de courant. Le modèle Swan a été développé par l'université de technologie de Delft, aux Pays-Bas.

Ce modèle, particulièrement approprié pour le calcul de la transformation des houles du large vers les côtes, prend en compte plusieurs processus physiques :

- la propagation de la houle dans le temps et dans l'espace, réfraction due aux courants et à la profondeur, déplacement de fréquence dû aux courants et à la marée ;
- la redistribution de l'énergie de la houle sur le spectre par les interactions non-linéaires comprenant l'interaction de trios et quatre ondes (triades et quadruplets) ;
- le frottement sur le fond et le déferlement dû la profondeur et à la cambrure de houle¹ ;
- la surélévation du niveau moyen dû à la houle ;
- la transmission à travers les obstacles et la réflexion par des obstacles ;
- la diffraction autour des structures/obstacles.

Le modèle Swan est souvent utilisé pour des projets de protection côtière et sur de différentes échelles. Les différents paramètres du modèle, permettent de le caler à plusieurs morphologies côtières. Ces expériences passées avec le modèle Swan, permettent d'avoir un bon contrôle sur les différents paramètres et types de calcul à effectuer pour le présent PPRL.

1 La cambrure est le rapport entre la hauteur et la longueur d'une onde de houle (wave steepness).

Les calculs Swan peuvent être effectués sur une grille régulière ou curviligne comprenant un emboîtement dans des conditions stationnaires et non stationnaires. Swan fournit les valeurs suivantes :

- le spectre de houle mono ou bidimensionnel ;
- la hauteur significative, la période de pic, la période moyenne ;
- la direction des houles et la diffusion directionnelle ;
- la vitesse orbitale près du fond ;
- l'énergie dissipée ;
- la force induite par la houle à partir du gradient des contraintes de radiation ;
- la surcote (*set-up*) de la houle (« wave set-up »).

II.2. Bathymétrie et maillage

Un modèle Swan est mis en place, couvrant l'ensemble de la baie de la Seine, de Saint-Vaast-la-Hougue au Havre, jusque juste au Sud du port d'Antifer. Le modèle couvre une largeur de 100 km et une distance Nord – Sud de 37 km. Le maillage de ce modèle a une résolution de 1000 m (maille rectangulaire).

Un second modèle, plus détaillé, est imbriqué dans ce modèle général ; il couvre la zone d'intérêt (zone comprise entre Port-en-Bessin et Blonville-sur-Mer, délimitée par un contour noir sur la figure II.1). Ce deuxième modèle, dont la résolution spatiale est de 200 m (maille rectangulaire), est destiné à représenter de manière détaillée la propagation et la génération des houles vers les côtes.

La bathymétrie utilisée pour le modèle de houle (voir figure II.1) est issue de plusieurs bases de données bathymétriques fournies par la direction départementale des territoires du Calvados (DDTM14) et Ports Normands Associés (PNA), ainsi que de la base de données C-Map (construit à partir de sondages de navires). Cette bathymétrie est interpolée sur les maillages des deux modèles décrits ci-dessus (maille de 1000 m sur 100 m pour le modèle général de la Baie de la Seine et maille de 200 m sur 200 sur 200 pour le modèle côtier du PPRL).

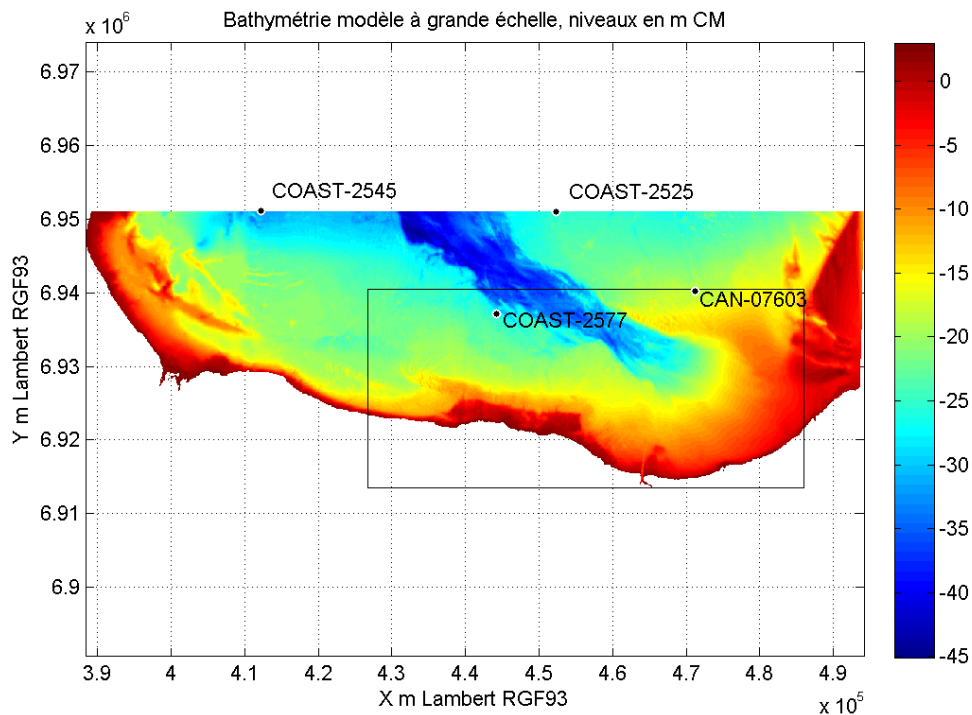


Figure II.1: Emprise du modèle à grande échelle et bathymétrie utilisée (en m CM).

II.3. Points étudiés

Les deux points d'entrée du modèle grossier sont les points COAST-2525 et COAST-2545 de la base ANEMOC (complétée avec les données de OCEANOR, voir rapport des conditions hydrodynamiques, IMDC, 2014b) sont indiqués sur la figure II.1. Les entrées du modèle imbriqué sont calculées par le modèle grossier sur ces limites.

Un troisième point de la base ANEMOC (COAST-2577, voir figure II.2) est utilisé comme point de comparaison et de calage du modèle, et se trouve entre les points d'entrée et la côte, environ au centre de la zone d'étude.

Sur la limite nord du modèle imbriqué se trouve la bouée (non directionnelle) de la campagne CANDHIS CAN-07603. Deux autres bases de données de mesures de houle, fournies par le CREC, se trouvent en bordure littorale, l'une au large de Ouistreham et l'autre près de la côte de Luc-sur-Mer (figure II.2).

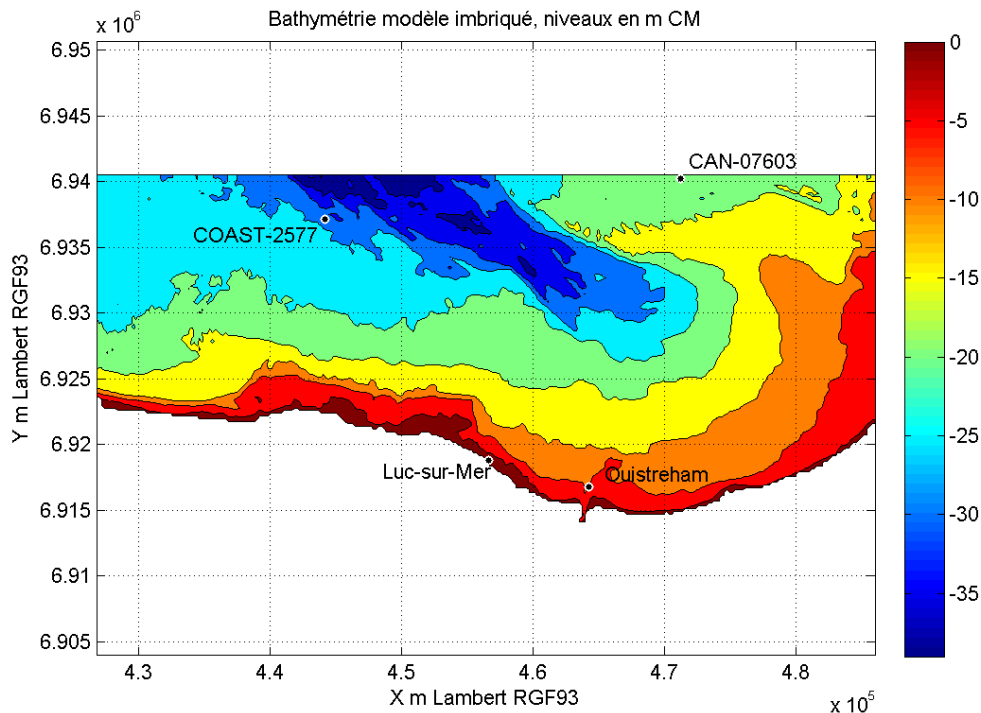


Figure II.2: Zoom du modèle détaillé, avec indication des différents points étudiés

II.4. Paramètres

Le modèle de houle est utilisé pour simuler les conditions fréquentes et extrêmes de houle près de la côte. Les conditions extrêmes sont définies à partir des couples de niveaux d'eau extrêmes et de la hauteur de houle extrême (en fonction de leur probabilité d'occurrence, voir rapport AGR & IMDC 2014b). Les « conditions fréquentes » sont définies à partir d'une année "moyenne" au large (voir chapitre IV).

Hormis les niveaux d'eau et les hauteurs de houle au large, plusieurs autres forçages du modèle sont à paramétrer, notamment la direction de la houle, la période de la houle et la vitesse de vent. Ces paramètres sont fortement corrélés aux hauteurs de houles. L'objectif de ce paragraphe est de déterminer les directions et périodes de houle ainsi que les vitesses de vent correspondant aux houles extrêmes étudiées pour le PPRL.

Ce calcul est fait à partir de régressions entre les différents paramètres (vitesse de vent, période et direction de houle) d'une part et la hauteur de houle d'autre part. Les relations trouvées sont ensuite extrapolées dans le domaine des valeurs extrêmes.

Dans l'analyse statistique les houles extrêmes sont définies par rapport au point COAST-2525 (figure II.1). Les conditions de houle en ce point sont divisées en conditions d'Ouest d'une part et en conditions de Nord Nord-est d'autre part. Cette division en deux secteurs est toujours reprise pour le modèle de houle.

II.4.1. Période moyenne de houle

La période de houle est un paramètre qui indique la longueur d'une onde de houle (temps entre deux crêtes de houle). Une houle océanique (*swell*), générée par un champ de vent lointain et s'étant propagée sur une longue distance avant d'atteindre les côtes, est caractérisée par une période longue (supérieure à 15 s). Ces houles contiennent beaucoup d'énergie – cette énergie dépend de la hauteur de houle – et ne se transforment pas, à l'approche des côtes, comme les clapots plus courts, générés localement ou moins loin de la côte par le vent. Les houles océaniques d'Ouest entrent dans la Baie de la Seine en contournant les côtes du Cotentin, et se font sentir le long des côtes du Calvados.

En cas de tempête locale, le vent qui génère les vagues sur une certaine distance (dites *fetch*) domine le champ de houle. Dans la Baie de La Seine, ces distances *fetch* sont limitées par les côtes du Cotentin à l'Ouest, par la Côte d'Opale à l'Est et par les côtes du Royaume-Uni au Nord. Le secteur étudié du Calvados est donc particulièrement vulnérable au vent du Nord-Nord-Est et Nord-Est.

La relation entre les hauteurs de houle et la période moyenne de la houle au point d'entrée au large COAST-2525 est montrée dans la figure II.3. Deux courbes de régression sont établies, captant la moyenne ainsi que la borne supérieure du gros des points. Ces relations sont valables pour les deux secteurs étudiés (Ouest et Nord – Nord-Est).

Comme approche sécuritaire, la limite supérieure est retenue pour les conditions extrêmes. Ainsi, la période moyenne des houles extrêmes pour le PPRL est obtenu à partir de l'équation :

$$T_m = 4,73 \times H_{m0}^{0,34} + 2,0$$

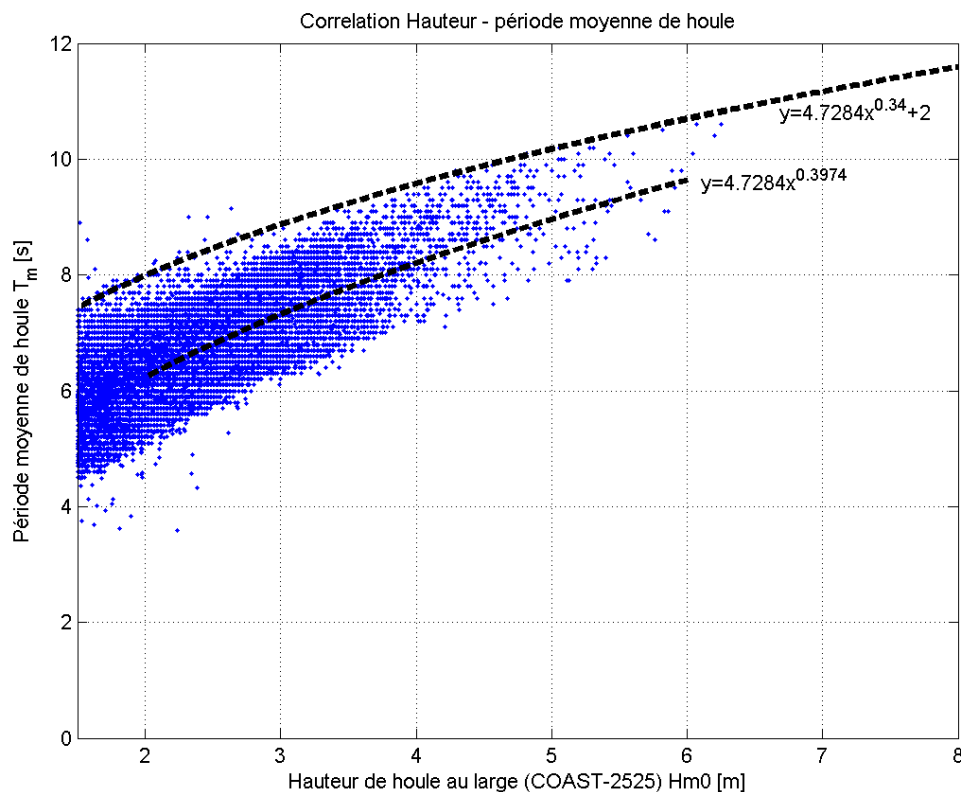


Figure II.3: Régression entre la période de moyenne de houle et les hauteurs significatives de houle.

II.4.2. Direction moyenne

Les conditions d'Ouest (W) correspondent aux houles provenant de 245° à 345°N, et les conditions du Nord – Nord-Est aux houles provenant du secteur de 345° à 70°N au large. Pour chaque secteur, les plus hautes hauteurs de houle des suites temporelles sont sélectionnées ($H_{m0} > 3$ m), et leurs directions de houle correspondantes sont considérées. Il en résulte que pour ces plus hautes houles :

- la direction moyenne du secteur Ouest est de 281.0°N avec un écart type de 14.7°. 95 % des houles d'Ouest proviennent du secteur 252 – 310°N ;
- la direction moyenne du secteur Nord – Nord-Est est de 30.1°N avec un écart type de 19.7°. 95 % des houles du Nord (NNE) proviennent du secteur 351° - 69.5°N.

Il est constaté que l'écart des directions de houle est plus grand pour les conditions du Nord – Nord-Est. Les 95 % des directions les plus fréquentes couvrent presque l'ensemble du secteur Nord – Nord-Est considéré.

Les tests de sensibilité du modèle aux directions de houle et le choix des directions retenues pour la simulation des extrêmes sont présentés au chapitre II.6.2..

II.4.3. Vent extrême

Le vent est un forçage important du modèle de houle. Les hauteurs de houle au point COAST-2525 sont corrélées aux vitesses et directions de vent. La distance *fetch* sur lequel le vent peut générer les houles diffère entre les différentes directions de vent (et de houle). La relation houle – vent varie donc entre les directions de vent et houle considérées. La relation est établie pour les deux secteurs (W et NNE) séparément.

Les figures II.4 et II.5 montrent les points de données de hauteur de houle et de vitesse de vent au large des deux secteurs. Les courbes de régression montrent une tendance à la hausse des hauteurs de houle, avec la vitesse du vent.

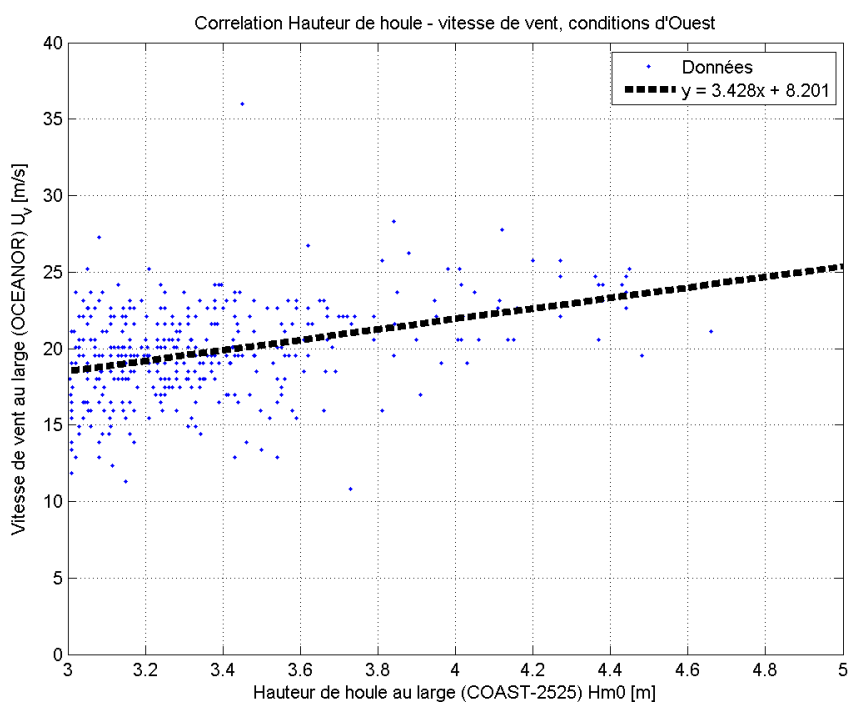


Figure II.4: Régression entre la houle et le vent extrême, conditions d'Ouest.

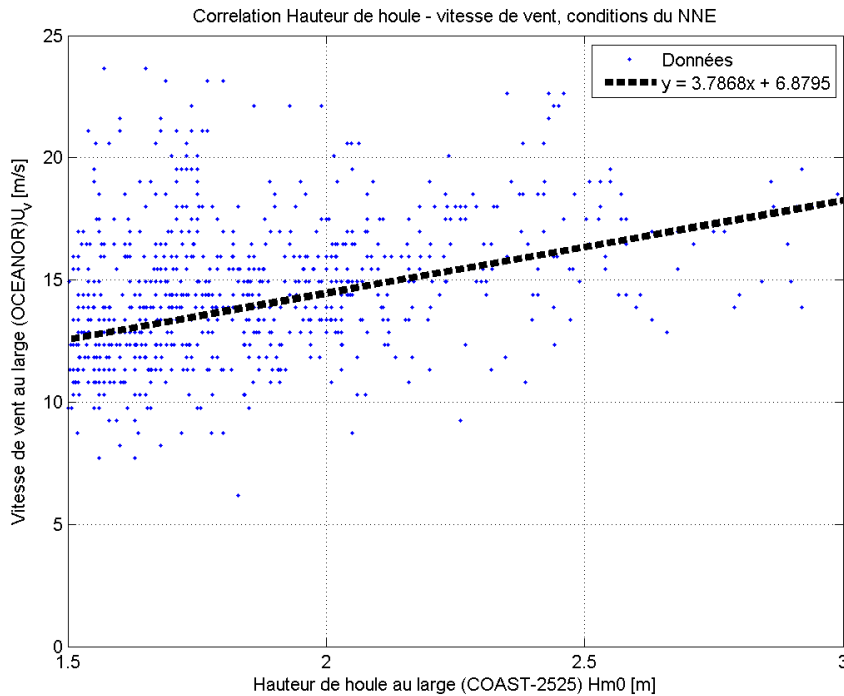


Figure II.5: Régression entre la houle et le vent extrême, conditions du Nord – Nord-Est.

Ces régressions moyennes sont utilisées pour l’extrapolation des vitesses de vent dans le domaine extrême. Les vitesses de vent en conditions extrêmes sont donc calculées de manière suivante :

$$V_{\text{vent, Ouest}} = 3,43 * H_{m0, \text{Ouest}} + 8,20$$

$$V_{\text{vent, NNE}} = 3,79 * H_{m0, \text{NNE}} + 6,88$$

II.4.4. Réduction des vents d’Ouest

Le vent d’Ouest et Sud-Ouest à la côte du Calvados est moins intense qu’au large. Ce phénomène s’explique par le fait que ce vent terrestre subit un plus grand frottement sur terre comparé aux autres secteurs directionnels (par exemple le vent marin du Nord).

Ce phénomène est important à prendre en compte dans le modèle, pour mieux simuler les houles en bordure littorale. Une relation entre le vent d’Ouest à Sud-Ouest entre le large (OCEANOR) et la côte (les mesures à Luc-Sur-Mer) est établie, afin d’appliquer une réduction de ces vents dans le modèle détaillé. La relation est montrée dans la figure II.6. La régression moyenne et les bornes de l’intervalle de confiance de 95 % sont déterminés. Pour la réduction de la vitesse de vent du modèle imbriqué, la régression moyenne est utilisée :

$$V_{\text{vent, côte}} = 0.22 * V_{\text{vent, large}} + 1.65 \text{ [m/s]}$$

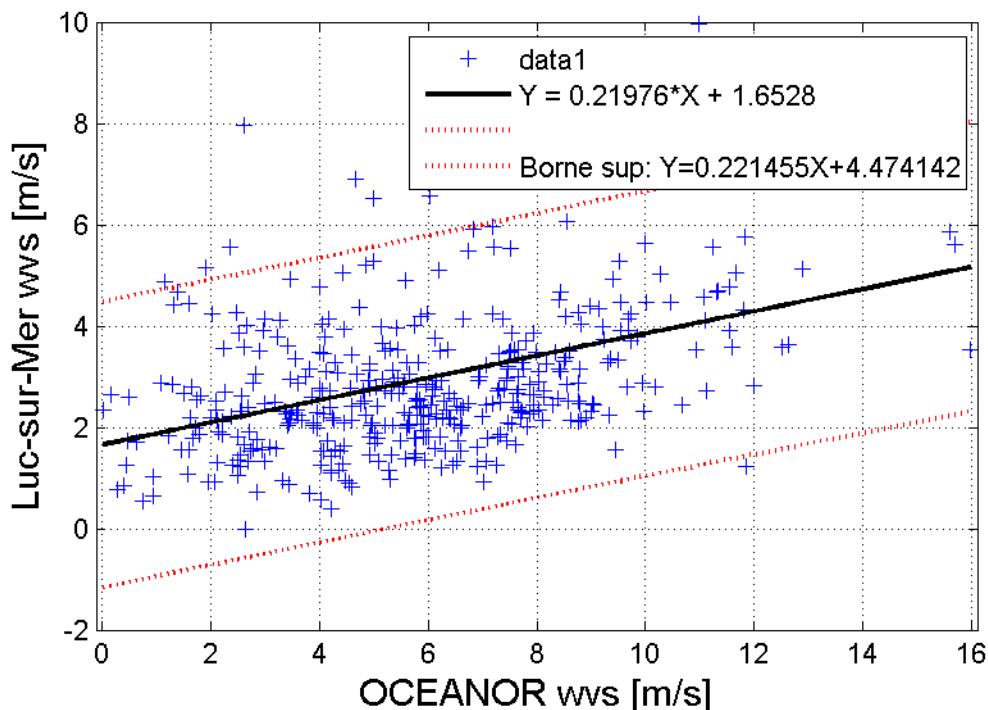


Figure II.6: Corrélation entre le vent au large (OCEANOR) et en bordure littorale (Luc-sur-Mer) du secteur Ouest à Sud-Ouest : nuage de points et régression.

II.5. Calibration du modèle

Le modèle est calibré, en distinguant d'une part :

- les conditions d'Ouest,
- les conditions du Nord – Nord-Est ;

et d'autre part pour

- les conditions extrêmes des PPRL et TRI (périodes de retour 10, 100, 1000 ans),
- les conditions plus fréquentes, pour la modélisation de l'évolution du trait de côte.

Les conditions extrêmes sont calibrées ensemble (même réglage du modèle pour le T10, T100 et T1000).

Les points de calibration sont :

- Les points d'entrée COAST-2525 et COAST-2545 (suite temporelle étendue avec les données OCEANOR, voir infos analyse statistique). Ces deux points se trouvent sur la limite nord du modèle, à des distances de 20 et 30 km des côtes ;
- Le point ANEMOC COAST-2577, près de la borne nord du modèle détaillé imbriqué et à une distance d'environ 15 km, au large de Ver-sur-Mer ;
- Une bouée de mesures au large de Ouistreham (issue du CREC) à environ 1,6 km de la gare maritime de Ouistreham. Bien qu'effectuée sur une courte période (janvier 1994 – juillet 1995), ces mesures permettent de comparer les résultats au large et à la côte pour optimiser la transformation des houles vers la côte ;
- Une bouée de mesures exploitée à Luc-sur-Mer sur plusieurs périodes assez courtes (7-10/1997 ; 1-4/1998 ; 12/1998 – 2/1999 et 9-10/2006). La distance de la côte est estimée à 300 à 400 m.

II.5.1. Calibration des conditions extrêmes

II.5.1.1. Conditions du Nord – Nord-Est

Le secteur Nord – Nord-Est est défini entre 345 et 70°N, par rapport aux conditions de houle au large au point COAST-2525.

Pour la calibration des conditions de houle extrême de Nord – Nord-Est, on a utilisé les événements les plus extrêmes au large, dans les périodes chevauchantes avec les bouées de Luc-sur-Mer, de Ouistreham ou le point Candhis 07603 (voir figure II.1 et II.2). Vingt-cinq tempêtes sont ainsi retenues pour la calibration (voir tableau II.1).

Tableau II.1: Calibration des tempêtes du secteur Nord – Nord-Est.

Date	$H_{m0, \text{large}}$ [m]	Dir_{large} [°N]	$H_{m0, \text{CAN}}$ [m]	$H_{m0, \text{Ouist}}$ [m]	Dir_{Ouist} [°N]	$H_{m0, \text{Luc}}$ [m]	Dir_{Luc} [°N]
	COAST-2525		CAN07603	Ouistreham		Luc-sur-Mer	
8/10/1998	2.53	5	3.00				
18/09/2001	2.60	349 -3	2.78				
10/04/1994	2.10	1		2.61	355		
17/04/1994	2.54	28		2.61	351		
16/01/1994	1.79	21		1.69	350		
21/03/1994	0.80	18		1.31	358		
17/07/1994	1.11	42		1.09	7		
22/09/1994	1.71	44		1.10	43		
16/10/1994	1.60	48		1.13	358		
22/12/1994	1.09	33		1.33	349		
12/01/1995	2.12	349		2.13	350		
22/04/1995	1.91	39		1.63	4		
24/04/1995	1.15	4		1.17	344		
13/05/1995	1.82	11		2.05	360		
22/06/1995	0.77	35		1.34	17		
27/06/1995	1.17	36		1.39	350		
16/05/1996	1.68	43				1.61	32
10/07/1997	0.63	37				0.89	29
27/10/1997	1.63	44				1.37	30
20/01/1998	2.24	343				2.05	3
25/01/1998	2.11	37				1.62	37
22/03/1998	0.62	40				1.16	31
2/07/1998	1.19	42				1.37	30
2/09/1998	0.47	21				0.83	17
22/09/1998	1.11	43				1.02	20
9/02/1999	1.30	2				1.68	15
15/09/2006	1.04	355				1.24	12

Le paramétrage du modèle est résumé au chapitre Tableau II.2. Les résultats du modèle sont comparés aux mesures aux points de comparaison, dans le nuage de points de la figure II.8. Le modèle représente bien les ordres de grandeur, une surestimation des hauteurs de houle de 0.5 % est observée sur la base d'une régression.

L'écart entre le modèle et les mesures est constaté dans les deux directions (pas de sur – ou sous-estimation systématique). L'erreur quadratique moyenne sur les hauteurs de houle est de 0,28 m pour Ouistreham et 0,25 m à Luc-sur-Mer (sur des hauteurs de 1,0 m à 2,6 m). Les coefficients de corrélation respectifs sont de 0.85 et de 0.87.

Les résultats du modèle sont également comparés aux données de houle au point COAST-2577 de la base de données ANEMOC. Le résultat est montré dans la figure II.9. Un coefficient de corrélation est de 0,98 est obtenu et le nuage de points montre une bonne correspondance visuelle.

Dans le cadre du PPRL il est plus important d'estimer les houles en bordure littorale. De ce fait, nous avons choisi de garder la calibration par rapport aux points proches de la côte (Luc-sur-Mer et Ouistreham).

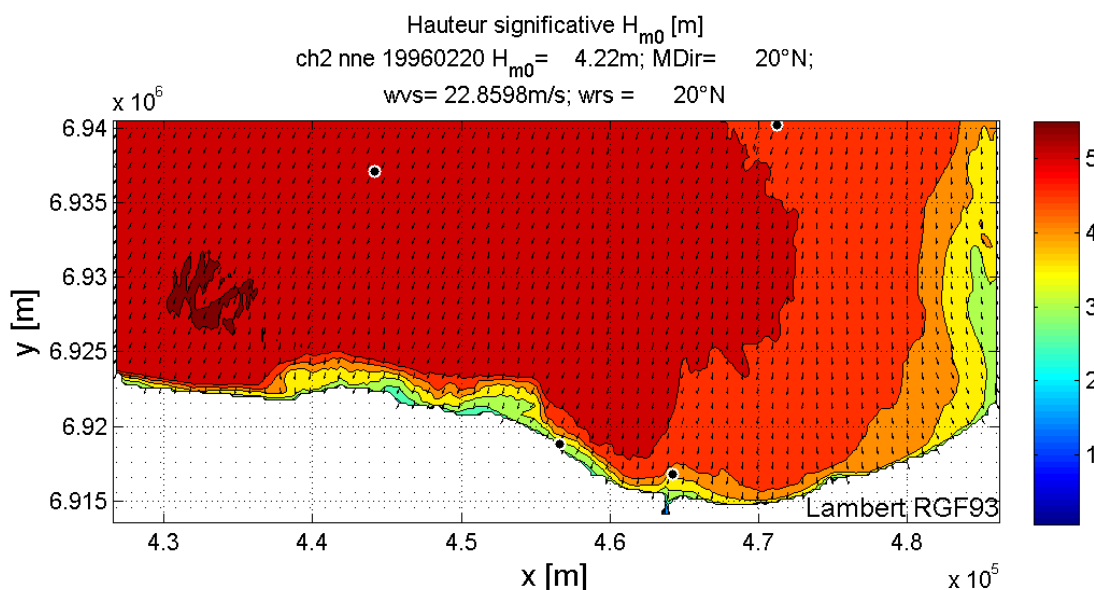


Figure II.7: Résultat caractéristique de la calibration des conditions du NNE, exemple d'une planche des hauteurs significatives de houle (exemple de la tempête du 20 février 1996).

Tableau II.2: Paramétrage du modèle de houle, conditions extrêmes Nord – Nord-Est

Paramètres	Modèle général	Modèle détaillé
Hauteur de houle	Hauteur COAST-2525	Obtenue du modèle général
Direction de houle	Direction COAST-2525	Obtenue du modèle général
Période de houle	Période COAST-2525	Obtenue du modèle général
Vitesse de vent	Régression (§II.4.3.)	égale au modèle général
Direction de vent	Direction COAST-2525	Direction COAST-2525
Niveau d'eau	Niveau mesuré au Havre	Niveau mesuré au Havre

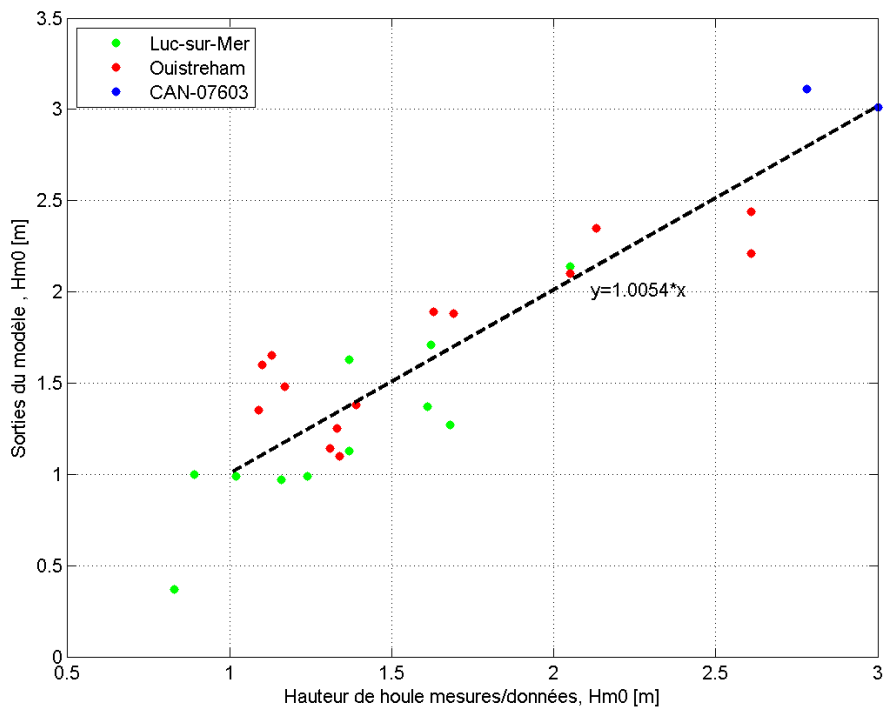


Figure II.8: Calibration des tempêtes du NNE : comparaison données de base et résultats du modèle

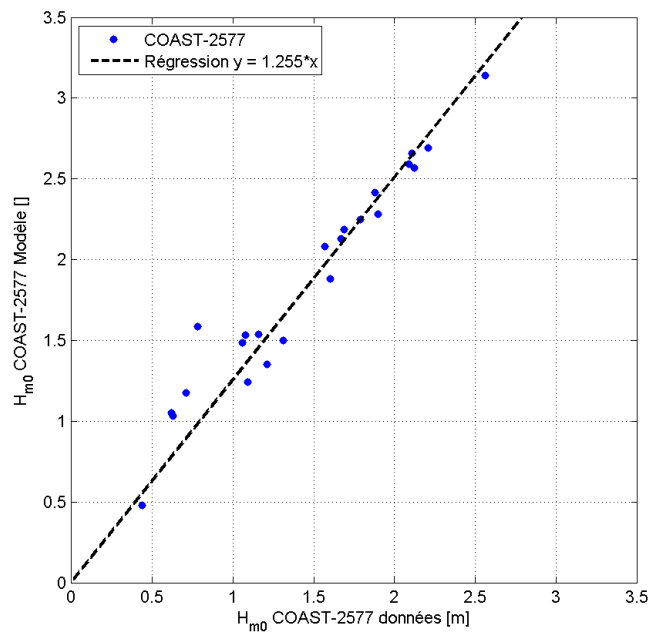


Figure II.9: Conditions extrêmes NNE, corrélation au point COAST-2577 entre les données ANEMOC et le modèle

II.5.1.2. Conditions d'Ouest

Pour la calibration, une sélection de conditions de houle importantes (hauteur supérieure à 1 m) est faite. Les conditions au large (points COAST-2525 et COAST-2545) sont simulées avec le modèle, et les résultats sont comparés en bordure littorale à Ouistreham et au point COAST-2577. Les hauteurs et périodes de houle des suites temporelles sont listées dans le tableau II.3.

Tableau II.3: Sélection de tempêtes d'Ouest pour la calibration du modèle

Date	$H_{m0, \text{large}}$ [m]	Dir_{large} [°N]	$H_{m0, \text{large}}$ [m]	Dir_{large} [°N]	$H_{m0, \text{Ouist}}$ [m]	Dir_{Ouist} [°N]
	COAST-2525		COAST-2577		Ouistreham	
26/01/1994	4.23	294	3.83	299	2.02	325
28/01/1994	4.82	294	4.22	302	1.97	330
13/03/1994	3.52	289	3.15	298	1.02	323
4/04/1994	3.92	293	3.57	302	1.72	330
6/12/1994	2.87	279	2.41	288	1.21	337.4
30/12/1994	3.98	280	3.35	285	0.98	326
11/01/1995	4.06	298	3.72	305	1.55	327.6
17/03/1995	3.29	284	2.80	289	1.02	327.5
28/03/1995	3.02	293	2.67	298	1.54	360

Pour les conditions d'Ouest, les transformations des houles passant autour du Cotentin vers la Baie de Seine deviennent plus complexes. De manière générale, il est observé que l'accrétion des houles du large vers la côte par le vent est beaucoup moins importante qu'en conditions du Nord – Nord-Est. Les éléments suivants sont considérés :

- Les houles d'entrée sur la limite nord du modèle général (figure II.1) peuvent varier le long de cette limite. De manière générale, les hauteurs de houle au point COAST-2545 sont inférieures à celles du point COAST-2525, car ce premier point est plus proche de la côte et abritée contre les houles d'Ouest. Les entrées du modèle sont donc variables le long de la limite nord du modèle général entre ces deux points.
- L'hypothèse que la direction du vent est identique à celle de la houle (pour les conditions historiques sans données plus précises sur le vent) n'est plus correcte pour des conditions d'Ouest. Les houles pénétrant de l'Ouest dans la Baie de la Seine peuvent être générées par un vent différent (par exemple Sud-Ouest). En passant par le Cap de la Hague, ces houles sont détournées avec une plus forte directionnalité d'Ouest. La superposition de ces conditions d'Ouest à un vent d'Ouest peut donc se traduire par une fausse propagation des houles dans la baie. Ce phénomène est quantifié pour les conditions de houle d'Ouest à deux niveaux :
 - **La différence entre les directions de houle et de vent au large.** Le point de données OCEANOR contient des directions de houles et de vent sur la même période. La différence entre la direction de vent et de houle varie de 0 à 30°, avec une moyenne 20,85°. Les houles du Sud-Ouest sont donc déviées d'un angle moyen de 20,85° vers l'Ouest.
 - **La différence entre les directions de vent au large et à la côte.** Les conditions extrêmes de vent d'Ouest au large ont une plus forte directionnalité de Sud-Ouest près de la côte. La différence moyenne est de 33° entre la côte et le large.

Ces phénomènes sont pris en compte dans le modèle afin de minimiser l'écart et l'erreur quadratique entre les points de données disponibles et les résultats du modèle :

- par rapport aux directions de houle au point COAST-2525 la direction du vent est diminuée de 30° par rapport au Nord, dans le modèle général.
- dans le modèle détaillé, les directions de vent sont encore corrigées de 33°.

Tableau II.4: Paramétrage du modèle de houle, conditions extrêmes d'Ouest

Date	Modèle général		Modèle détaillé
	Entrée ouest	Entrée est	
Hauteur de houle	Hauteur COAST-2545	Hauteur COAST-2525	Obtenu du modèle grossier
Direction de houle	Direction COAST-2545	Direction COAST-2525	Obtenu du modèle grossier
Période de houle	Période COAST-2545	Période COAST-2525	Obtenu du modèle grossier
Vitesse de vent	Régression (§II.4.3.)		Vent réduit d'Ouest, §II.4.4.
Direction de vent	Direction COAST-2525 – 30°		Direction COAST-2525 – 63°
Niveau d'eau	Marégraphe du Havre		

Une planche caractéristique des hauteurs de houle significatives en conditions d'Ouest est présentée dans la figure II.10. Cette planche montre le détournement des houles d'Ouest en approchant la côte, et l'atténuation des houles sur le secteur Dives-Orne, par la côte entre Saint-Aubin et Luc-sur-Mer.

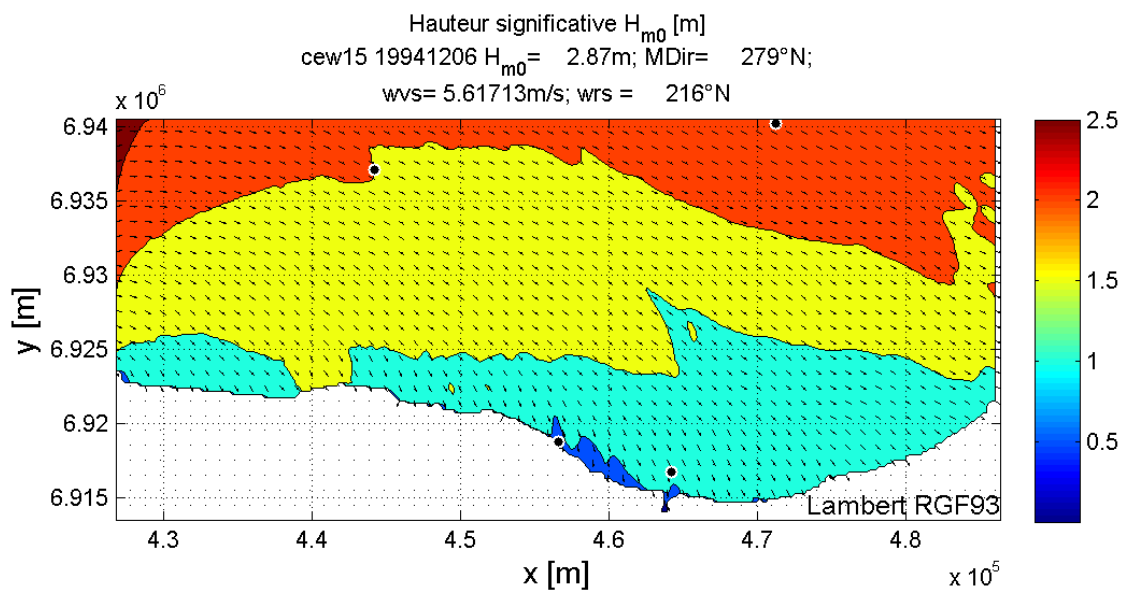


Figure II.10: Résultat caractéristique de la calibration des conditions d'Ouest, exemple d'une planche des hauteurs significatives de houle (exemple de la tempête de 6 décembre 1994)

Les résultats du modèle sont comparés aux données réelles dans les figures suivantes. Près de la côte, l'ordre de grandeur des mesures effectuées par la bouée de Ouistreham est bien représenté par le modèle (erreur moyenne de 6 % sur les hauteurs de houle mesurées, voir figure II.11).

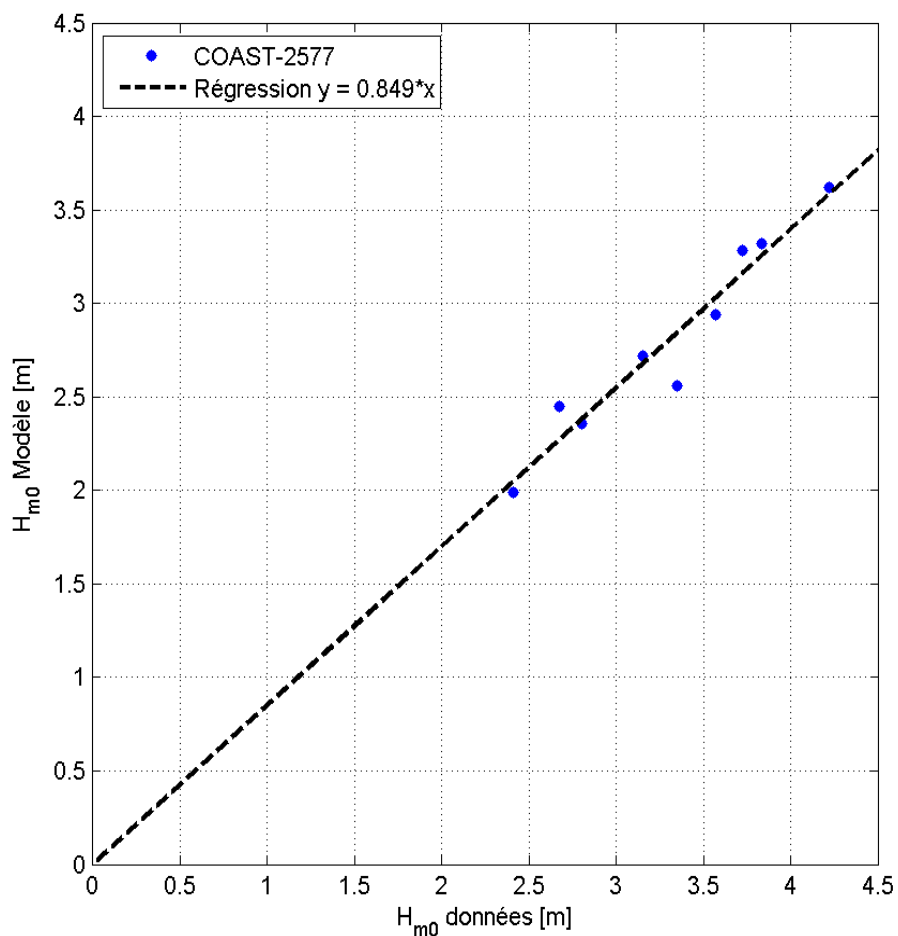


Figure II.11: Corrélation entre les sorties du modèle et les données ANEMOC au point COAST-2577 au large de Ouistreham, conditions extrêmes d'Ouest.

Au large, on observe une légère sous-estimation des hauteurs de houle extrêmes (erreur de 15 %, voir figure II.12).

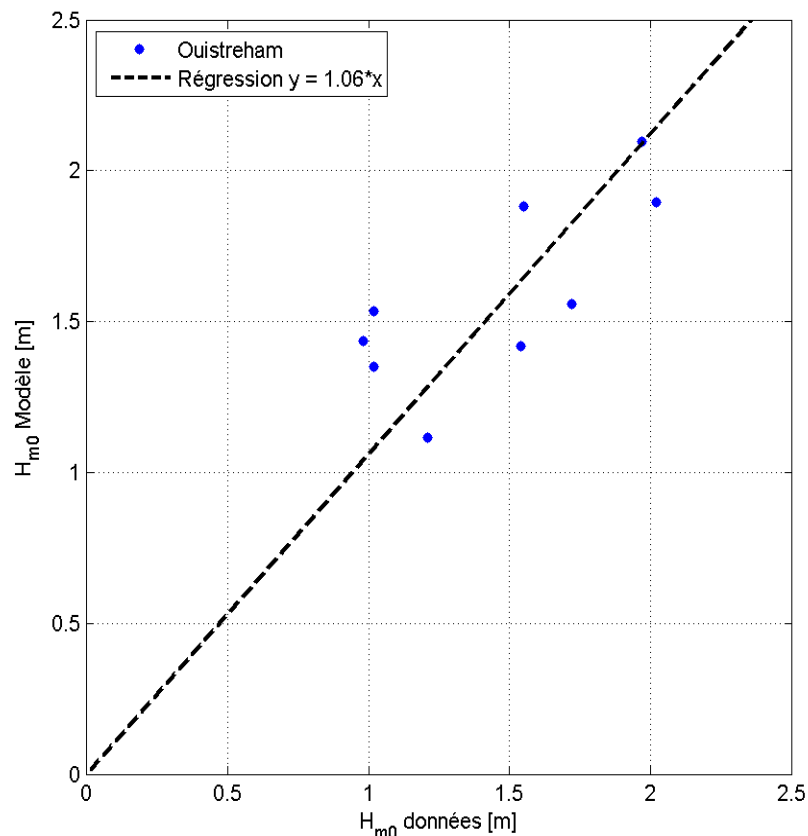


Figure II.12: Corrélation entre les sorties du modèle et les mesures au large de Ouistreham, conditions extrêmes d'Ouest.

II.5.2. Calibration des conditions fréquentes

La calibration du modèle pour des conditions fréquentes est faite sur les mesures de houle au large de Ouistreham pour la période de janvier 1994 à juillet 1995.

Pour prendre en compte la différence entre la direction de vent au large et à la côte (décrit au paragraphe §II.5.1.2.), les directions d'Ouest sont diminuées de 33° dans le modèle imbriqué par rapport au modèle général. Les vitesses de vent d'Ouest sont également réduites dans le modèle détaillé, selon la régression établie au paragraphe §II.4.4.).

Les entrées de houle au large sont issues du point COAST-2525. Les résultats du modèle sont comparés en 2 points : le point de la base de données ANEMOC COAST-2577 et la bouée au large de Ouistreham. Les nuages de points sont montrés aux figures II.13 et II.14. Le découpage en secteurs directionnels des figures est fait à partir des conditions au large (point COAST-2525), car la calibration est faite à partir de ces conditions.

Au point COAST-2577 (figure II.13) une bonne correspondance est trouvée entre les résultats du modèle et le modèle de houle ANEMOC. Les conditions du Nord-Ouest sont surestimées de 2,5 % en moyenne, et les conditions du Nord-Est sont sous-estimés de moins de 1 %. Les coefficients de corrélation sont de l'ordre de 0,99.

Les résultats au point situé au large de Ouistreham (figure II.14) montrent plus d'écart, surtout en conditions de Nord-Ouest. Cet écart s'explique par quelques incertitudes sur les données mesurées au large du Havre.

- La localisation exacte de la bouée lors des mesures n'est pas connue. Il est probable que la bouée ait quelquefois changée de place pendant la campagne de mesures. La suite temporelle peut donc contenir des mesures prises dans des zones de profondeurs d'eau différentes, alors que les résultats du modèle sont calculés en un point fixe.
- La proximité du chenal maritime de Ouistreham : la bouée a été placée juste à l'Est du chenal d'accès au port. La bathymétrie varie fortement de -6,5 m CM à -1,9 m CM dans le modèle. L'influence de cette pente (surtout pour les vagues arrivant du Nord-Ouest) est moins bien reproduite avec le modèle Swan. L'influence de la bathymétrie sur les mesures à Ouistreham est plus forte avec des niveaux d'eau moins élevés en conditions fréquentes.

En moyenne, les résultats du modèle surestiment les conditions du Nord – Nord-Est de 4,7 % et les conditions d'Ouest de 12 %.

Les conditions du Sud-Ouest (vagues se propageant vers le large) ne peuvent pas être modélisées à une distance si proche de la côte. À partir du point COAST-2577 (figure II.13) il est néanmoins conclu que ces conditions sont bien intégrées dans le modèle.

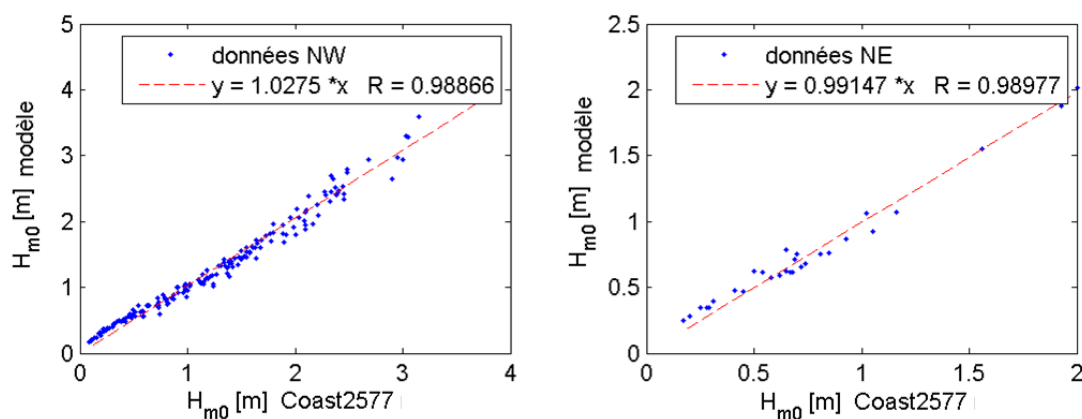


Figure II.13: Comparaison des conditions fréquentes (modèle IMDC) au point COAST-2577 (modèle ANEMOC)

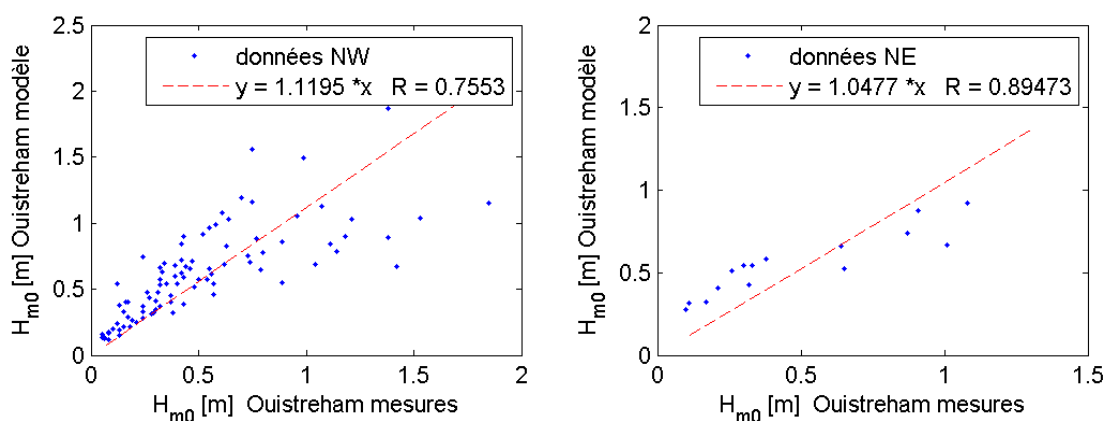


Figure II.14: Calibration des conditions fréquentes : résultats au point de mesure au large de Ouistreham (1994-1995)

II.6. Tests de sensibilité

Ce paragraphe décrit brièvement la sensibilité du modèle aux trois paramètres principaux :

- la période de houle ;
- la direction moyenne de houle ;
- le niveau d'eau.

II.6.1. Période de houle

Pour analyser l'impact de la période de houle sur les résultats près de la côte, des conditions avec différentes périodes moyennes de houle aux limites du modèle sont simulées. Hormis la période de houle, ces simulations sont identiques. La variation entre les résultats est donc uniquement causée par la période moyenne de houle à la limite du modèle. Les conditions modélisées sont résumées au tableau suivant. L'analyse est faite pour des conditions d'Ouest et du Nord – Nord-Est.

Tableau II.5 : Paramètres du test de sensibilité à la hauteur de houle (entrées au large)

Conditions	H_{m0} [m]	T_m	Direction de houle	Niveau d'eau	Vitesse de vent	Direction de vent
Ouest	4.0 m	7.5 s ; 10 s ; 15 s ; 20 s	280°N	9.2 m CM	21.9 m/s	250°N
Nord – Nord-Est			30°N	7.9 m CM	22.0 m/s	30°N

H_{m0} : Hauteur significative de houle au large

T_m : Période moyenne de houle au large

D_h : Direction moyenne de houle au large

Les résultats sont comparés aux points de sorties près de la côte, à 1,5 à 2 km de la côte (les mêmes points de sorties que ceux du test de digues, voir plus loin). Les hauteurs significatives de houle à la côte sont montrées dans les figures II.15 et II.16 par section homogène (voir cartes des points de sorties en Annexe A). La sensibilité est plus forte en conditions d'Ouest. La différence entre la hauteur de houle avec une période au large de 7,5 s et 20 s varie entre 30 et 50 % en conditions d'Ouest, et entre 3 et 9 % seulement en conditions du Nord – Nord-Est.

En conditions du Nord – Nord-Est la hauteur de houle dépend donc beaucoup moins de la période de houle au large, en raison du forçage du vent plus important, qui génère des houles d'une courte période jusqu'à la côte.

En conditions d'Ouest, les houles du large pénètrent de la Manche dans la Baie de la Seine. L'agitation à la côte est en premier lieu issue de la propagation des houles du large vers la côte, et en deuxième lieu seulement par les effets locaux du vent. La période de houle au large a donc plus d'impact sur les résultats en bordure littorale en conditions d'Ouest.

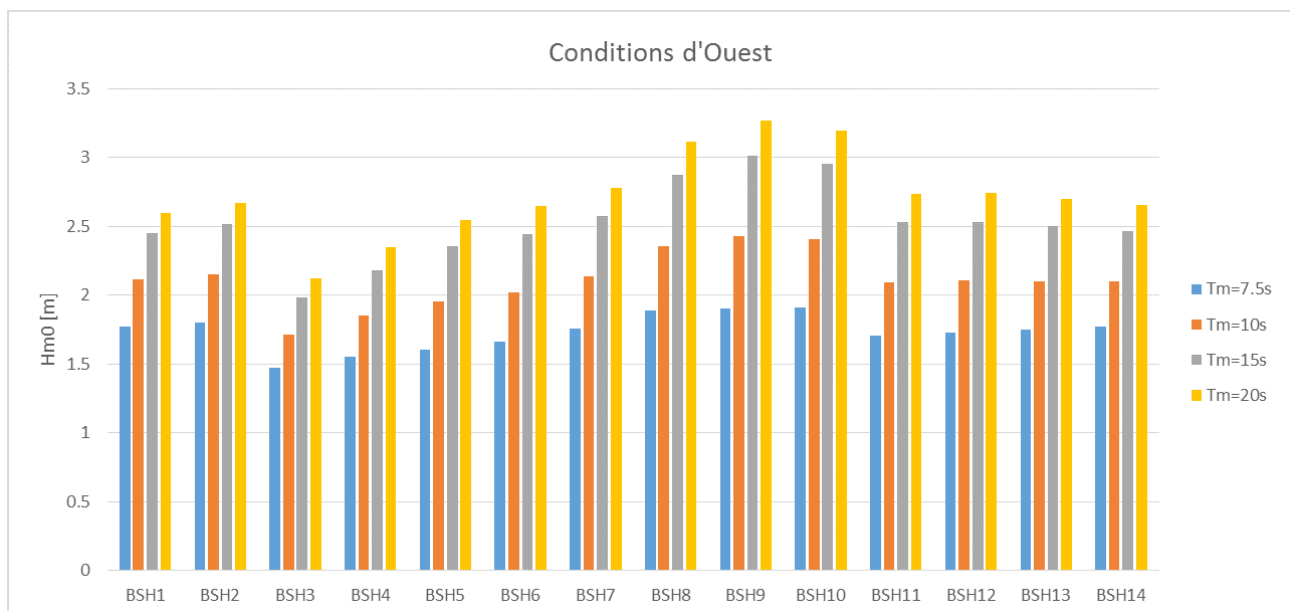


Figure II.15: Sensibilité à la période moyenne de houle (T_m), secteur Bessin, conditions d'Ouest

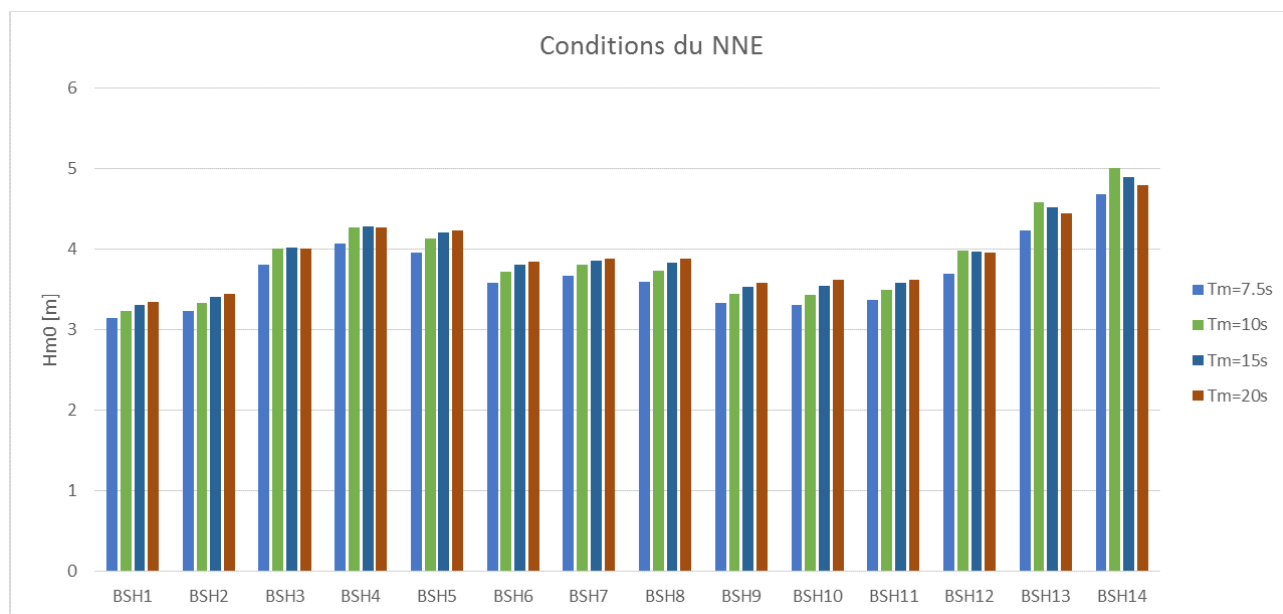


Figure II.16: Sensibilité à la période moyenne de houle (Tm), secteur Bessin, conditions du NNE

Les mêmes types de figures sont montrées avec les résultats sur le secteur de Dives-Orne (figure II.17 et II.18). Les hauteurs significatives varient cette fois de 25 % à 38 % entre les différentes périodes de houle d'Ouest et de 0 % à 5 % avec les différentes périodes de houles du Nord – Nord-Est.

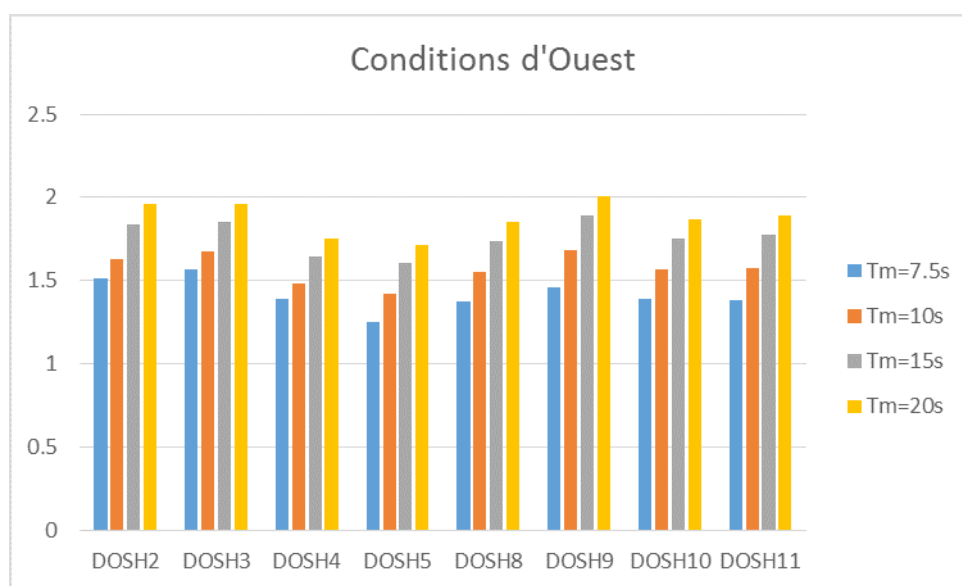


Figure II.17: Sensibilité à la période moyenne de houle (Tm), secteur Dives-Orne, conditions d'Ouest

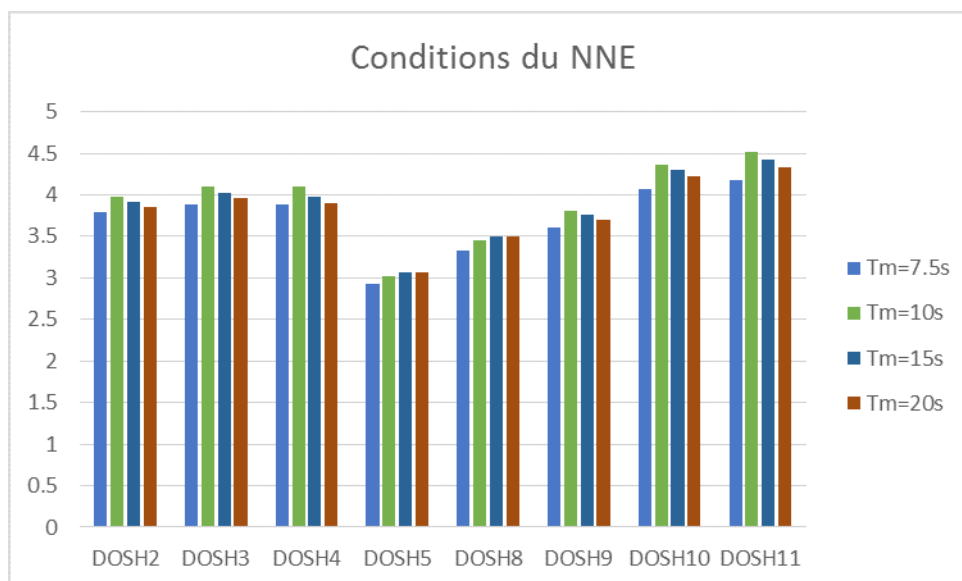


Figure II.18: Sensibilité à la période moyenne de houle (T_m), secteur Dives-Orne, conditions du Nord – Nord-Est.

II.6.1.1. Conclusion

En conditions du Nord – Nord-Est, la hauteur de houle près de la côte dépend à peine de la période de houle au large : ces vagues sont surtout générées localement par le vent.

En conditions d'Ouest, la période de houle au large fait varier la hauteur des vagues en bordure littorale : plus les houles ont une longue période, plus les hauteurs de houle à la côte sont grandes.

La borne supérieure de l'intervalle de confiance de 95 % de la relation entre les périodes et hauteurs de houle au large (établie au paragraphe II.4.1.) est retenue pour la simulation des conditions extrêmes. Cette hypothèse conservatrice évite toute sous-estimation de la hauteur des houles près de la côte en conditions d'Ouest.

II.6.2. Direction moyenne

Les conditions de houle à la côte dépendent également de la direction de houle (et de la direction de vent qui en est déduite). Il est rappelé que, pour les conditions d'Ouest, le vent pris en compte dans le modèle détaillé est détourné de la direction de houle. Les conditions simulées sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau II.6: Paramètres du test de sensibilité à la direction moyenne de houle au large.

Conditions	Hm0 [m]	Tm	Dh	Niveau d'eau	Vitesse de vent	Direction de vent
Ouest	4.0 m	9,6 s	250°N ; 270°N ; 280°N ; 290°N ; 310°N	9.23 m CM	21.9 m/s	Dh – 63°
Nord – Nord-Est			350°N ; 0°N ; 10°N ; 30°N ; 50°N ; 70°N	7.91 m CM	22.0 m/s	Dh

Hm0 : Hauteur significative de houle au large
Tm : Période moyenne de houle au large
Dh : Direction moyenne de houle au large

La période moyenne de houle est obtenue de la formule de régression entre la hauteur et la période de houle, établie au paragraphe II.4.1..

La direction moyenne de houle du secteur Ouest (pour les hauteurs supérieures à 3 m) est de 281°N, avec un écart type de 14,7°. 95 % des directions de houles d'Ouest proviennent donc du secteur 251,5° à 310,4°. Les directions choisies pour l'analyse de sensibilité sont 250°N, 270°N, 280°N, 290°N et 310°N.

Pour le secteur Nord – Nord-Est, la direction moyenne de houle (pour les hauteurs supérieures à 1,5m) est de 30,1°N, avec un même écart type de 19,7°. 95 % des houles du secteur Nord – Nord-Est proviennent donc des directions 350,7° à 69,5°N. Les directions analysées dans l'analyse de sensibilité sont 350°N, 0°N, 10°N, 30°N, 50°N et 70°N.

La variation des hauteurs de houle résultantes à la côte est présentée dans les figures II.19 et II.20 pour le secteur Bessin, et dans les figures II.21 et II.22 pour le secteur Dives-Orne.

La hauteur de houle semble plus sensible à la direction de houle d'Ouest qu'à celle du Nord – Nord-Est. Les conditions du Nord – Nord-Est approchent la côte d'une manière frontale, les légères variations de directions de houle ont peu d'influence. La variation maximale peut atteindre 37 % aux extrémités de la zone d'étude (sections homogènes 2 et 3 près de l'embouchure de la Dives) et 33 % à Arromanches-les-Bains.

Cette variation est beaucoup plus forte (ordre de 60 à 65 %) en conditions d'Ouest. Plus les houles viennent de l'Ouest, plus les processus secondaires de pénétration de houle vers les côtes deviennent importants : réfraction, shoaling et diffraction. Plus les houles viennent du Nord, plus la pénétration est frontale et les hauteurs de houle à la côte sont importantes. La variation entre une houle de 250°N et 310°N peut atteindre 65 % à l'extrémité est de la zone d'étude (embouchure de la Dives) et 60 % à Arromanches-les-Bains.

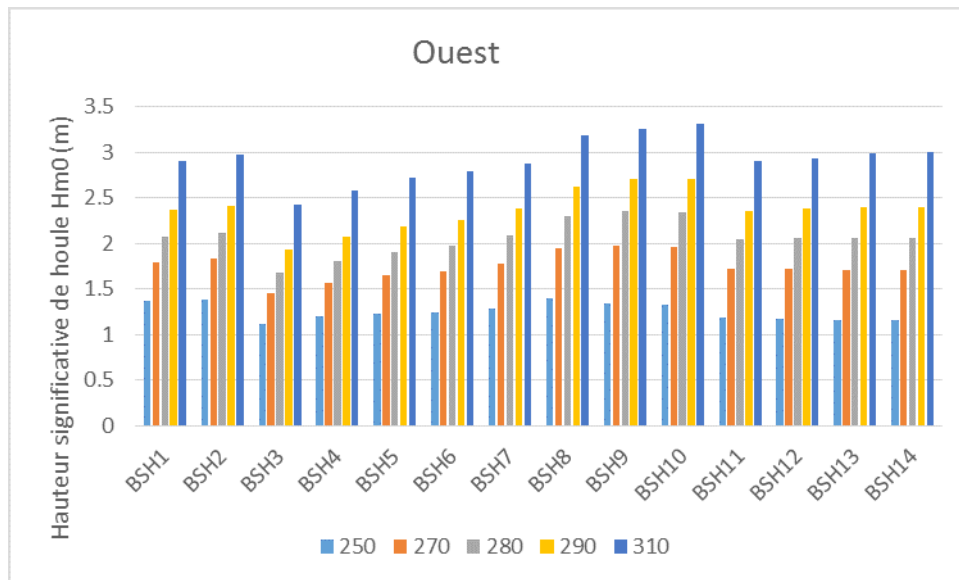


Figure II.19: Sensibilité à la direction moyenne de houle au large, secteur Bessin, conditions d'Ouest

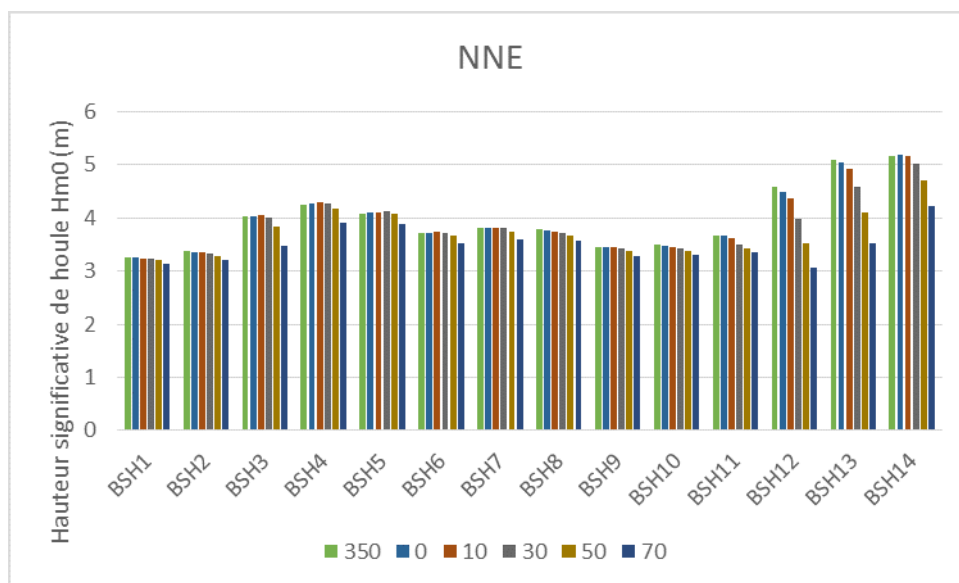


Figure II.20: Sensibilité à la direction moyenne de houle au large, secteur Bessin, conditions du NNE

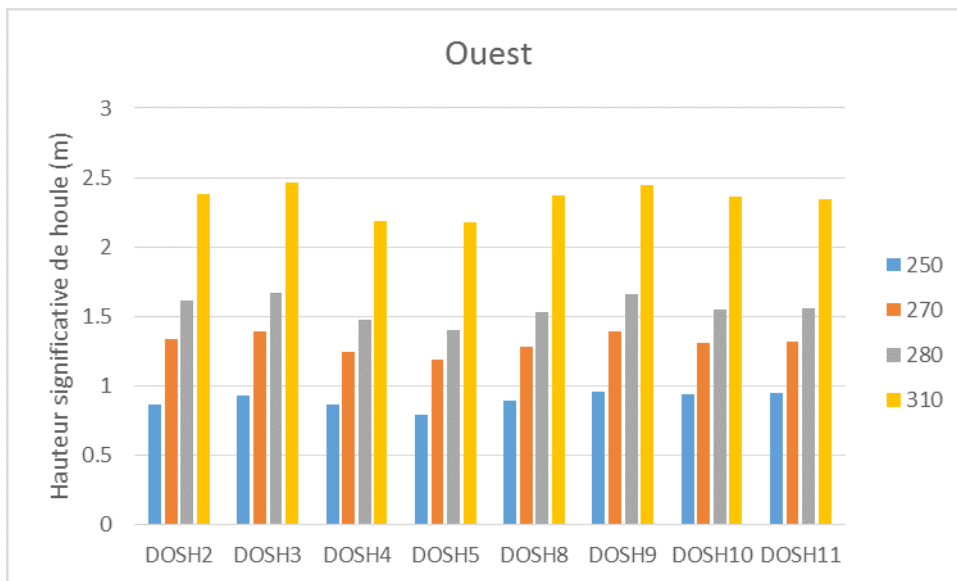


Figure II.21: Sensibilité à la direction moyenne de houle au large, secteur Dives-Orne, conditions d'Ouest

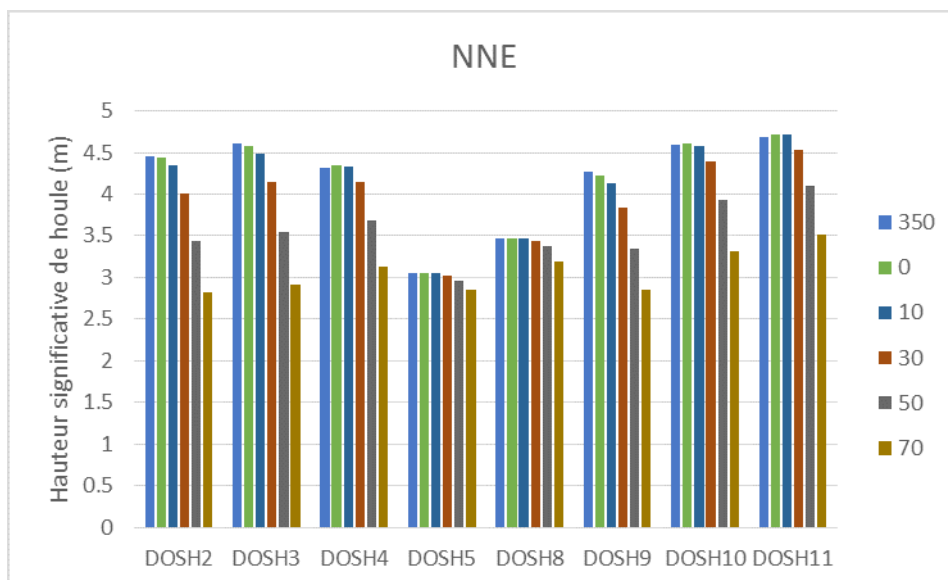


Figure II.22: Sensibilité à la direction moyenne de houle au large, secteur Dives-Orne, conditions du NNE

II.6.2.1. Conclusion

Une forte dépendance aux directions de houle au large est trouvée pour les conditions d'Ouest. Plus la direction de provenance des houles est proche du Nord, plus l'agitation est forte près de la côte. Ainsi, la direction de 310°N, qui correspond à la borne nord du secteur directionnel contenant 95 % des conditions d'Ouest (250°N – 310°N), produit la plus forte houle à la côte. **La direction de 310°N est retenue pour la simulation des conditions extrêmes Ouest.**

En conditions du Nord – Nord-Est, les directions de houle 350°N à 10°N causent les plus hautes vagues près de la côte, avec des différences négligeables entre ces trois directions. **La direction de 350°N, qui correspond à la borne du secteur directionnel contenant 95 % des données (350°N à 70°N), est retenue pour les conditions extrêmes du Nord – Nord-Est.**

Pour les deux conditions, les directions de houle les plus critiques sont retenues. Cette approche est conservative vis-à-vis des hauteurs de houle en bordure littorale, en particulier pour les conditions d'Ouest.

II.6.3. Niveau d'eau

L'impact des niveaux d'eau sur les hauteurs de houle à la côte est double. D'une part, les houles peuvent être limitées par la profondeur d'eau à la côte. Les plus grandes vagues seront en effet filtrées par l'effet du déferlement des vagues sur les petits fonds et les plages. Par contre, l'effet du shoaling fait augmenter les hauteurs de houle sur les estrans. L'effet du niveau d'eau est analysé sur la base de 8 simulations. Les niveaux d'eau sont variés entre les différentes simulations, couvrant la gamme des niveaux extrêmes des couples centennaux de l'analyse statistique.

Tableaux II.7 : Paramètres du test de sensibilité au niveau d'eau.

Conditions	Hm0 [m]	Tm	Dh	Niveau d'eau m CM	Vitesse de vent	Direction de vent
Ouest	4.0 m	9,6 s	310°N	8,83 ; 9,03 ; 9,23 ; 9,43	21.9 m/s	Dh – 63°
Nord – Nord-Est			350°N	7,51 ; 7,71 ; 7,91 ; 8,11	22.0 m/s	Dh

Hm0 : Hauteur significative de houle au large
Tm : Période moyenne de houle au large
Dh : Direction moyenne de houle au large

Les résultats du modèle sont présentés dans les figures ci-dessous.

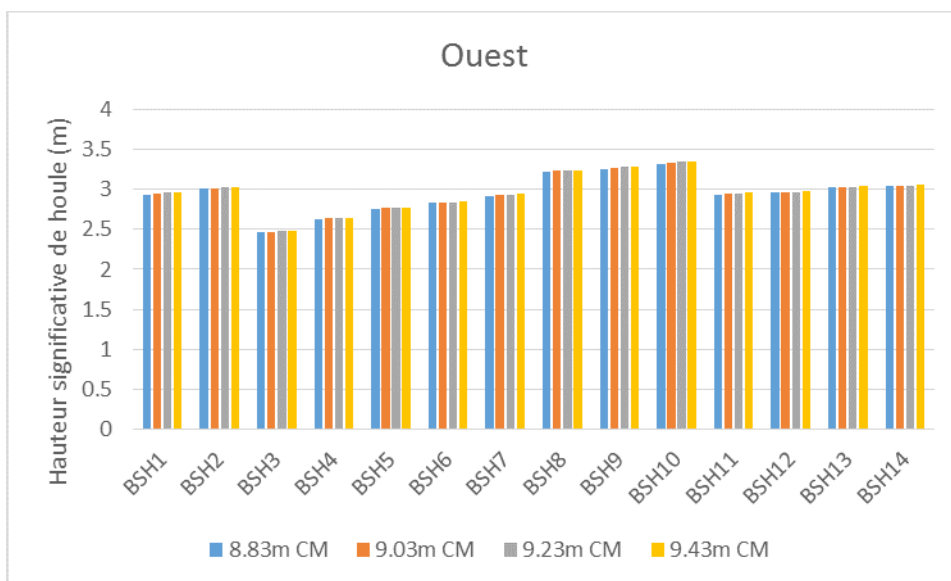


Figure II.23 Sensibilité au niveau d'eau, secteur Bessin, conditions d'Ouest.

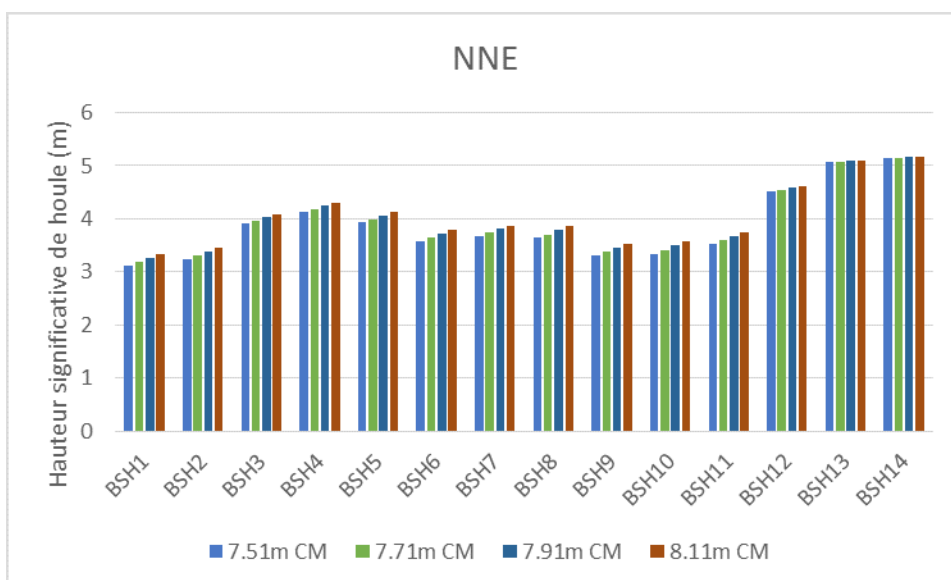


Figure II.24 : Sensibilité au niveau d'eau, secteur Bessin, conditions du Nord – Nord-Est.

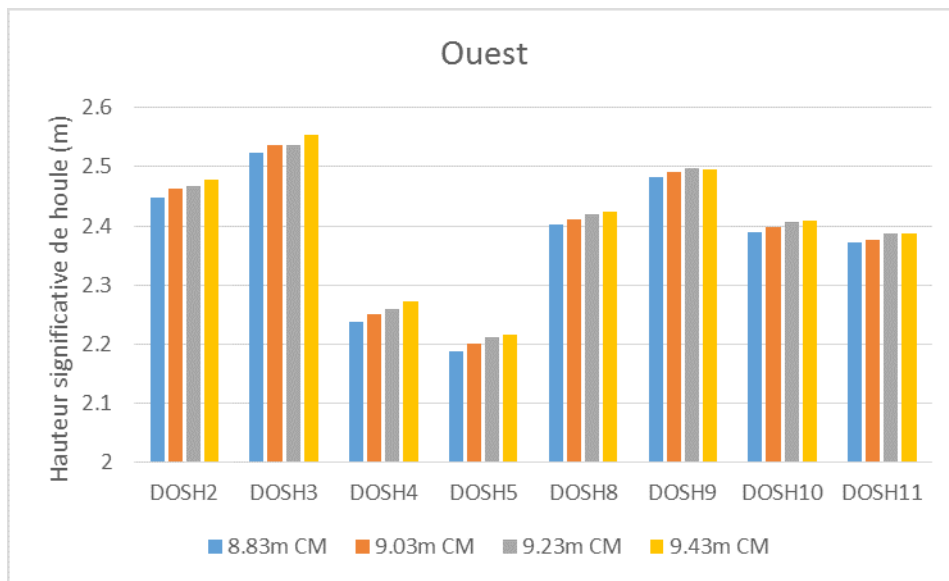


Figure II.25 : Sensibilité au niveau d'eau, secteur Dives-Orne, conditions d'Ouest.

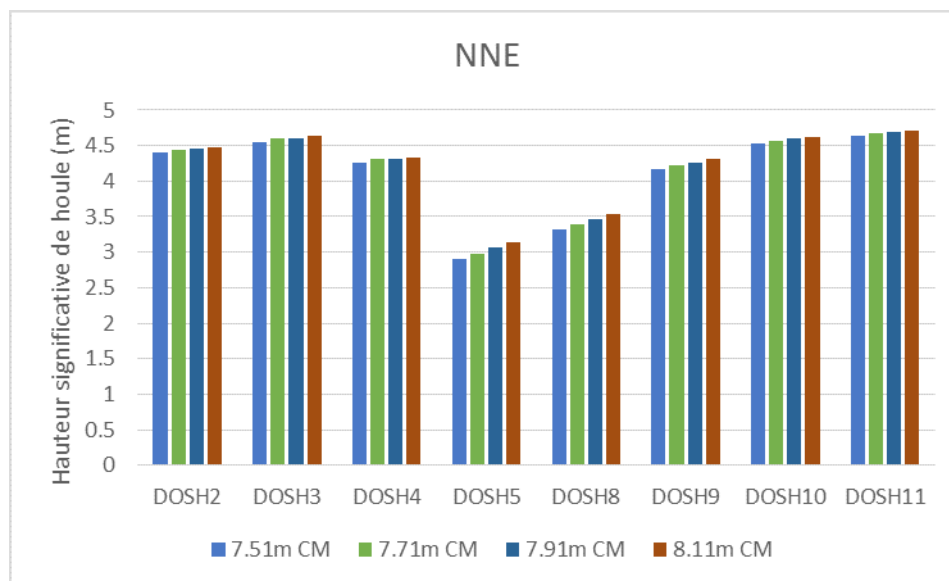


Figure II.26 : Sensibilité au niveau d'eau, secteur Dives-Orne, conditions du Nord – Nord-Est.

II.6.3.1. Conclusion

L'impact d'une variation du niveau d'eau extrême est minimal par rapport aux variations d'autres paramètres du modèle. Plus le niveau est élevé, plus les hauteurs de houle le sont. La variation est de l'ordre d'une dizaine de centimètres : elle est donc négligeable.

II.7. Simulations des conditions extrêmes

Les conditions extrêmes au large sont déterminées dans le rapport de l'étude statistique (AGR & IMDC, 2014b) et forment la base des simulations extrêmes. Des couples de niveaux d'eau et hauteurs de houle significatives au large ont été déterminées pour trois périodes de retour (10, 100 et 1000 ans) et pour les conditions extrêmes d'Ouest et du Nord – Nord-Est. Les simulations en conditions d'Ouest et Nord – Nord-Est. sont listées dans les tableaux II.8 et II.9. Les périodes de houle et la vitesse de vent sont définis comme décrit aux paragraphes II.4.1., II.4.3. et II.4.4.. Les directions de houle critiques, comme discutées aux paragraphes II.4.2. et II.6.2. sont retenues :

- Conditions d'Ouest : 310°N ;
- Conditions du Nord – Nord-Est : 350°N.

Tableau II.8: Simulations extrêmes conditions d'Ouest.

Période de retour [ans]	Niveau d'eau [m CM]	Niveau d'eau [m IGN69]	H_{m0} [m]
10	7,00	2,62	6,09
	7,33	2,96	5,98
	7,61	3,23	5,87
	7,97	3,59	5,65
	8,27	3,89	5,27
	8,55	4,17	4,71
	8,70	4,32	4,16
	8,85	4,47	3,12
	8,88	4,50	2,68
100	7,25	2,87	7,45
	7,53	3,15	7,39
	7,85	3,47	7,26
	8,24	3,86	7,01
	8,59	4,21	6,64
	8,87	4,50	6,07
	9,09	4,71	5,33
	9,19	4,81	4,51
	9,23	4,85	4,02
1000	9,26	4,88	3,20
	7,00	2,62	8,82
	7,48	3,11	8,74
	8,01	3,63	8,60
	8,58	4,20	8,32
	8,90	4,52	8,04
	9,30	4,93	7,33
	9,55	5,17	6,27
	9,63	5,25	5,14
9,67	5,29	3,30	

Tableau II.9: Simulations extrêmes, conditions du Nord – Nord-Est.

Période de retour [ans]	Niveau d'eau [m CM]	Niveau d'eau [m IGN69]	H_{m0} [m]
10	5,97	1,59	3,81
	6,54	2,16	3,77
	7,07	2,69	3,61
	7,53	3,15	3,34
	7,97	3,59	2,73
	8,09	3,71	2,47
	8,24	3,86	2,04
	8,30	3,92	1,77
100	5,97	1,59	5,04
	6,44	2,06	5,00
	6,82	2,44	4,92
	7,28	2,90	4,73
	7,59	3,21	4,51
	7,91	3,53	4,08
	8,17	3,79	3,49
	8,34	3,96	2,83
	8,43	4,05	2,26
	8,48	4,10	1,77
1000	5,97	1,59	6,12
	6,60	2,22	6,08
	7,07	2,69	5,96
	7,58	3,20	5,69
	7,92	3,54	5,27
	8,16	3,78	4,73
	8,40	4,02	3,69
	8,49	4,11	2,87
	8,55	4,17	2,24

II.8. Conditions extrêmes à la côte

II.8.1. Houle

Les résultats du modèle sont listées par condition simulée (couple, période de retour) et par section homogène dans les points de sorties. Les résultats sont également présentés sous forme de graphes à barres dans les figures II.27 et II.28. Sur ces figures, les conditions d'Ouest (k1W, k2W, etc.) et Nord – Nord-Est (k1N, k2N, etc.) peuvent être comparées par section homogène.

Les conditions critiques peuvent clairement varier entre les différentes sections homogènes.

Dans le secteur Dives – Orne, on trouve des conditions plus critiques avec des tempêtes du Nord, ce qui s'explique par le fait que la côte est mieux abritée contre les conditions d'Ouest.

Dans le secteur Bessin, par contre, la différence entre les deux conditions est moins évidente et les houles d'Ouest sont parfois plus critiques que celles du Nord – Nord-Est.

Il a été observé, lors de l'analyse statistique, que trois tempêtes historiques dépassaient les conditions centennales (AGR & IMDC 2014b) :

- 20 février 1996 : une marée haute au Havre de 8,83 m CM couplée à une houle de 4,22 m au point COAST-2525 ;
- 18 septembre 2001 : une marée haute au Havre de 8,44 m CM, avec des houles atteignant une hauteur de 2,6 m au point COAST-2525 ;
- 08 octobre 1998 : une marée haute au Havre de 8,4 m CM avec des houles atteignant une hauteur de 2,55 m, proche de la courbe centennale, au point COAST-2525.

Ces trois tempêtes ont également été simulées avec le modèle ; les résultats obtenus sont présentés dans les figures suivantes. Il est intéressant d'observer que ces tempêtes, plus critiques au large, ne sont pas nécessairement critiques près de la côte. Seule la tempête des 19 et 20 février 1996 semble dépasser les conditions près de la côte, notamment sur la partie est du secteur Bessin (zones homogènes BSH 1 à BSH 10).

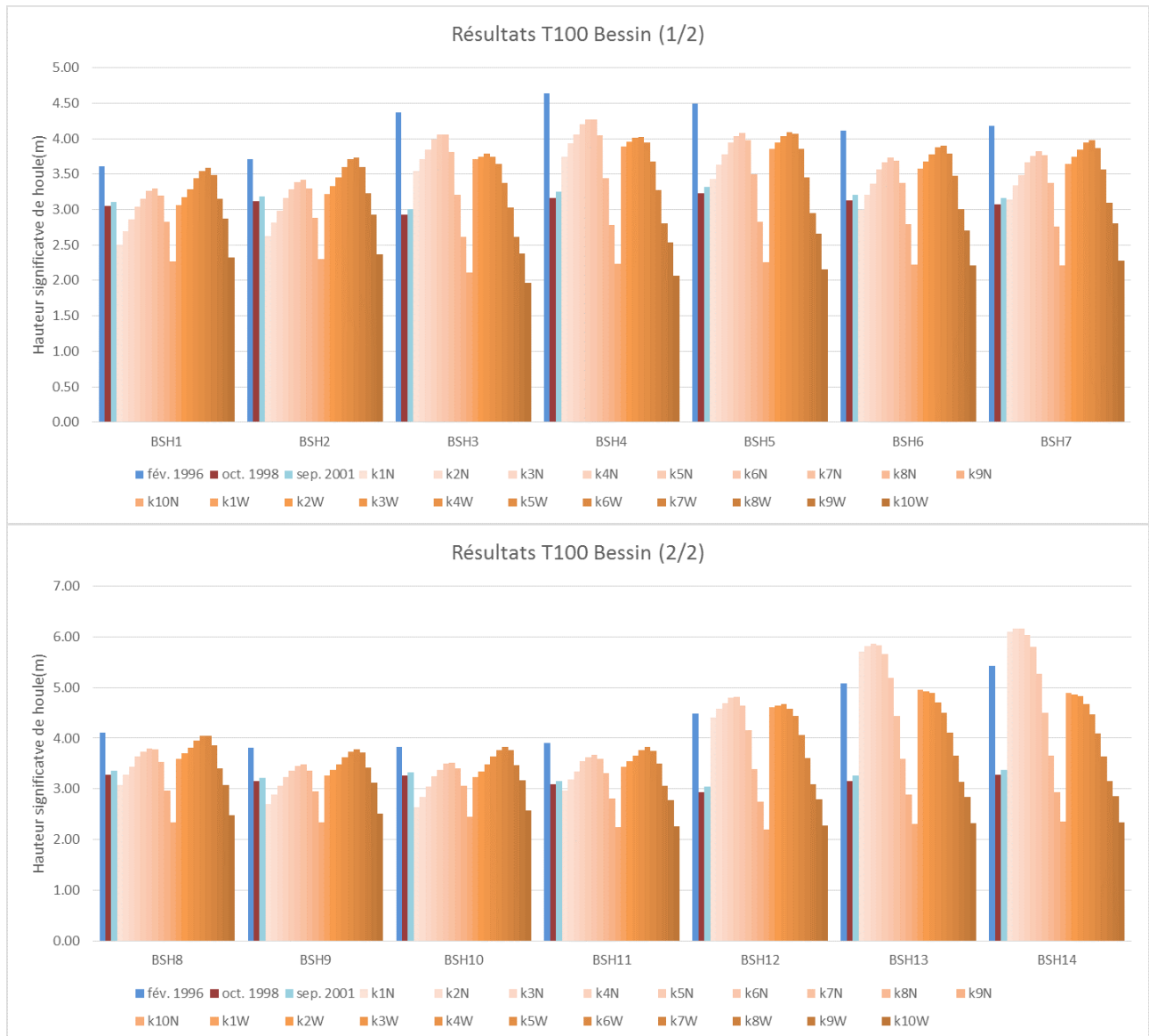


Figure II.27: Résultats du modèle de houle par section homogène sur le secteur Bessin, période de retour centennal en conditions Ouest et Nord – Nord-Est.

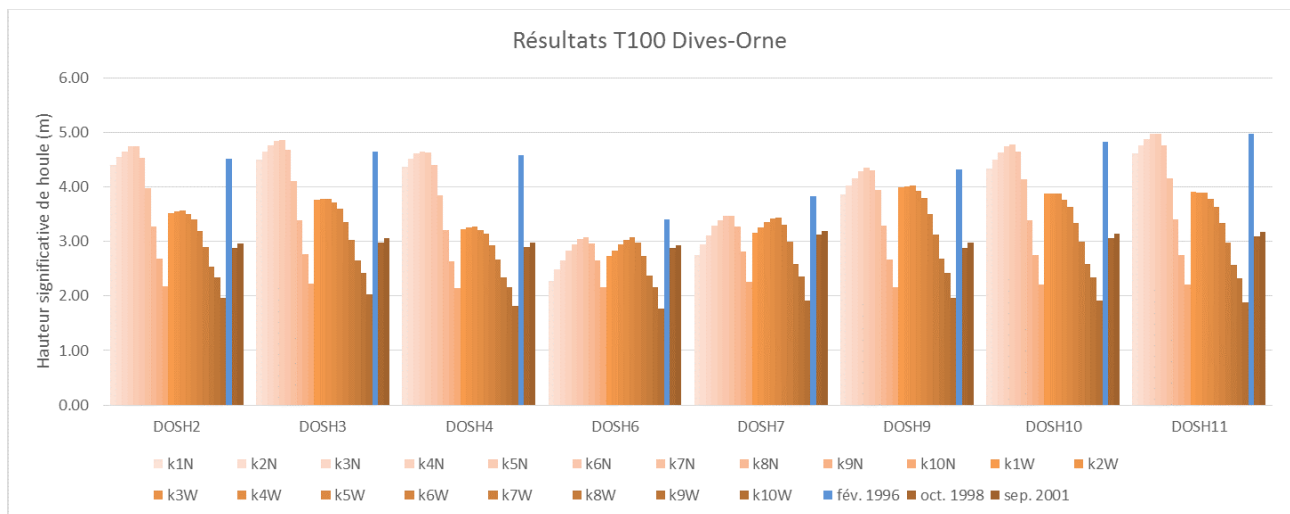


Figure II.28: Résultats du modèle de houle par section homogène sur le secteur Dives-Orne, période de retour centennal en conditions Ouest et Nord – Nord-Est.

II.8.2. Niveaux d'eau

Les niveaux d'eau des couples étudiés (§II.7.) ont été transformés en niveaux d'eau le long des côtes du Calvados dans le rapport d'AGR & IMDC (2014b). Cette transformation était faite sur la base des courbes de marées astronomiques et des niveaux extrêmes le long des côtes, établies par le SHOM (2011) et SHOM/CETMEF (2012). Ces niveaux ne prennent pas en compte la surcote de houle (*wave set-up*). Ce phénomène, qui résulte des processus de dissipation d'énergie de houle sur les avant-côtes et plages, peut être calculé avec le modèle Swan.

Dans ce paragraphe, l'augmentation des niveaux marins par l'effet de la surcote de houle est étudié à partir des calculs du modèle Swan. Ce phénomène est analysé en deux temps :

- dans les points de sorties du modèle de houle 2D (surcote entre le large et la bordure littorale) ;
- dans les modélisations 1D sur les profils de plage du test de digue (surcote de la houle sur les plages).

II.8.2.1. Surcote de la houle en bordure littorale

La surcote de houle (*wave set-up*) est calculée par le modèle aux mêmes points que les hauteurs de houle. Les résultats sont listés dans les tableaux suivants.

On constate que :

- la surcote de houle est plus importante en conditions du Nord – Nord-Est.
- la surcote de houle est plus importante avec des conditions de houle plus extrêmes, et des niveaux d'eau moins élevés (couple k1 supérieur au couple k10)
- l'événement historique de février 1996 ne dépasse pas les couples de période de retour centennale (T100) du Nord – Nord-Est.
- Les valeurs de la surcote de houle peuvent atteindre 0,13 m sur le secteur Bessin, c'est-à dire que le niveau marin augmente de 0,13 m par les seuls effets de la houle en bordure littorale.

Tableau II.10 : Surcote de houle au large (en m), conditions extrêmes du Nord – Nord-Est.

	<u>k1</u>	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	1996
DOSH2	<u>0.03</u>	0.02	0.01	0.00	-0.01	-0.02	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	-0.02
DOSH3	<u>0.04</u>	0.03	0.03	0.01	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00	-0.01
DOSH4	<u>0.05</u>	0.04	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01
DOSH5	<u>0.13</u>	0.12	0.11	0.09	0.07	0.04	0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.02
DOSH8	<u>0.10</u>	0.09	0.08	0.06	0.05	0.02	0.00	-0.02	-0.01	-0.01	0.00
DOSH9	<u>0.06</u>	0.05	0.04	0.03	0.02	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	-0.01
DOSH10	<u>0.04</u>	0.03	0.03	0.01	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00	-0.01
DOSH11	<u>0.04</u>	0.03	0.02	0.01	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00	-0.01
BSH1	<u>0.12</u>	0.11	0.10	0.08	0.06	0.03	0.00	-0.02	-0.02	-0.01	0.02
BSH2	<u>0.12</u>	0.11	0.09	0.07	0.06	0.03	0.00	-0.02	-0.02	-0.01	0.02
BSH3	<u>0.08</u>	0.07	0.06	0.04	0.02	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00
BSH4	<u>0.08</u>	0.07	0.06	0.04	0.03	0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00
BSH5	<u>0.08</u>	0.07	0.06	0.04	0.02	0.00	-0.02	-0.02	-0.01	-0.01	-0.01
BSH6	<u>0.09</u>	0.08	0.06	0.04	0.03	0.00	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01	0.00
BSH7	<u>0.09</u>	0.08	0.07	0.05	0.03	0.01	-0.01	-0.02	-0.01	-0.01	0.00
BSH8	<u>0.10</u>	0.09	0.08	0.06	0.04	0.02	-0.01	-0.02	-0.02	-0.01	0.00
BSH9	<u>0.13</u>	0.11	0.10	0.08	0.06	0.03	0.00	-0.02	-0.02	-0.01	0.02
BSH10	<u>0.13</u>	0.11	0.10	0.08	0.06	0.03	0.00	-0.02	-0.02	-0.01	0.01
BSH11	<u>0.11</u>	0.10	0.08	0.06	0.04	0.02	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	0.01
BSH12	<u>0.04</u>	0.03	0.02	0.01	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00
BSH13	<u>0.00</u>	-0.01	-0.01	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	-0.01
BSH14	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01	-0.01	0.00	<u>0.00</u>	-0.01

Tableau II.11 : Surcote de houle au large (en m), conditions extrêmes d'Ouest.

	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10
DOSH2	<u>0.04</u>	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00
DOSH3	<u>0.04</u>	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00
DOSH4	<u>0.05</u>	0.05	0.04	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00
DOSH6	<u>0.06</u>	0.05	0.05	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
DOSH7	<u>0.04</u>	0.04	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DOSH9	<u>0.02</u>	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
DOSH10	<u>0.03</u>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
DOSH11	<u>0.03</u>	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
BSH1	<u>0.06</u>	0.05	0.04	0.03	0.01	-0.01	-0.02	-0.02	-0.01	-0.01
BSH2	<u>0.05</u>	0.05	0.04	0.02	0.01	-0.01	-0.02	-0.02	-0.01	-0.01
BSH3	<u>0.02</u>	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BSH4	<u>0.03</u>	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BSH5	<u>0.02</u>	0.01	0.01	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.00
BSH6	<u>0.02</u>	0.01	0.00	-0.01	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01	-0.01
BSH7	<u>0.03</u>	0.02	0.01	0.00	-0.01	-0.02	-0.02	-0.01	-0.01	-0.01
BSH8	<u>0.04</u>	0.03	0.02	0.01	0.00	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01
BSH9	<u>0.06</u>	0.05	0.04	0.02	0.01	-0.01	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01
BSH10	<u>0.05</u>	0.04	0.03	0.02	0.00	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01
BSH11	<u>0.03</u>	0.03	0.02	0.01	-0.01	-0.01	-0.02	-0.02	-0.01	-0.01
BSH12	-0.01	-0.01	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01	-0.01	-0.01	<u>0.00</u>
BSH13	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	<u>0.00</u>
BSH14	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00	<u>0.00</u>

II.8.2.2. Surcote de houle sur les plages

Dans un deuxième temps, la surcote de houle est analysée sur les profils de plage avec le test de digue (voir chapitre III.).

Cette surcote (*set-up*) se produit très localement sur les plages, et dépend fortement de la forme du profil de plage et, par conséquent, de l'érosion caractéristique de la condition testée.

Les valeurs maximales sur l'ensemble des couples T100 (Ouest et Nord – Nord-Est) et la tempête historique de février 1996 (tempête de Nord historique causant les plus hautes vagues près de la côte), sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau II.12 : Surcote de la houle : valeurs maximales par section homogène dans les conditions de référence (+20 cm).

Section Homogène	Set-up de la houle maximal (m)
BSH1 Bernières-est	0.25
BSH2 Remblai de Bernières	0.24
BSH3 Bernières-ouest et Courseulles-est	0.22
BSH6 Ver-sur-Mer-est	0.28
BSH7 Marais de Ver-sur-Mer	0.25
BSH9 Asnelles-est	0.15
BSH10 Asnelles-ouest	0.27
BSH11 Saint-Come – La Guerre	0.18
BSH13 Remblai d'Arromanches	0.16
DOSH3 Remblai de Cabourg	0.21
DOSH4 Cordon dunaire de Varaville et Franceville-Merville-Plage	0.20
DOSH10 Remblai Ouistreham	0.27
DOSH11 Cordon dunaire de Colleville et Remblai de Hermanville	0.30

La surcote de houle varie fortement le long des côtes ; elle est généralement comprise entre 0,15 m et 0,30 m. Ces augmentations très locales du niveau marin sont uniquement prises en compte sur les plages. Ici, en cas de rupture de digue ou de dune littorale, la surcote de houle peut augmenter la submersion en raison du plus haut niveau marin.

II.8.2.3. Surcote de houle : conclusion

La surcote de houle est analysée en deux temps : près de la côte (bordure littorale) et sur les plages. En bordure littorale, les valeurs de la surcote de houle (*wave set-up*) sont limitées à 0,13 m en conditions du Nord – Nord-Est. Avec le niveau marin maximal (couple k10W, critique pour la submersion marine) les valeurs trouvées sont même zéros ou négatives ("set-down » au lieu de « set-up »). Il en est conclu que le set-up de la houle en bordure littorale n'est pas critique pour la modélisation de submersion marine.

Par contre, sur les plages, la surcote de houle (*set-up*) dépend fortement du profil de plage après érosion. Le scénario critique peut donc varier entre les différentes sections homogènes. Les valeurs maximales, toutes conditions confondues (couples T100 Ouest et Nord – Nord-Est et la tempête de février 1996), varient de 0,15 m à 0,30 m. Les valeurs par section homogène du tableau II.4 seront ajoutées au niveau de référence PPRL (AGR et IMDC, 2014) le long des plages, au niveau des ruptures de digues.

La surcote de houle (*set-up*) est automatiquement pris en compte dans le test de digues pour le calcul des débits de franchissements.

III. Évaluation des structures côtières : test de digues et dunes

III.1. Introduction, objectif et conditions testées

Cette section traite de la modélisation des effets des conditions hydrodynamiques sur la protection côtière. La stabilité des dunes et des digues littorales est analysée à l'aide du « test de dunes » et du « test de digues ». Le premier est appliqué sur les cordons dunaires naturels, sans prise en compte d'ouvrages rigides de protection (enrochement, digue maçonnée, etc.). Le second est appliqué sur les structures rigides, telles que les perrés et les digues côtières, protégeant l'arrière-pays contre les submersions marines.

L'objectif de ces deux outils est de définir les hypothèses d'entrée d'eau du modèle de submersion marine :

- Grâce au test de dune, les zones instables d'une dune sont identifiées pour différentes conditions de référence (centennales et historiques). Une brèche de dune sera simulée dans le modèle, sur la section instable de la dune. L'évolution de la crête de dune au cours de la tempête est déterminée. Dès que la crête se trouve en dessous du niveau marin, il y a surverse au-dessus de la dune ; l'érosion de crête est accélérée et la dune rompt sur la section instable. Le test de dune permet aussi de calculer le recul de côte ponctuel en conditions extrêmes, sans prise en compte d'ouvrages de protection fixant la côte.
- Avec le test de digue, le débit d'eau correspondant aux paquets de mer franchissant la crête de digue au cours de la tempête (suite temporelle) est déterminé. Cette analyse prend en compte l'érosion de la plage devant la digue et les paramètres de houle (hauteur et période de houle) en pied d'ouvrage. Les débits de franchissement par paquets sont utilisés comme entrée d'eau dans le modèle de submersion. Ces débits peuvent aussi causer des dégradations des revêtements des digues (dues à l'action des houles et les rejets d'eau sur les digues) et une brèche peut se former. L'évaluation des débits de franchissement est faite à partir des directives du guide Eurotop (2007)

Pour le calcul du test de digues et de dunes, les entrées suivantes ont été utilisées :

- les caractéristiques bathymétriques et altimétriques des profils de l'avant-côte jusqu'à la digue ou dune
- la granulométrie du sédiment de plage/dune (caractérisé par le diamètre médian)
- les conditions hydrodynamiques : niveau marin, hauteur et période de houle (déterminés avec le modèle de houle)

Les conditions testées correspondent aux conditions centennales déterminées dans le rapport AGR & IMDC (2014b), et montrées aux tableaux II.8 et II.9 (valeurs au large). Les niveaux marins sont transformés vers la côte comme décrit au rapport susmentionné, et comprennent 20 cm d'élévation du niveau marin à cause du changement climatique. Les conditions de houle au large sont transformées vers les côtes avec le modèle de houle. Les hauteurs de houle par section homogène et par condition sont affichées dans les figures II.27 et II.28.

Les trois tempêtes historiques dépassant les conditions centennales (voir chapitre II.8.1., page 33) qui ont été identifiées (AGR & IMDC 2014b) ont été calculées avec le test de digue et de dunes. La tempête d'Ouest du 28 février 2010 (Xynthia) est également calculée avec le test de digue, pour la calibration du modèle de submersion.

III.2. Le test de dunes

III.2.1. Méthode

Pour le calcul de l'érosion et la rupture éventuelle des dunes, le logiciel Duros-plus est employé. Ce logiciel est utilisé en Belgique et aux Pays-Bas (TAW, 1984/1999 & RIKZ, 2007) pour le test des cordons dunaires lors des événements extrêmes. Ce modèle monodimensionnel permet l'évaluation rapide d'un grand nombre de profils et calcule le profil dunaire résiduel après la tempête. En comparant ce profil d'équilibre au profil originel, on peut calculer le recul du trait de côte, et évaluer la sécurité après la tempête (à partir de la géométrie de la dune résiduelle).

Le test de dunes est fondé sur la méthodologie néerlandaise (approuvée par le gouvernement des Pays-Bas (RIKZ, 2007), et par les administrations Flamandes). Cette méthodologie est conçue pour l'évaluation des cordons dunaires ayant une fonction de protection contre les submersions.

Les éléments principaux de cette méthodologie sont les conditions hydrodynamiques, les caractéristiques topographiques (le profil de la dune et de l'avant-côte) et sédimentaires (diamètre médian du sable). La méthode prévoit la soustraction d'un volume dit « supplémentaire » au profil érodé (par définition 25 % du volume érodé au-dessus du niveau d'eau), pour prendre une marge de sécurité sur le calcul du modèle. On obtient ainsi un « profil érodé » qui est comparé à un « profil limite » qui correspond aux caractéristiques minimales de la dune lui permettant de continuer à jouer son rôle de protection.

Afin de pouvoir qualifier la digue comme « résistante » aux conditions testées, il faut qu'un profil « limite » soit présent après la tempête. Le profil limite est un profil critique type, considéré stable, et défini géométriquement : une pente 1:1 côté mer, une largeur de crête de 3m et une pente arrière de 1:2. La cote de crête au-dessus du niveau d'eau exigée dépend des conditions testées (hauteur de houle) : $R = \max(0,12 * T_p * (H_s)^{1/2}; 0,25m)$, avec T_p la période de pic et H_s la hauteur significative correspondante aux conditions testées. La figure III.1 montre le principe du test, avec le profil limite (brun) et le profil post-tempête de la dune (vert). Si le profil limite peut être intégré dans le profil post-tempête de la dune, celle-ci passe le test, et est donc considérée comme résistante aux conditions testées.

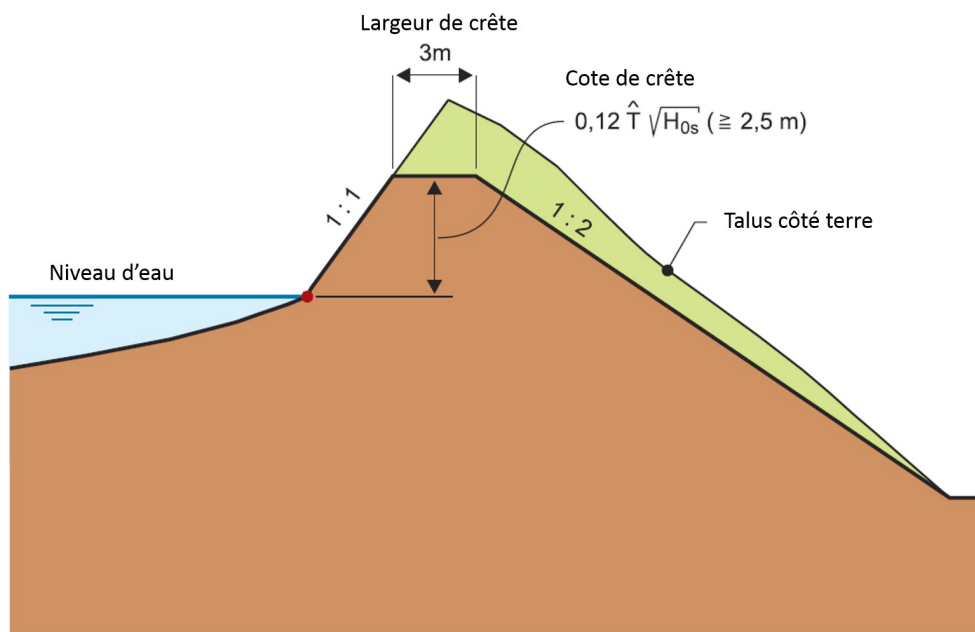


Figure III.1: Définition du profil limite du test de dune (RIKZ, 2007)

Ce modèle est une simplification de la réalité qui permet d'évaluer systématiquement les cordons dunaires ou autres formations meubles. Certains processus ne sont pas pris en compte, tels que les effets de variation de la durée de la tempête, les pluies et le vent.

Pour l'aléa à échéance 100 ans, l'évolution moyenne du trait de côte sur cette période (avancement ou recul moyen par an, principalement causée par le transit littoral) est superposée à l'effet ponctuel d'une tempête avec le test de dunes.

Un exemple d'un calcul avec Duros-plus pour le test des dunes dans le Calvados (dune du marais de Graye et Ver-sur-Mer) est présenté à la figure III.6.

Le test de dunes ne permet pas de prendre en compte les ouvrages (enrochements en pied de dune par exemple). Il est utilisé pour évaluer l'effet de protection côtière des cordons dunaires naturels (sans ouvrages), ainsi que les profils côtiers où les ouvrages sont supposés inefficaces ou détruits par la tempête étudiée. Si ces ouvrages sont tout de même jugés assez résistants comme ouvrage de protection, les calculs peuvent être faits avec le logiciel Durosta, de manière analogue que les digues (voir chapitre III.3., page 67).

Il est important de noter que les ouvrages en enrochements situés en pied de dune ne doivent pas être systématiquement pris en compte pour les raisons suivantes :

- Les endroits juste à côté d'un enrochement sont souvent plus sensibles à l'érosion : l'affouillement est localement accru par des courants accélérés.
- Les cotes de crête des enrochements fixant la côte ne sont le plus souvent pas prévues pour des niveaux extrêmes. Dans ce cas, lors des phénomènes extrêmes, il se peut que l'enrochement soit submergé par le niveau marin, et donc que l'érosion se produise au-dessus ou derrière l'ouvrage.

L'effet des enrochements ne peut donc pas être considéré comme positif ou ralentissant l'érosion dans tous les cas. Par conséquent, il est plus judicieux de ne pas prendre en compte les enrochements de faible altimétrie et/ou continuité le long de la côte.

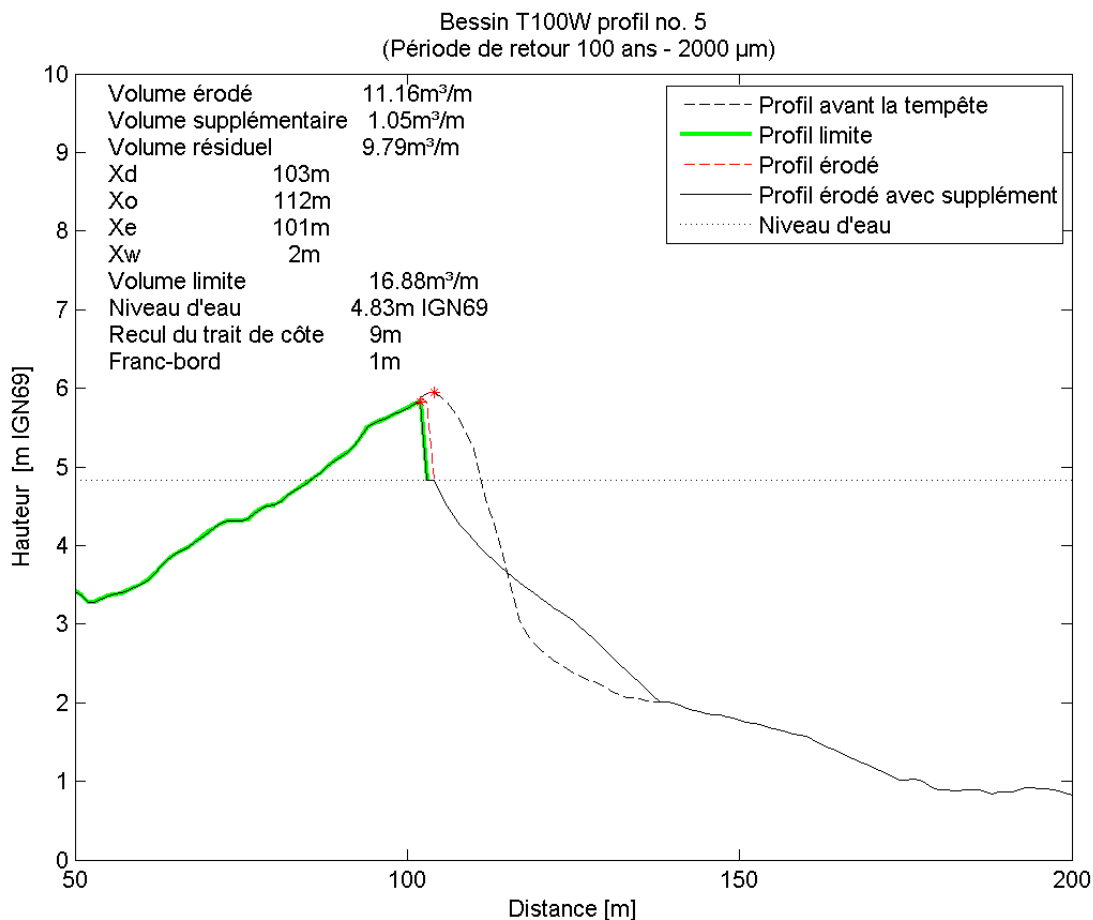


Figure III.2: Exemple du test de dune, effectué sur un profil de la dune du marais de Graye – Ver-sur-Mer ; le profil érodé sans (rouge) et avec (noir) soustraction du « supplément » (25 % du volume érodé au-dessus du niveau de l'eau). Le « profil limite » (vert) continue sur l'arrière pays (situé sous le niveau marin), et la dune ne résiste par conséquent pas aux conditions testées.

Le test de dune permet donc de localiser les endroits les plus faibles aux conditions de référence (T100) et pour les tempêtes historiques. Pour chaque cordon naturel, la condition la plus critique est retenue pour la définition des brèches de dune.

III.2.2. Secteur Bessin

Trois cordons naturels sont identifiés sur le secteur du Bessin :

- la dune du marais de l'Edit, zone entre Bernières et Courseulles-sur-Mer (section homogène BSH3)
- la dune du marais de Graye – Ver-sur-Mer (section homogène BSH5)
- la dune du marais de Ver-sur-mer et Meuvaines (section homogène BSH 7 et 8)

Pour le scénario de référence, le test de dune est effectué sur ces trois secteurs, en conditions centennales (T100), incluant 20 cm d'élévation du niveau d'eau (prise en compte du changement climatique), ainsi que les trois tempêtes historiques du nord dépassant le T100. Ces conditions correspondent aux conditions de référence du PPRL.

III.2.2.1. Marais de L'Edit

22 profils sont tirés des mesures LIDAR. Chaque profil, long de 2 km, est orienté perpendiculairement à la côte. La distance entre deux profils successifs est de 50 m. Les conditions centennales pour ce secteur sont issues du modèle de houle 2D, et sont résumés au tableau suivant.

Tableau III.1: Conditions du test de dunes : marais de l'Edit.

Conditions	Diamètre médian du sable D50 (m)	Niveau d'eau (m IGN69)		Hauteur de houle Hs (m)	
		Min (k1)	Max (k10)	Max (k1)	Min (k10)
Nord – Nord-Est	0,002	1,55	3,94	5,59	2,27
Ouest		2,63	4,48	4,52	2,21

L'érosion des dunes est maximale avec le k10 des conditions d'Ouest (couples de niveau d'eau maximal). Même dans ces conditions, la dune semble stable : le recul maximal est de 6 m et le recul moyen de 3 m. Le résultat de l'érosion maximale est montré dans la figure III.3.

La dune résiduelle est assez large et haute pour garantir le « profil limite » (profil minimal nécessaire après la tempête, pour que la dune soit stable, trait vert dans la figure), et la crête de dune n'est pas touchée par l'érosion. On peut donc considérer que la dune du marais de l'Edit résiste aux conditions de référence.

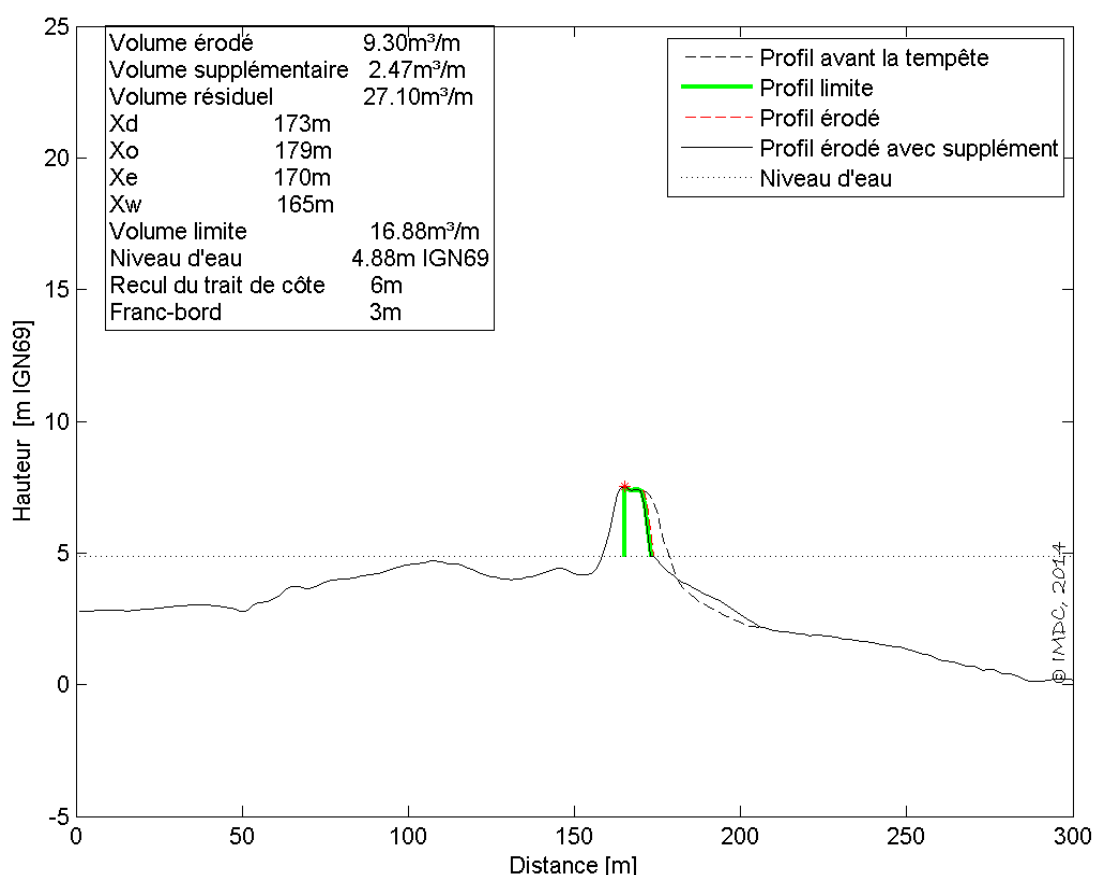


Figure III.3: Résultat du test de dune, marais de l'Edit, couple T100 k10 Ouest, érosion maximale de 6 m (profil 3_17).

III.2.2.2. Marais de Graye – Ver-sur-Mer

51 profils sont tirés des mesures LIDAR. Chaque profil, long de 2 km, est orienté perpendiculairement à la côte. La distance entre deux profils successifs est de 50 m. Les conditions centennales pour ce secteur sont issues du modèle de houle 2D, et sont résumés au tableau suivant.

Tableau III.2: Conditions du test de dunes : marais de Graye – Ver-sur-Mer

Conditions	Diamètre médian du sable D50 (m)	Niveau d'eau (m IGN69)		Hauteur de houle Hs (m)	
		Min (k1)	Max (k10)	Max (k1)	Min (k10)
Nord – Nord-Est	0,002	1,55	3,94	5,88	2,32
Ouest		2,6	4,43	4,98	2,36

Le recul des dunes en conditions centennales (T100) est montré graphiquement dans les figures III.4 et III.5. De la comparaison des deux figures, il apparaît que les conditions d'Ouest (figure III.5) sont plus pénalisantes en termes de recul ponctuel.

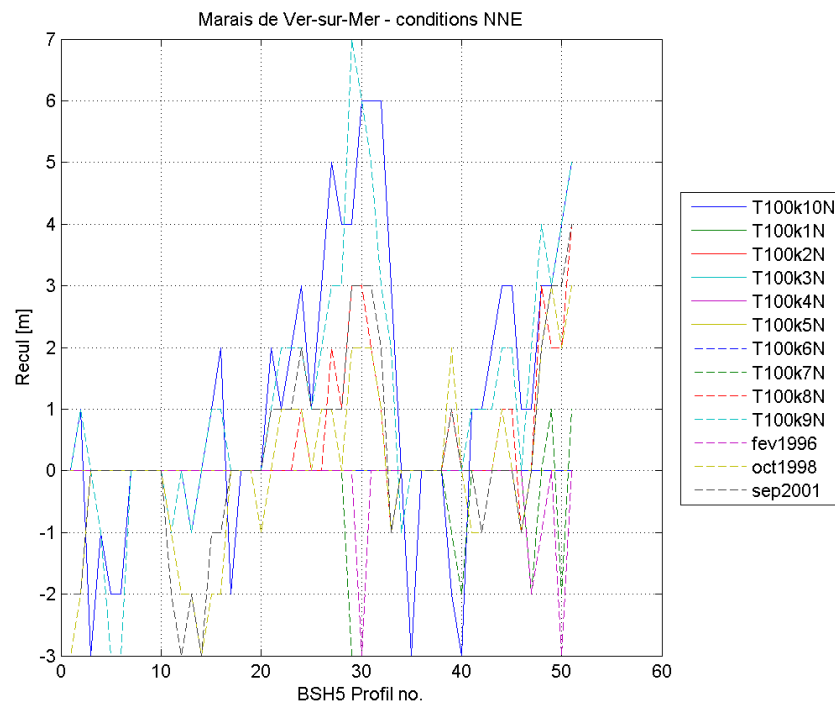


Figure III.4: Recul de dune en conditions de référence NNE, marais de Graye – et Ver-sur-Mer (positif = recul).

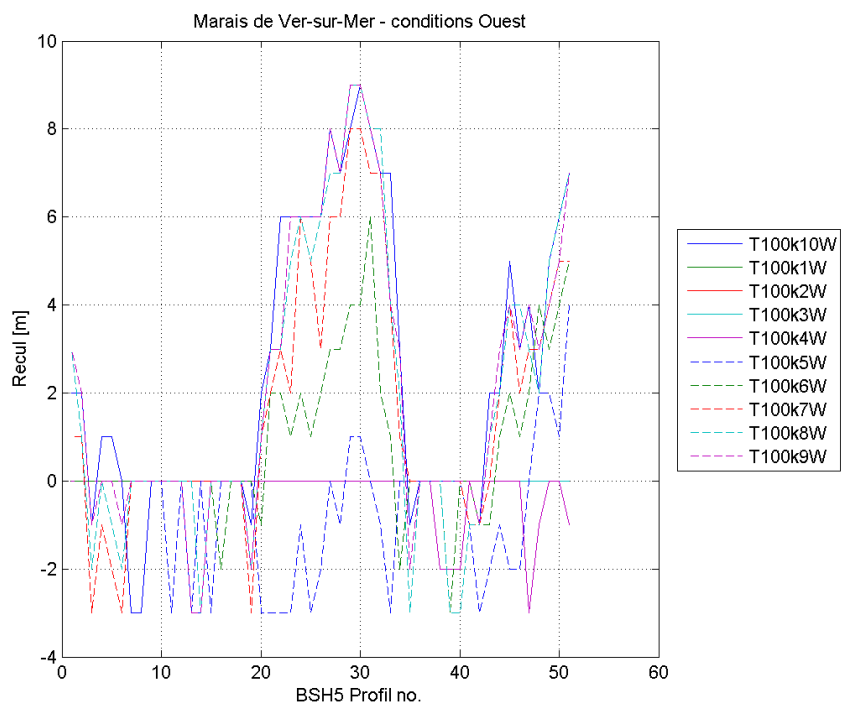


Figure III.5 : Recul de dune en conditions de référence Ouest, marais de Graye – et Ver-sur-Mer (positif = recul).

L'érosion des dunes est maximale avec les couples k9 et k10 en conditions d'Ouest (couples de niveau d'eau maximal). Le recul de côte maximal est de 9 m, et le recul moyen sur l'ensemble des profils est de 3 m (couples 8 à 10 Ouest).

Le recul maximal de 9 m se situe aux abords du profil n°30.

Le résultat du couple T100 k10 W du profil n°30 est montré dans la figure III.8. Sur cette planche, on voit que le « profil limite » (trait vert, défini au paragraphe III.2.1.) n'est plus présent dans le profil post-tempête. Au niveau de ce profil, la dune est donc défailante en conditions de référence. De manière analogue, plusieurs autres profils de dune ne passent pas le test :

- profils n°26 à 34 : brèche sur 400 m, juste à l'Est de la « Brèche Le Bisson », au niveau de l'Ancien Blockhaus à Graye-sur-Mer ;
- profils n°37 à 47 : brèche sur 500 m, à l'Ouest de la « Brèche le Bisson ».

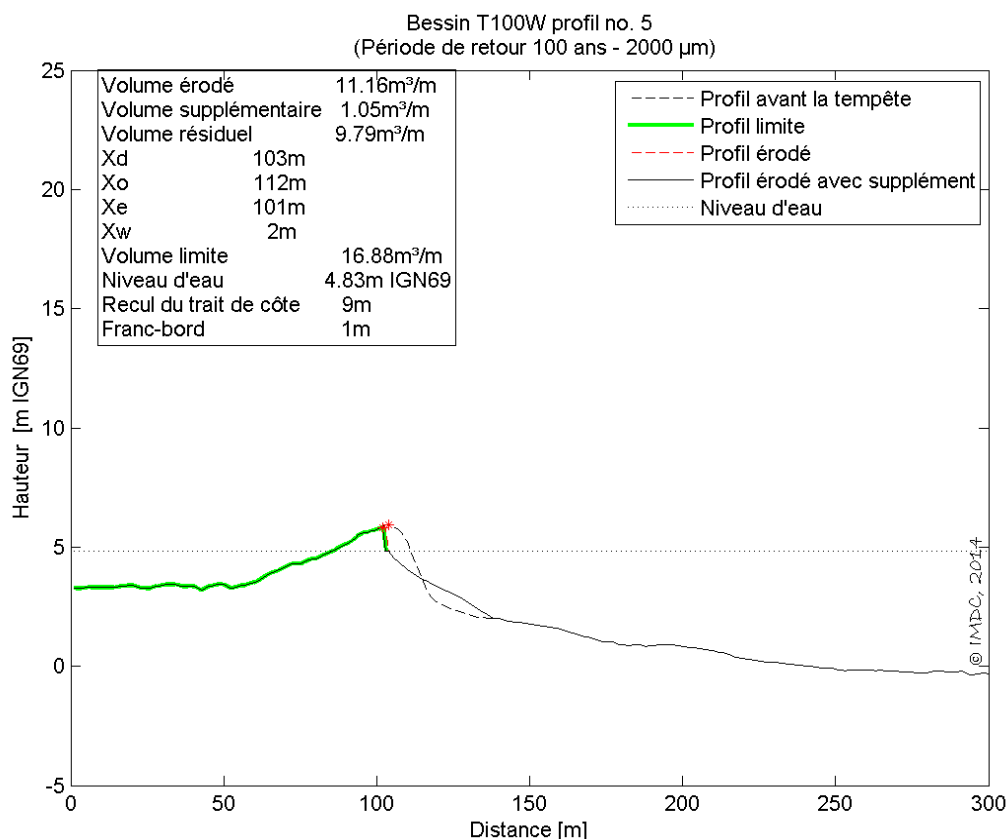


Figure III.6: Résultat du test de dunes, conditions T100 k10 W, marais de Graye – et Ver-sur-Mer, profil 5-30.

On peut donc conclure que la dune ne résiste pas aux conditions de référence du PPRL. Des brèches de dune seront simulées dans le marais de Graye – Ver-sur-Mer pour le scénario de référence du PPRL.

III.2.2.3. Marais de Ver-sur-Mer et Meuvaines

64 profils sont tirés des mesures LIDAR entre le Paisty Vert (Ver-s.-M.) et Roseau Plage (Asnelles). Chaque profil, long de 2 km, est orienté de manière perpendiculaire à la côte. La distance entre deux profils successifs est de 50 m. Les conditions centennales pour ce secteur sont issues du modèle de houle 2D, et sont résumés au tableau III.3.

Tableau III.3: Conditions du test de dunes : marais de Ver-sur-Mer et Meuvaines.

Conditions	Diamètre médian du sable D50 (m)	Niveau d'eau (m IGN69)		Hauteur de houle Hs (m)	
		Min (k1)	Max (k10)	Max (k1)	Min (k10)
Nord – Nord-Est	0,002	1,55	3,87	5,84	2,34
Ouest		2,57	4,38	4,94	2,49

Le recul des dunes en conditions centennales est montré graphiquement dans les figures suivantes. L'érosion des dunes est maximale avec les couples k9 et k10 en conditions d'Ouest (couples de niveau d'eau maximal).

Le recul moyen de ces deux couples est de 5 m, avec un pic au niveau du profil n°40 (recul de 9 m aux conditions T100 k9 W), dont le résultat est montré dans la figure III.12. Sur cette planche, on voit que le profil limite (trait vert) ne rentre pas dans la dune résiduelle après la tempête, et que la crête de dune est touchée par l'érosion. La dune résiduelle ne passe donc pas le test de dune, et le risque d'une rupture de la dune en conditions centennales est réel.

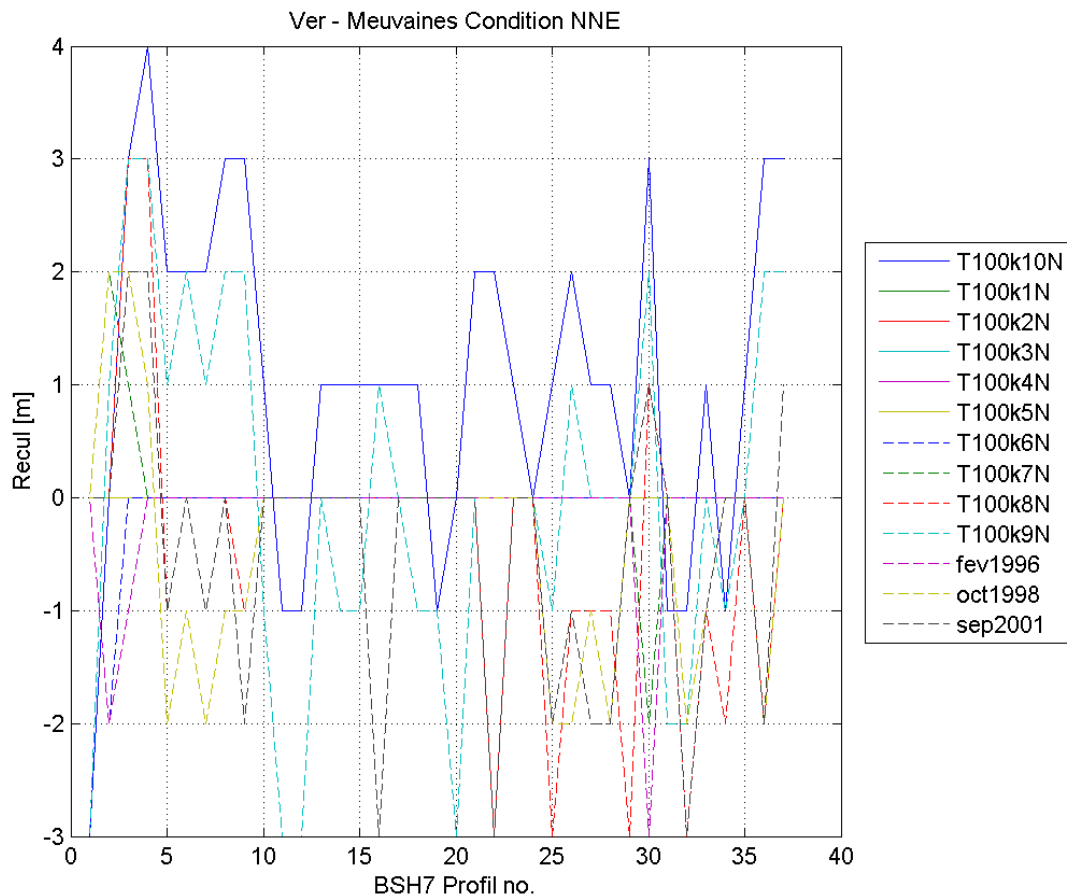


Figure III.7: Recul de dune, conditions de référence NNE, marais de Ver-sur-Mer (BSH 7)

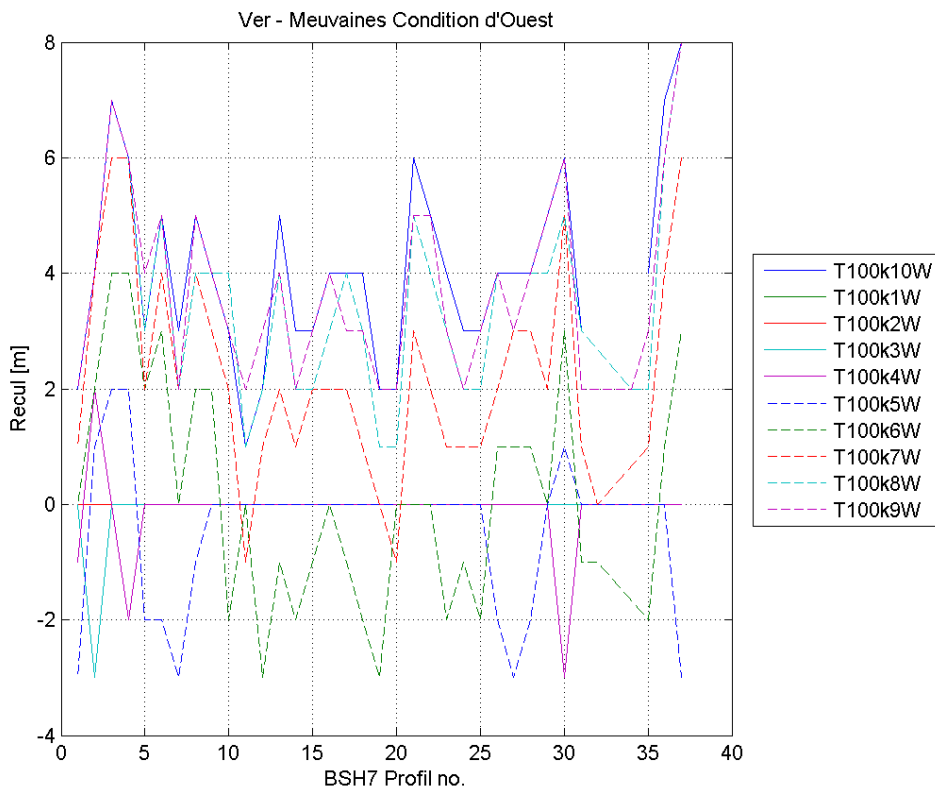


Figure III.8: Recul de dune en conditions de référence d'Ouest, marais de Ver-sur-Mer (BSH7)

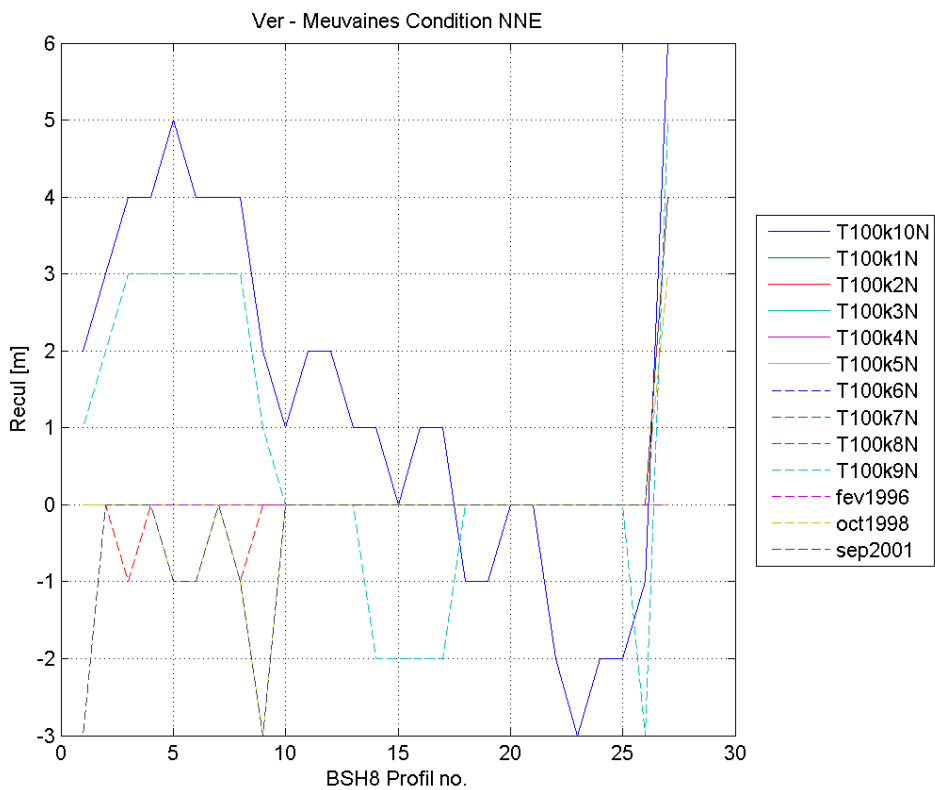


Figure III.9: Recul de dune, conditions de référence NNE, marais de Meuvaines (BSH 8)

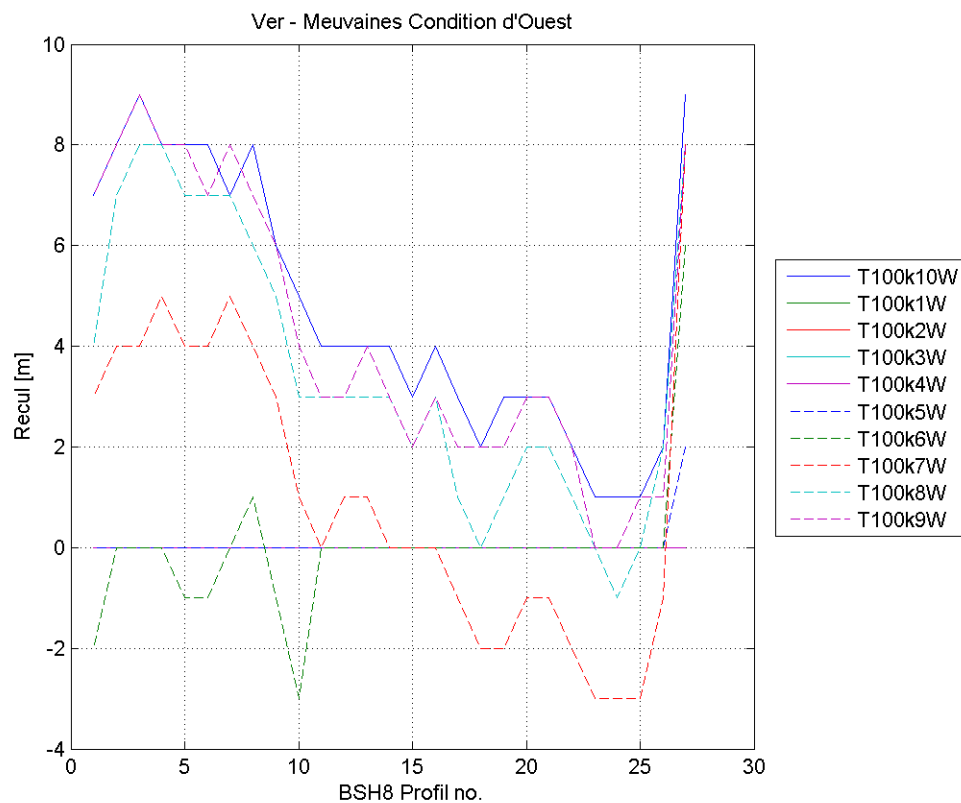


Figure III.10: Recul de dune en conditions de référence d'Ouest, marais de Meuvaines (BSH8)

De même, il est constaté qu'aux conditions k9 et k10 d'Ouest, **aucun profil de dune ne passe le test entre le Paisty Vert et Asnelles**, soit par le critère du profil limite, soit par surverse au-dessus de la crête de dune après érosion. La figure III.11 montre un exemple d'une dune exposée à une surverse après érosion au Paisty Vert.

L'ensemble de la dune ne résiste donc pas aux conditions de référence du PPRL. Une brèche de dune sera donc simulée sur l'ensemble de la dune du marais de Ver et Meuvaines pour le scénario de référence PPRL.

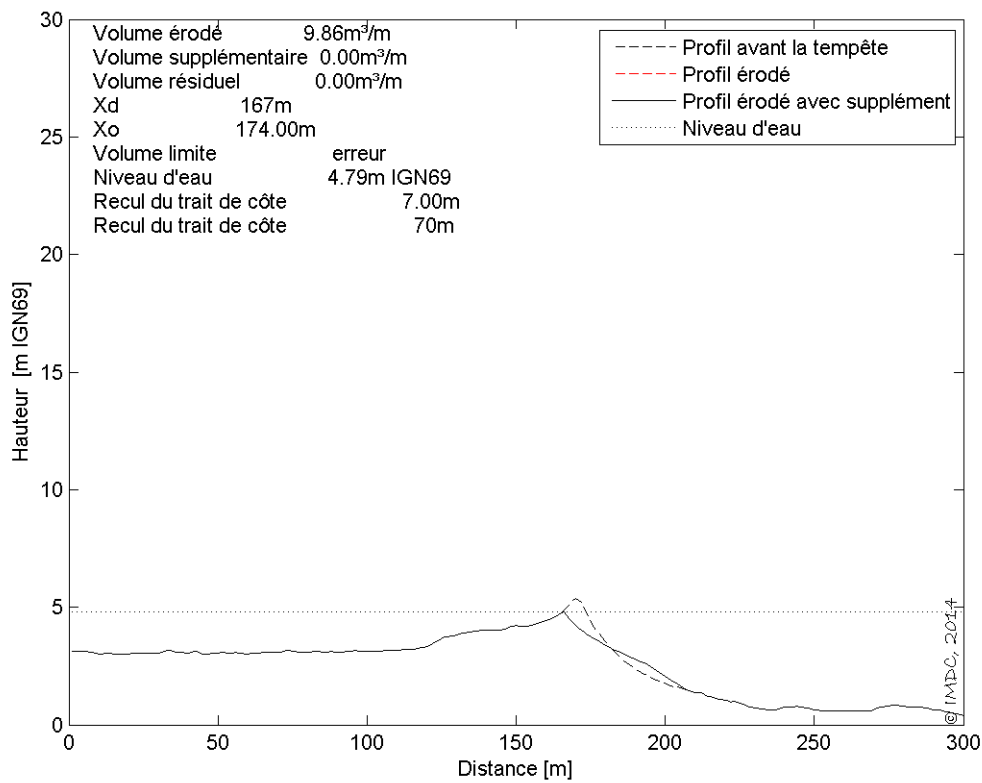


Figure III.11: Exemple d'un profil de dune exposée à une surverse après érosion, condition T100 k9 W, profil 7-3 (le Paisty Vert).

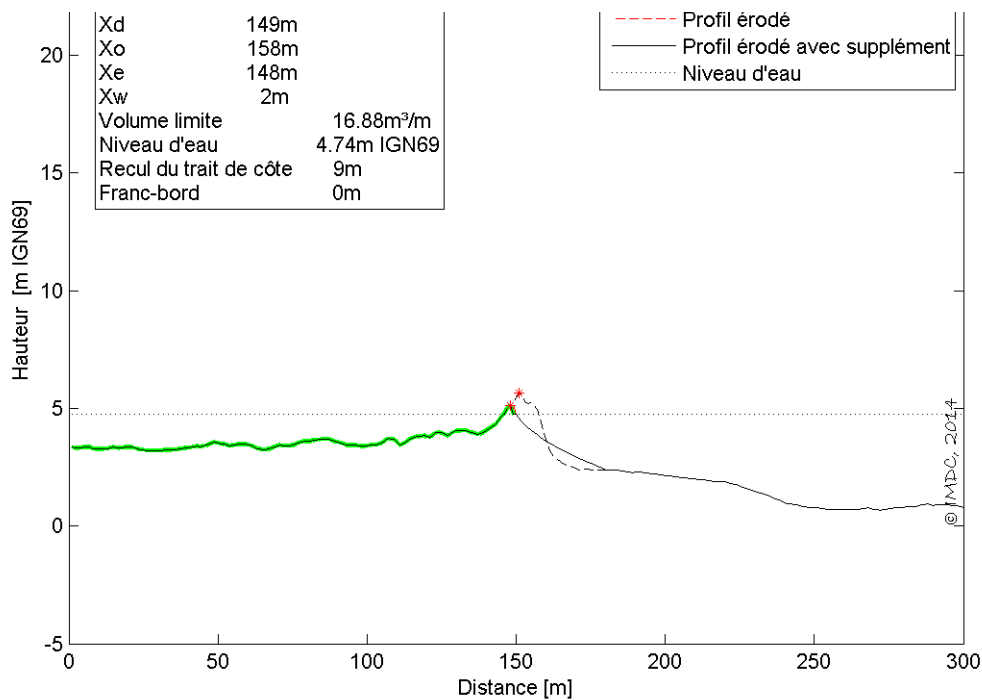


Figure III.12: Résultat du test de dunes, conditions T100 k9 W, marais de Meuvaines, profil 8-3.

III.2.3. Secteur Dives-Orne

Les cordons naturels suivants sont identifiés sur le secteur de Dives-Orne :

- la Pointe de Cabourg (section homogène DOSH2) ;
- la dune de Varaville et Franceville-Merville (section homogène DOSH4) ;
- la dune de Riva Bella (Ouistreham, section homogène DOSH9) ;
- le cordon naturel de Colleville-Montgomery (partie est de la section homogène DOSH11).

Le test de dune est effectué sur ces quatre secteurs en conditions centennales (T100), incluant 20 cm d'élévation du niveau d'eau pour prendre en compte le changement climatique, ainsi que pour les trois tempêtes du Nord historiques dépassant les conditions centennales. Ces conditions correspondent aux conditions de référence du PPRL.

III.2.3.1. Dune de la Pointe de Cabourg

La dune de la Pointe de Cabourg est un cordon littoral qui s'est formé de l'Ouest vers l'Est. Une cote de crête de 6,5 m IGN69 est garantie sur toute la longueur du cordon. La largeur minimale atteinte à ce niveau est de l'ordre de 14 m. Le niveau de crête remonte localement jusqu'à 12 m IGN69.

15 profils perpendiculaires à la côte, avec une distance entre profils de 50 m, sont extraits des mesures Lidar. Le test de dune est effectué sur l'ensemble des profils de la dune et pour toutes les conditions de référence du PPRL. Le recul ponctuel est présenté dans les figures III.13 et III.14.

Les conditions d'Ouest (couples k9 et k10,) sont critiques (voir figure III.14). Le recul moyen sur toute la Pointe de Cabourg est de 10 m, avec une valeur maximale de 15 m (profil 11, condition k7W).

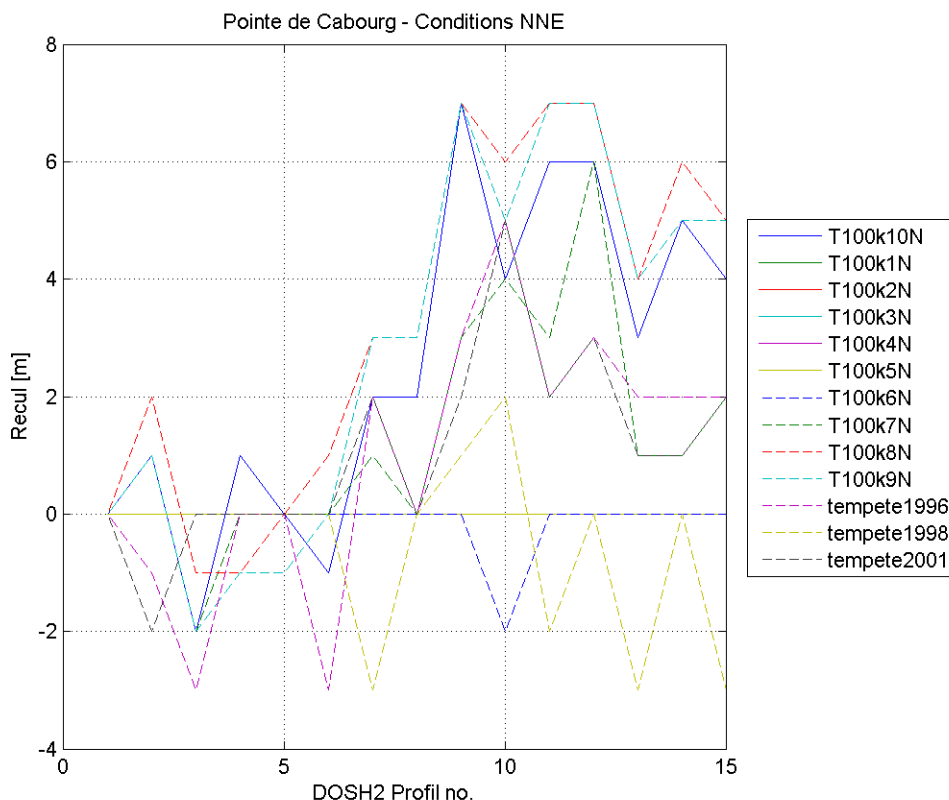


Figure III.13: Recul ponctuel en conditions de référence NNE : Pointe de Cabourg.

À aucun endroit, et dans aucune condition de référence, le test de dune n'indique une rupture de la dune.

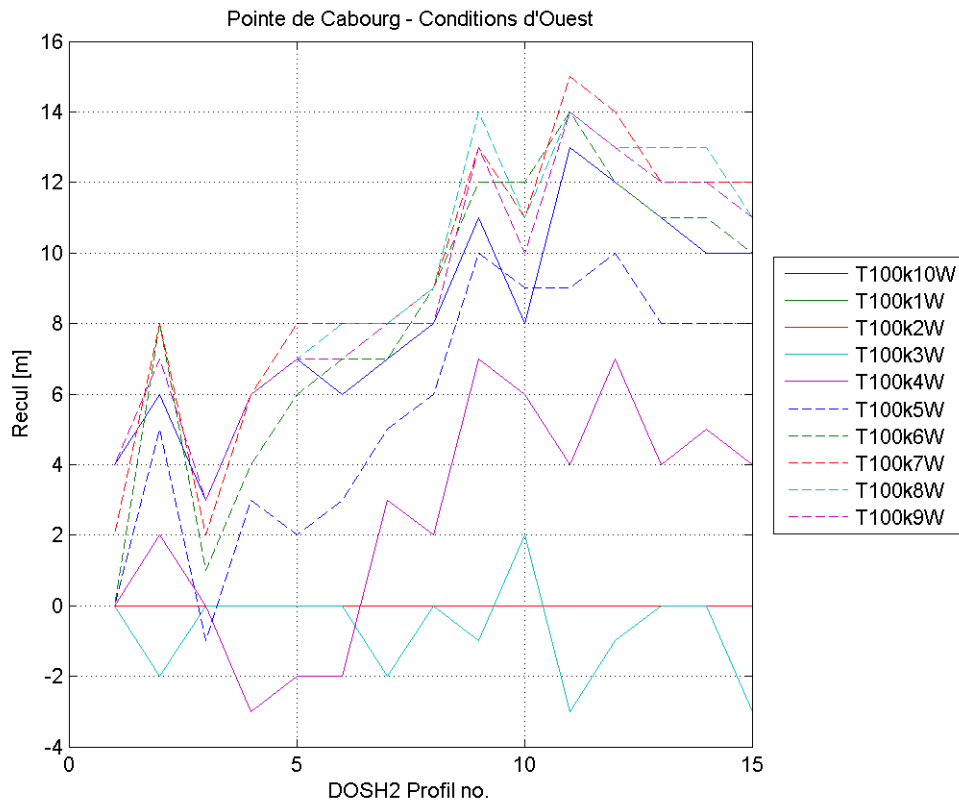


Figure III.14: Recul ponctuel en conditions de référence Ouest : Pointe de Cabourg

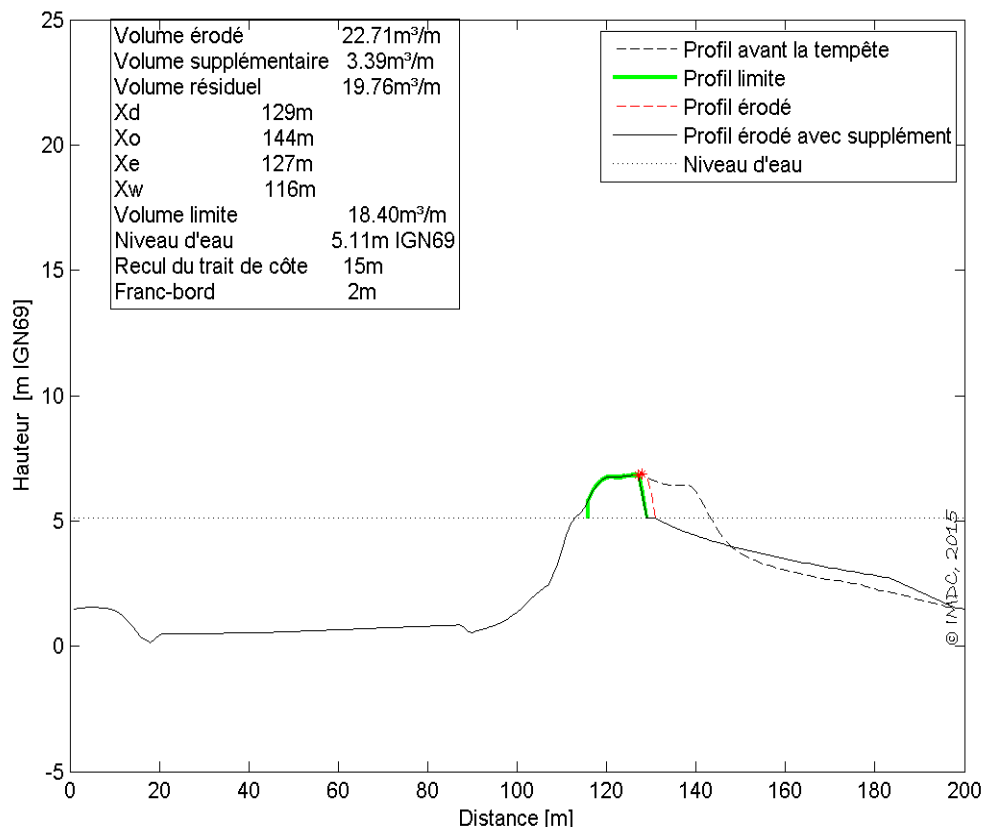


Figure III.15: Résultat du test de dune sur la Pointe de Cabourg (profil 2-11, condition T100 k7W).

III.2.3.2. Dune de Varaville et Franceville-Merville

Les communes de Varaville et Franceville-Merville sont protégées par un long cordon dunaire naturel longeant tout le trait de côte. Cette dune est à la fois fortement végétalisée et urbanisée (avec des habitations en crête de dune). Elle est renforcée en pied selon les secteurs par du béton armé, des palplanches en acier, en bois, ou par des perrés en briques. Le point le plus haut de la dune est situé entre la rue Saint-Charles et la rue des Bains, et dépasse les 20 m (Litto3D, 2013). La cote atteinte sur tout le linéaire est de l'ordre de 8,5 m IGN69 à 10,0 m IGN69 sur Varaville, et 7 m IGN69 sur la commune de Franceville-Merville, à l'exception des quelques sentiers et passages piétons. La zone la plus basse de la dune est située au niveau du passage au rond point du Boulevard Wattier et l'avenue de Pont L'Evêque (cotes de 6,4 m IGN69 et 5,4 m IGN69 à 6,0 m IGN69).

128 profils perpendiculaires à la côte sont extraits des mesures Lidar sur le tronçon de dune. Le test de dune est effectué sur l'ensemble de ces profils. Les reculs ponctuels issus du test de dunes sont présentés dans les figures III.16 et III.18.

Deux pics d'érosion sont repérés :

- Au niveau du profil 4-17, situé au niveau de l'Impasse Jeanne Thérèse à Le Hôme (figure III.20). Un recul maximal de 17 m est trouvé en conditions de référence. La dune est assez haute et large sur ce secteur, et il n'y a pas de zone basse immédiatement en amont de la dune.
- Au niveau du profil 4-85 entre l'avenue des Baigneurs et l'avenue de Jean Mermoz (figure III.23). Un recul maximal de 17 m est obtenu pour les conditions de référence. Ici aussi, la dune est assez large pour éviter une brèche de dune.

Le recul moyen sur l'ensemble de la dune est de 1 mètre.

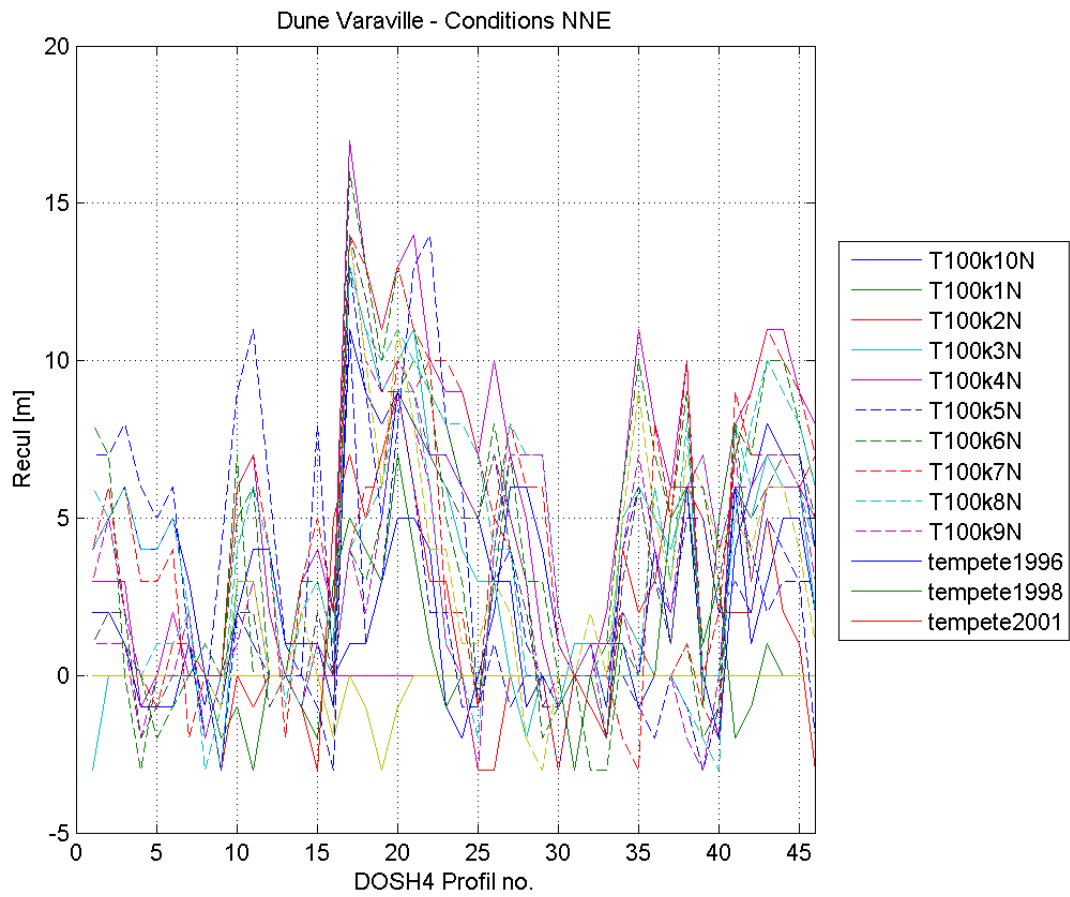


Figure III.16: Recul ponctuel en conditions de référence NNE, dune de Varaville.

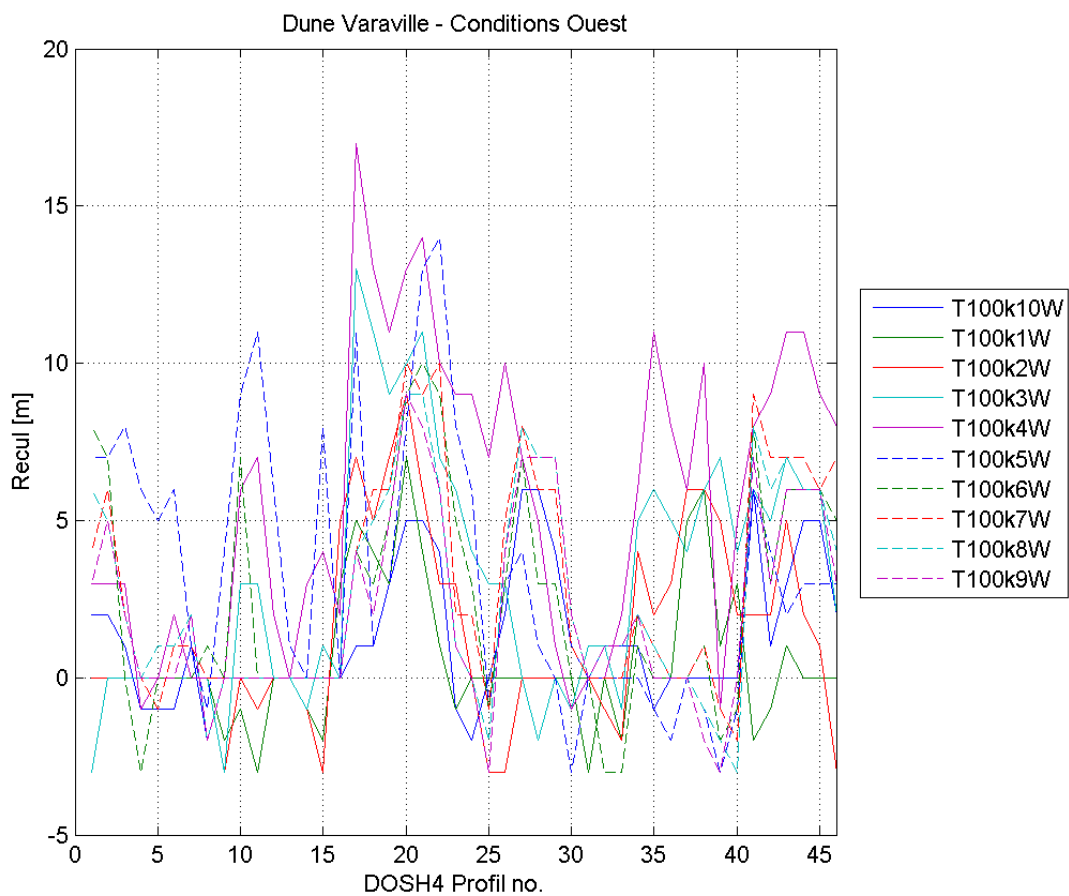


Figure III.17: Recul ponctuel en conditions de référence Ouest, dune de Varaville.

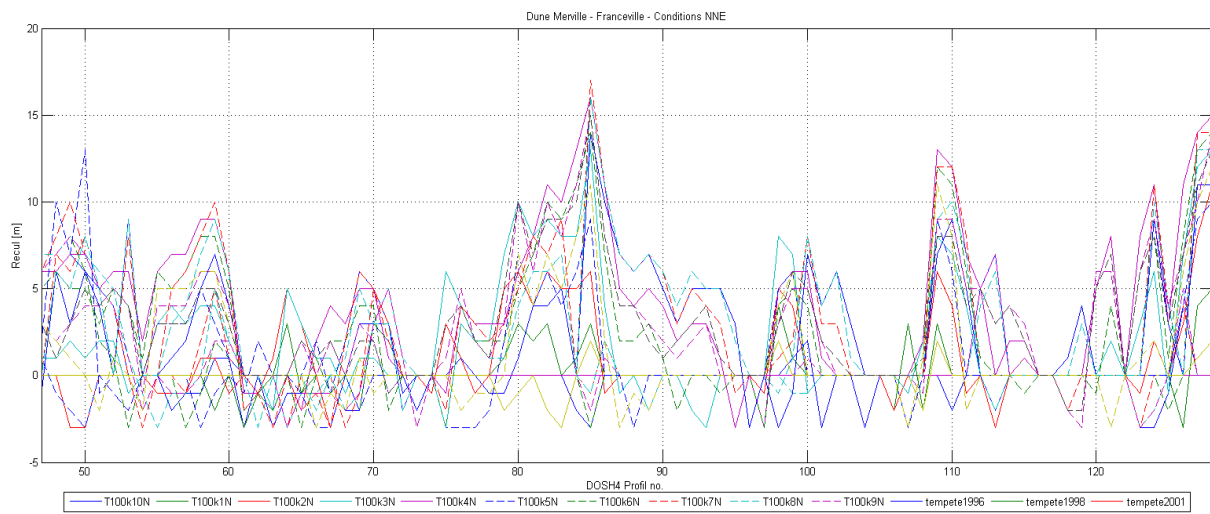


Figure III.18: Recul ponctuel en conditions de référence NNE, dune Franceville-Merville-plage

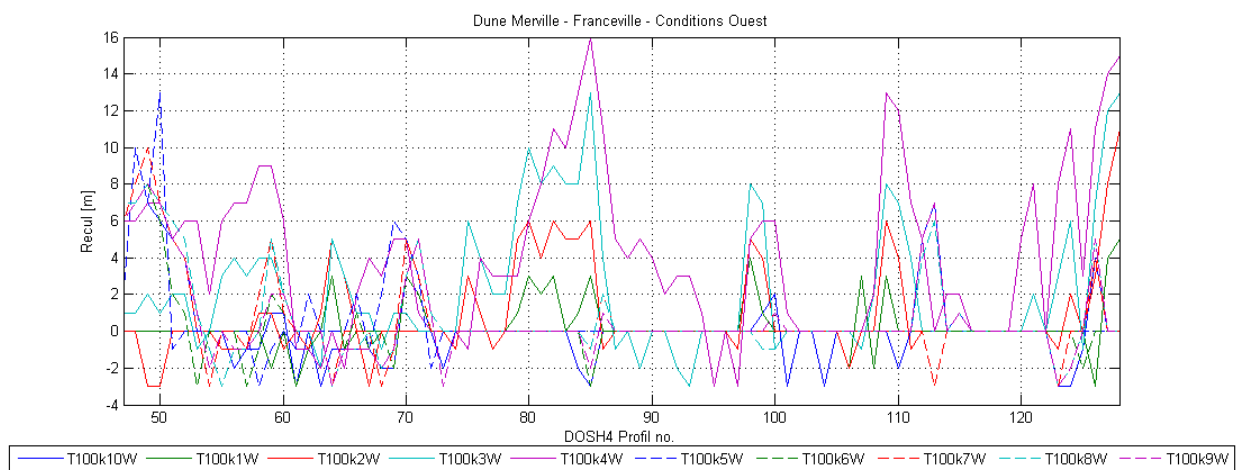


Figure III.19: : Recul ponctuel en conditions de référence NNE, dune Franceville-Merville-plage



Figure III.20: Localisation du profil 4-17, Impasse Jeanne Thérèse, Le Hôme (Varaville).

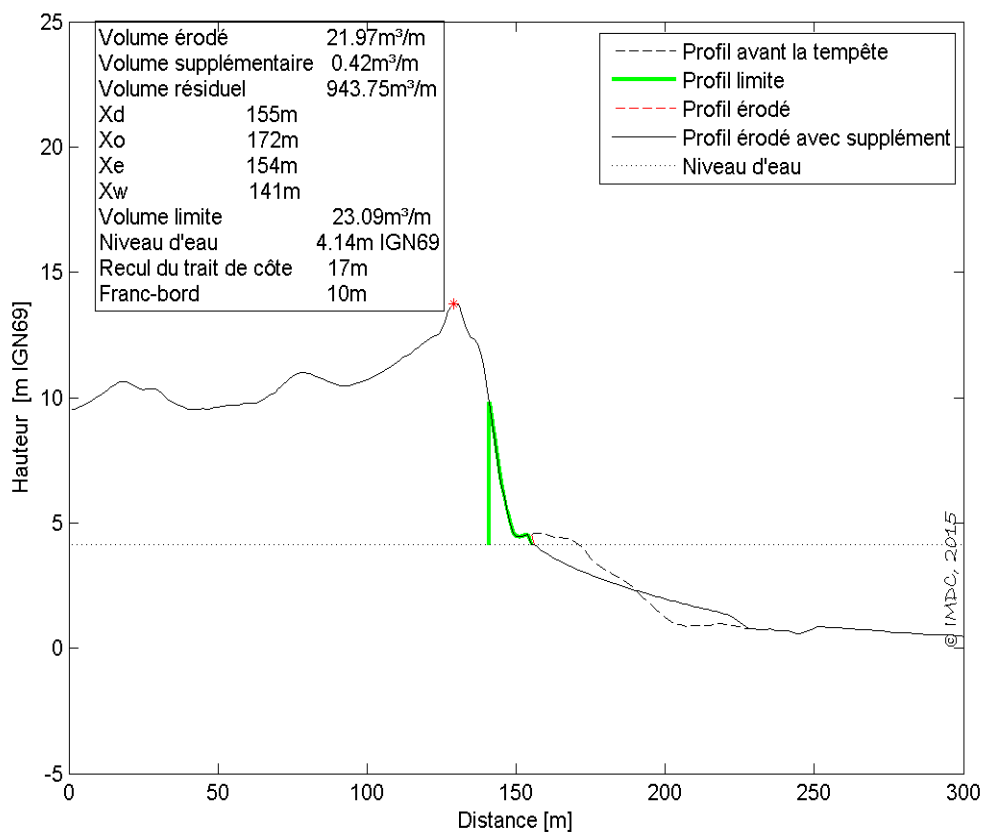


Figure III.21: Résultat du test de dune : recul de côte critique sur 17 m (profil 4-17, le Hôme), k4W.



Figure III.22: Localisation du profil 4-85 à Franceville-Merville-Plage.

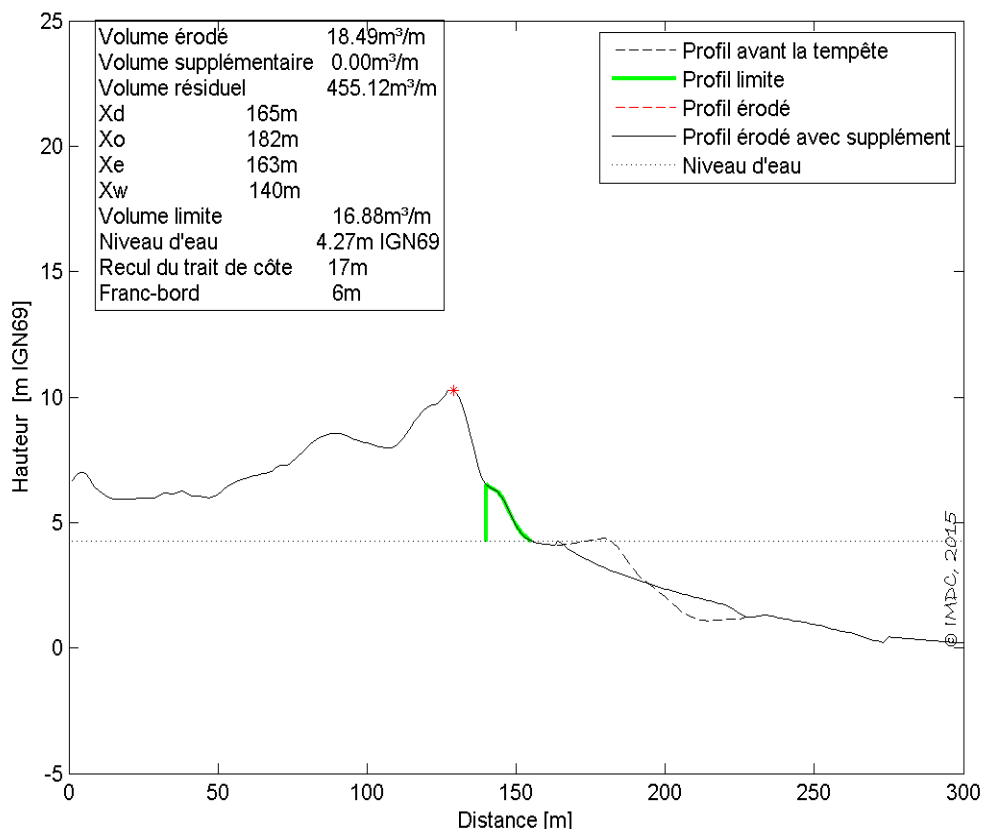


Figure III.23: Résultat du test de dune, recul de côte critique sur 17 m (profil 4-85).

III.2.3.3. Dune de Riva-Bella

La dune de Riva Bella se trouve à l'Ouest de la gare maritime. Plusieurs blockhaus du Mur de l'Atlantique sont entièrement ensablés sous la dune, mais il manque un ouvrage linéaire. Plusieurs germes de plantes montrent la tendance à l'engraissement de la dune, suite aux extensions successives du port de Ouistreham.

Les reculs ponctuels en conditions de référence sont présentés dans les graphes des figures III.24 et III.25. Un recul important de 11 m est noté sur le profil 9-19 aux conditions k6W. À l'extrémité ouest de la dune (avant la transition à la digue en béton de Ouistreham, BSH10), un recul ponctuel de 12 m est trouvé en conditions k5W.

Les résultats graphiques du test, présentés dans les figures III.26 et III.27, montrent que cette érosion se produit sur la plage devant la dune et que le remblai dunaire n'est pas touché par l'érosion.

Le risque d'une rupture est donc inexistant sur la dune de Riva Bella. Le recul moyen sur la dune de Riva Bella est de 4 m (conditions k5W, k8N et k9N).

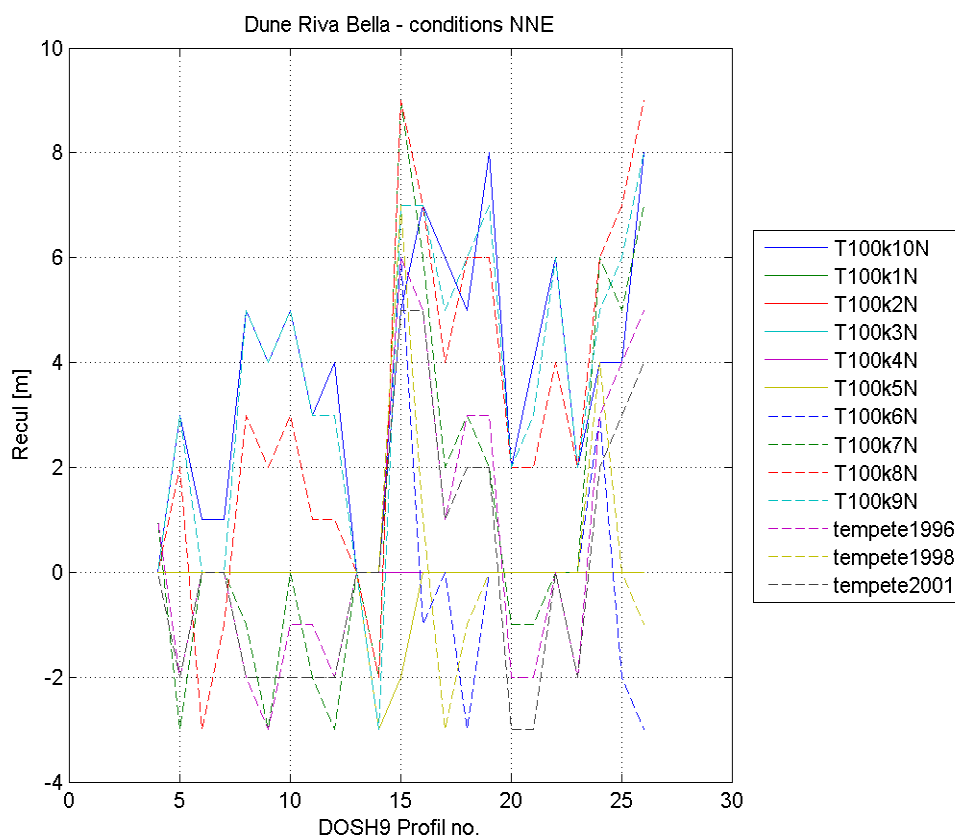


Figure III.24: Recul ponctuel en conditions de référence NNE, dune de Riva Bella à Ouistreham.

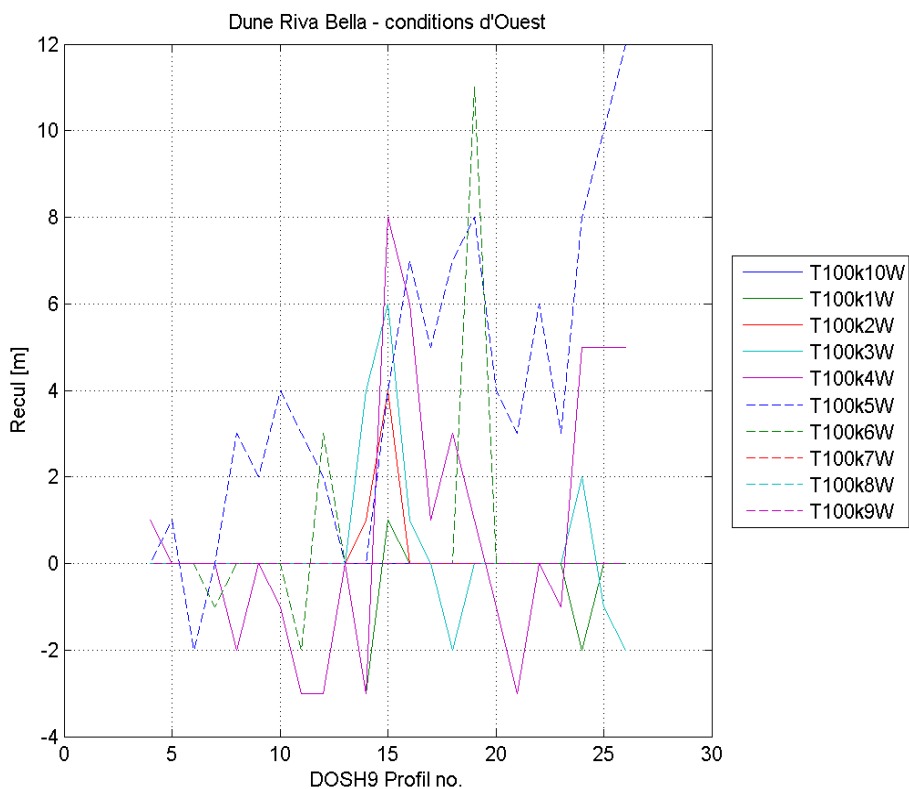


Figure III.25: Recul ponctuel en conditions de référence Ouest, dune de Riva Bella à Ouistreham.

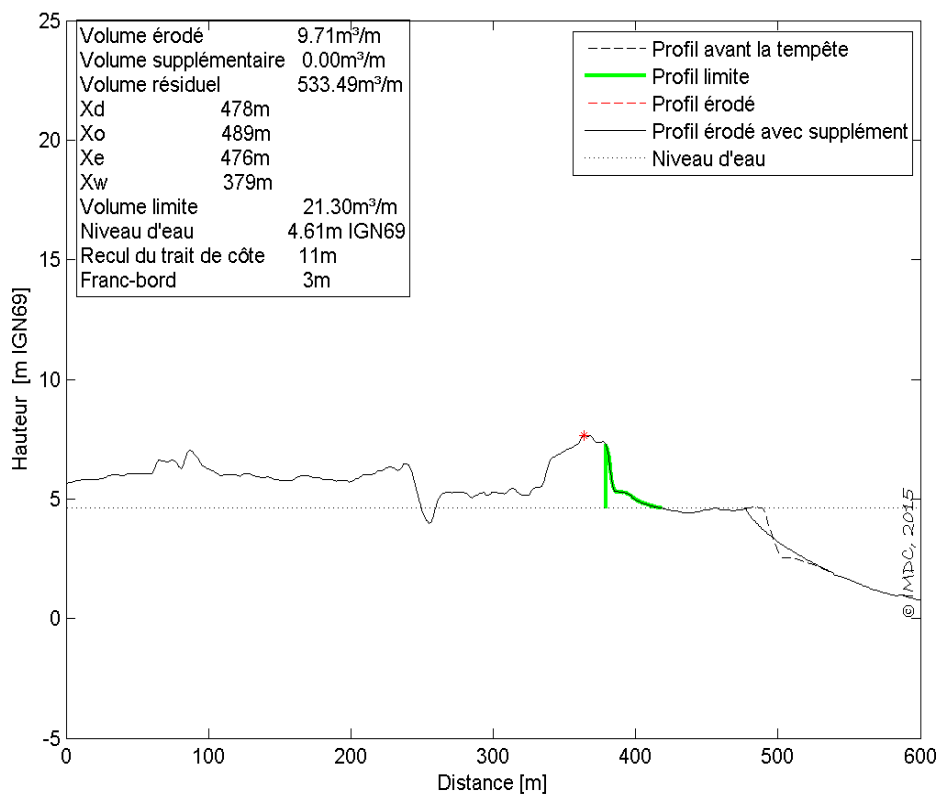


Figure III.26: Résultat du test de dunes, recul sur 11 m de la dune de Riva Bella, profil 9-19, condition k6W.

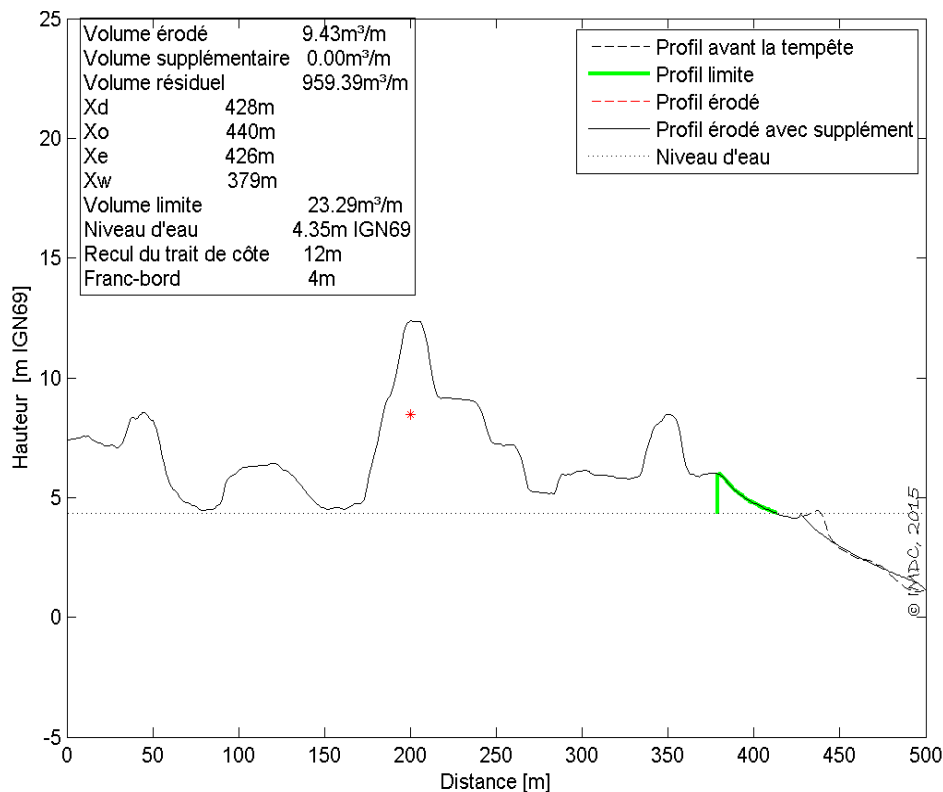


Figure III.27: Résultat du test de dunes, recul maximal de la dune de Riva Bella, profil 9-26, condition k5W.

III.2.3.4. Dune de Colleville-Montgomery

La commune de Colleville-Montgomery est protégée par une dune naturelle. L'absence de tout ouvrage anthropique est un choix fait par la municipalité depuis des années, afin de favoriser le caractère naturel de la bordure maritime.

Les dunes sont protégées par des ganivelles et sont surveillées lors de tempêtes marines et/ou des forts coefficients de marées. Le niveau des dunes varie de 6 m IGN69 à 6,5 m IGN69. Elles sont assez homogènes sur toute la commune, et l'arrière-pays est protégé contre la submersion en dessous de la cote de 4 m IGN69 (derrière la D514) à une distance de 250 m (à l'Est) à 120 m (à l'Ouest). En cas de dégâts aux dunes, elles sont rehaussées (voir événement de 2005).

Les reculs ponctuels en conditions de référence calculés avec le test de dunes sont présentés dans les figures III.28 et III.29. Le recul maximal est de 17 m, au profil 11-8 en conditions k4W. D'autres points de recul de la dune se trouvent au niveau des profils 11-4 et 11-6 (15 et 16 m en conditions k4W), 11-9 (15 m, k6W). La localisation de ces points de faiblesse est fournie dans la figure III.30.

Les figures III.31 à III.34 montrent que malgré le recul important de la dune, la crête de dune n'est pas touchée, et que la dune résiduelle est assez large pour éviter une rupture totale de la dune. L'aléa sera donc limité à l'aléa d'érosion.

Le recul moyen sur le secteur de Colleville est de 11 m (conditions k3W à k5W).

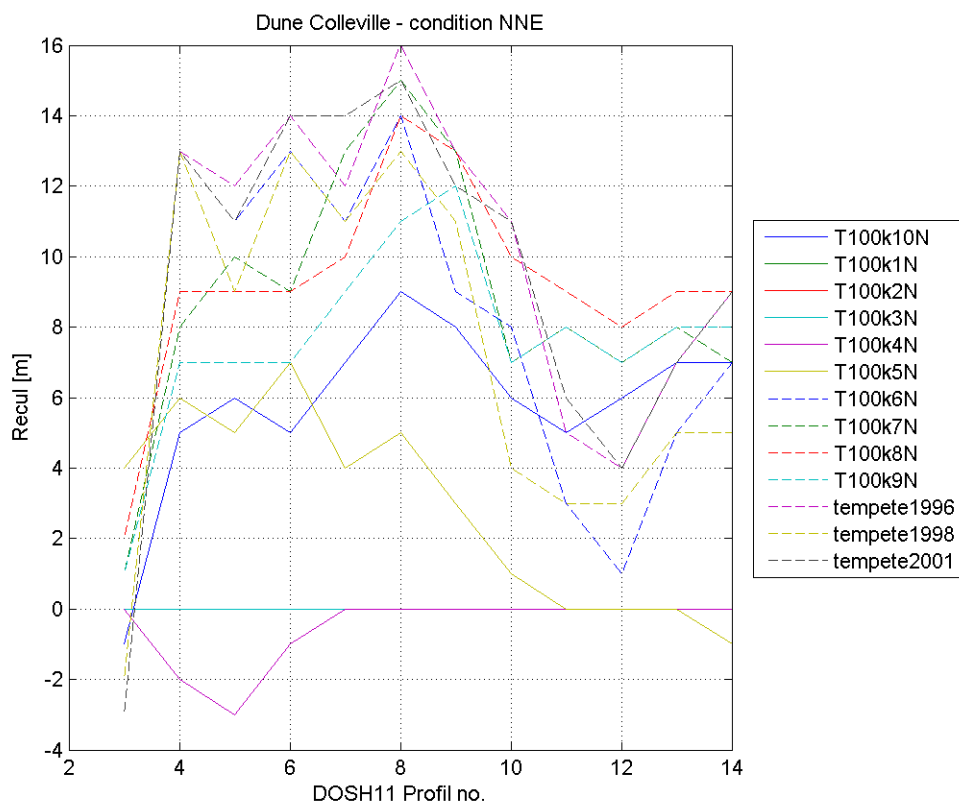


Figure III.28: Recul ponctuel en conditions de référence NNE, dune de Colleville-Montgomery.

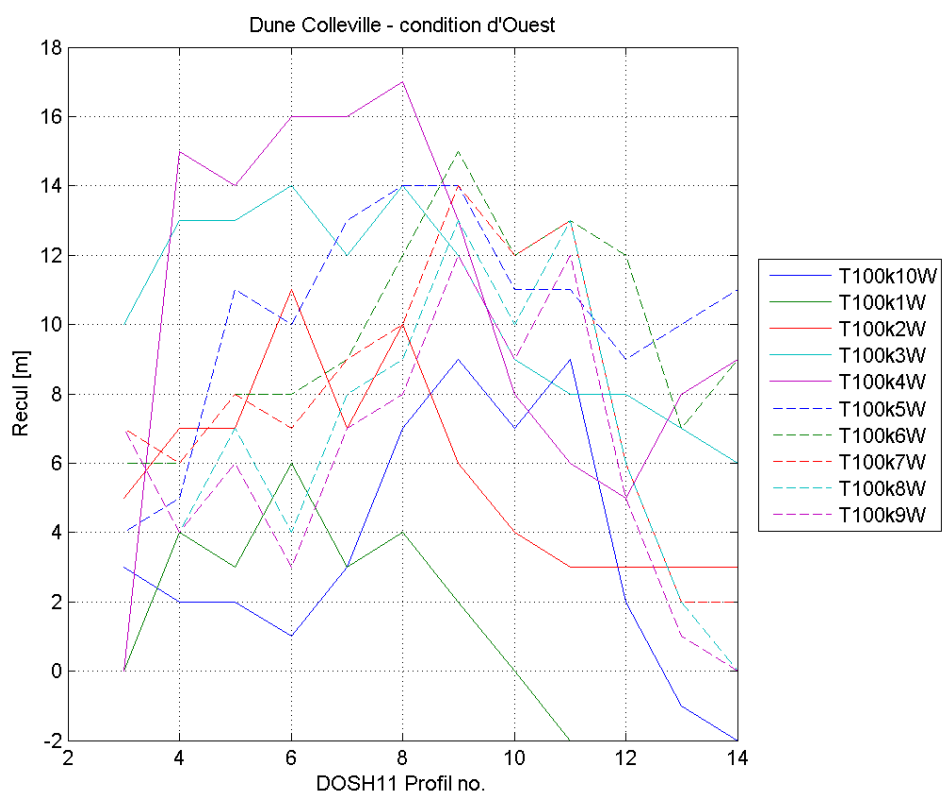


Figure III.29: Recul ponctuel en conditions de référence Ouest, dune de Colleville-Montgomery.



Figure III.30: Localisation des profils (de gauche à droite) 11-11, 11-9, 11-8, 11-6 et 11-4 à Colleville-Montgomery.

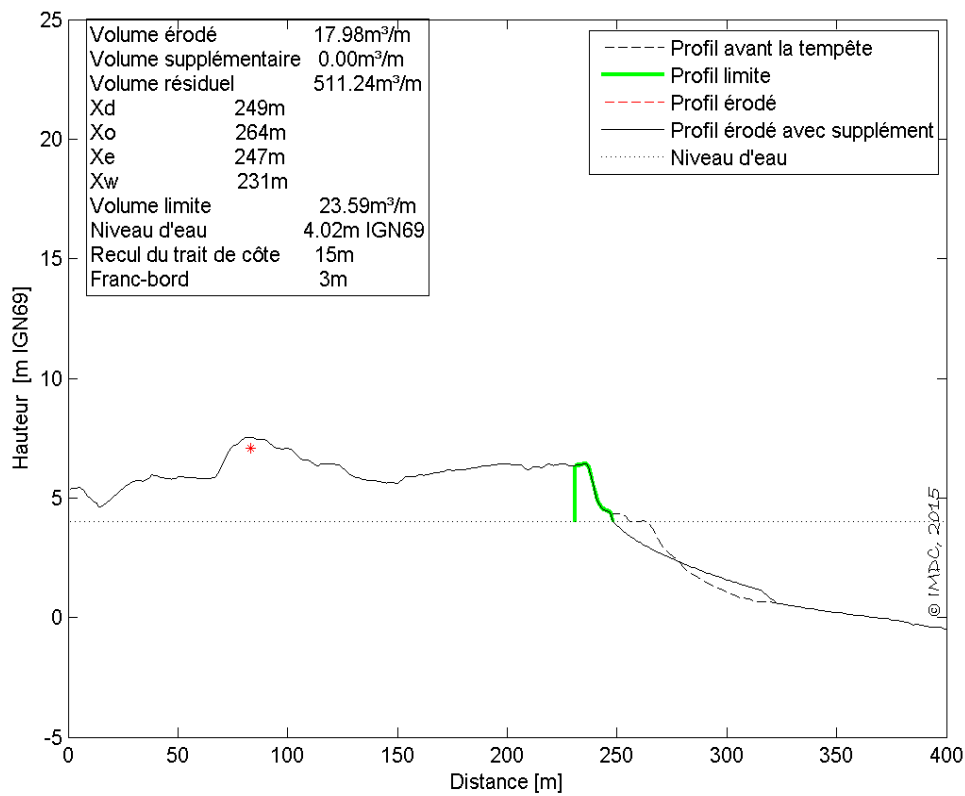


Figure III.31: Résultat du test de dune, condition k4W, profil 11-4, Colleville-Montgomery.

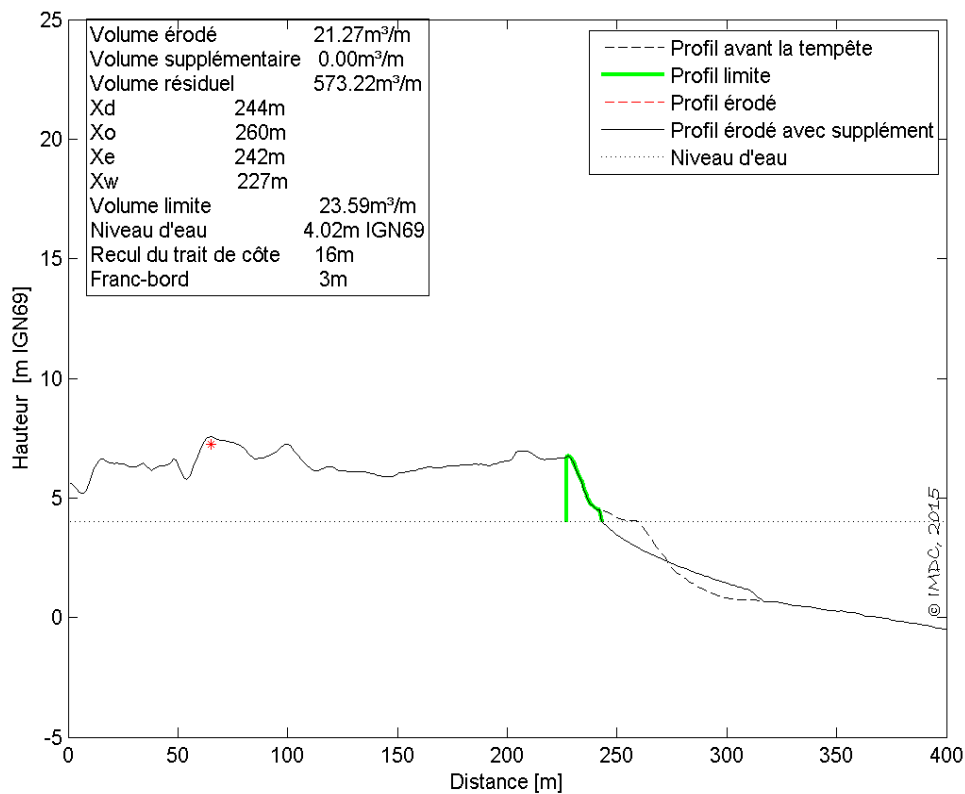


Figure III.32: Résultat du test de dune, condition k4W, profil 11-6, Colleville-Montgomery.

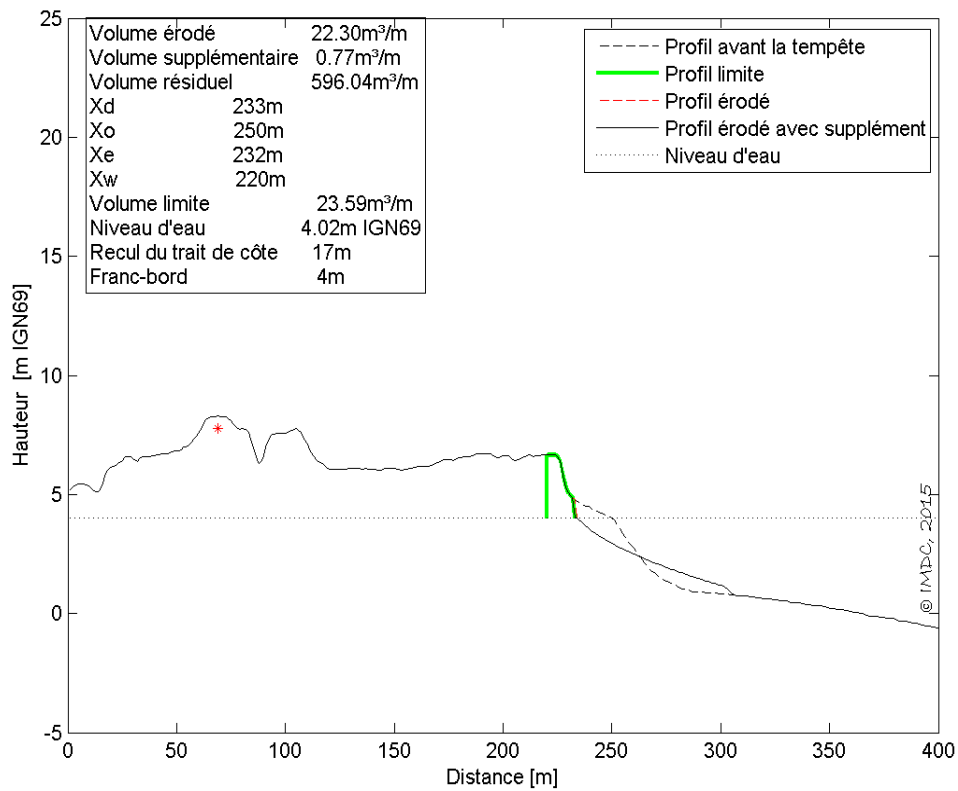


Figure III.33: Résultat du test de dune, condition k4W, profil 11-8, Colleville-Montgomery.

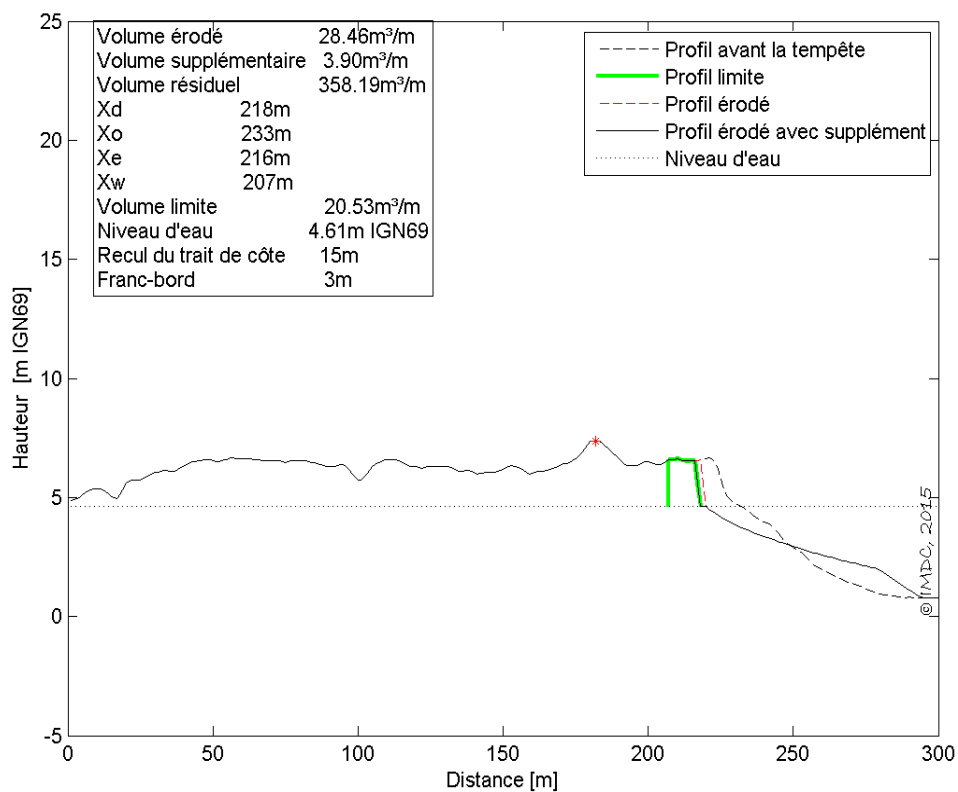


Figure III.34: Résultat du test de dune, condition k6W, profil 11-9, Colleville-Montgomery

III.3. Le test des digues

La méthode du test de digue est décrite au paragraphe III.3.1.. Les résultats du test de digue sont discutés au paragraphe III.3.2. pour le secteur Bessin et au paragraphe III.3.3. pour le secteur Dives – Orne.

III.3.1. Méthode

Le test de dunes ne prend pas en compte les ouvrages de protection, tels que les digues et les perrés. Si l'effet de ces ouvrages doit être étudié, le test de digue est employé.

Le test de digue comprend le calcul d'érosion de plage devant une digue rigide (avec Durosta), la modélisation unidimensionnelle de houle sur le profil érodé (avec le modèle Swan) et le calcul des débits de franchissement selon le guide Eurotop (2007).

III.3.1.1. Calcul d'érosion avec Durosta

Au cours d'une tempête, l'estran ou les marais situés devant la digue peuvent s'éroder. Du fait de l'approfondissement du fond, les vagues se déplacent plus aisément vers le pied de la digue. Il importe donc de calculer l'érosion pour connaître la hauteur de vague au pied de la digue. Le logiciel le plus adapté pour le calcul de l'érosion des plages devant les digues, les perrés ou autres ouvrages « rigides » est Durosta (Steetzel, 1993).

Durosta est un modèle unidimensionnel, qui détermine en fonction du temps la transformation de la hauteur de vague pour une bathymétrie donnée en utilisant un modèle interne de vague. Les paramètres principaux du modèle sont les paramètres hydrodynamiques et le diamètre des sédiments. Le modèle tient compte de l'effet de structures solides, comme les digues de mer. Les vagues transformées provoquent un transport de sable transversal par rapport à la côte et une possible perte de sable vers la mer. Après la tempête, un nouveau profil de plage est obtenu. La simulation avec Durosta ne prend pas en compte les dégradations ou transformations des ouvrages rigides. On peut tout de même utiliser Durosta sous l'hypothèse de ruine généralisée ou de dunes naturelles (sans ouvrages rigides) : dans ce cas, la « digue » est réduite soit à une petite construction en crête de dune, soit à une construction fictive souterraine. Le massif de sable peut alors s'éroder comme en absence d'une digue.

III.3.1.2. Conditions hydrodynamiques avec Swan

En principe, la hauteur et la période de vague doivent être déterminées au pied de la digue pour les calculs de franchissement et de formation des brèches. Pour le profil érodé, les paramètres de houle au pied de la digue sont déterminés avec un modèle 1D (Swan) en utilisant les paramètres pendant le pic de la tempête. Cette approche est prudente, car le profil calculé par Durosta continue à évoluer après le pic de tempête en conditions plus clémentes ; au moment du pic de tempête, le profil de plage est en réalité moins érodé qu'à la fin de la tempête.

La validation de Swan sur les plages (donc dans des eaux très peu profondes) est faite sur la base d'études existantes (RIKZ, 2002 ; Zimmerman et al. 1999 ; WL|Delft Hydraulics & Alkyon, 2003) et une analyse faite par IMDC sur des mesures réalisées à Ostende (Belgique) (IMDC, 2007). Il est conclu de ces études que les simulations avec Swan sur les plages peu profondes sont relativement bonnes. Le choix des paramètres est primordial : les spectres de houle, l'activation des interactions « triades » de Swan, le choix de la fréquence de coupure des spectres mesurés, etc.

Pour la transformation des houles au large en bordure littorale, les conditions de houle du modèle de houle Swan sont utilisées (voir chapitre II). Outre les hauteurs significatives H_{m0} , les spectres de houle sont également obtenus du modèle au niveau de chaque profil du test de digue.

Les niveaux extrêmes, issus de l'analyse statistique (AGR et IMDC, 2014) sont introduits dans le modèle, sous forme de trois cycles de marée (plus haute mer astronomique, voir figure III.35). La surcote atmosphérique est ajoutée à ces pics de marée, afin d'obtenir le niveau de référence (y compris les 20 cm ou 60cm d'élévation du niveau d'eau pour prise en compte du réchauffement climatique). Après addition de l'élévation du niveau marin de 20 cm, le pic du milieu correspond donc au niveau marin de référence PPRL.

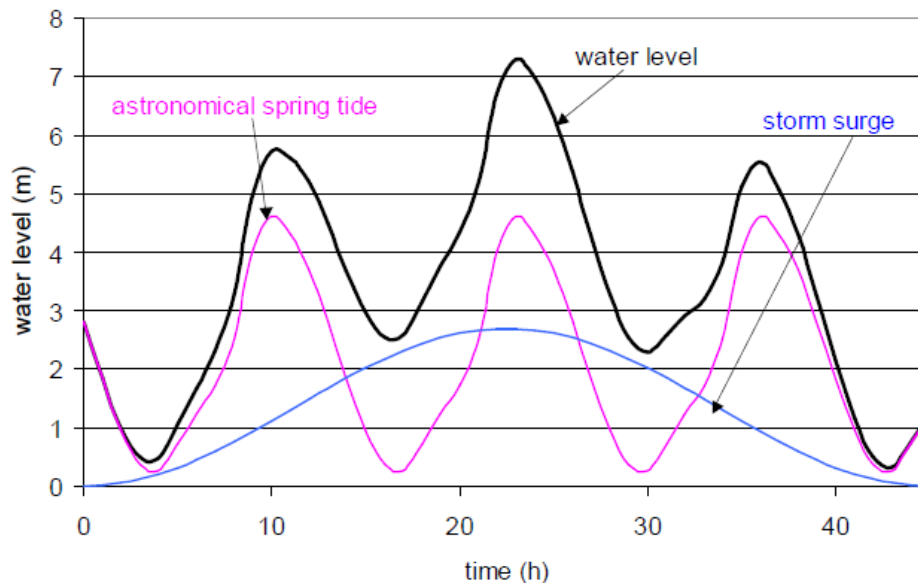


Figure III.35: Superposition de marée astronomique (astronomical spring tide) et surcote atmosphérique (storm surge)

III.3.1.3. Débits de franchissement (guide Eurotop, 2007)

Tous les calculs de franchissement par paquets de mer seront faits selon le guide « Eurotop » (2007). Ce guide est proposé dans la *méthodologie PPRL v11 § 4.3.3.b* et nous sommes bien au fait du domaine de validité de ces méthodes, que nous avons déjà mises en œuvre dans le cadre d'autres projets.

III.3.1.4. Résultat

Les résultats sont présentés sous forme de graphes, sur lequel les profils originels et érodés (axe de gauche du graphe) ainsi que les hauteurs de houle (H_{m0} sur l'axe de droite du graphe) sont portés en fonction de la distance horizontale le long du profil. La hauteur et la période de pic de houle en pied d'ouvrage et le débit de franchissement sont affichés dans le titre de la figure.

La figure III.36 présente un exemple d'un résultat du test de digue pendant une tempête. Sans érosion (ligne brune), les vagues ne sont pas capables d'atteindre la digue mais, après l'érosion causée par la tempête (ligne rouge), la profondeur d'eau au pied de la digue est augmentée et la hauteur de houle significative, estimée à une distance de $5 \times H_{m0}$ de la digue, est alors suffisante pour que la digue soit franchie.

Ce test permet de prendre en compte les débits de franchissement et de faire le choix entre une bonne résistance contre les conditions étudiées, une ruine totale ou une rupture des structures étudiées. La surcote de houle (*wave set-up*) est également compris dans ce calcul (Eurotop, 2007).

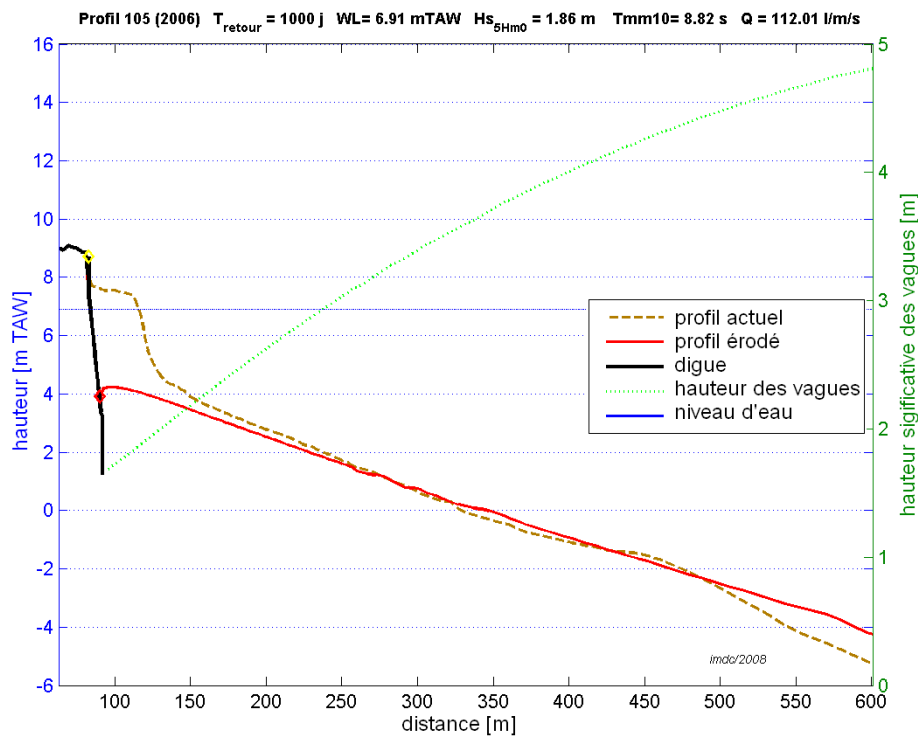


Figure III.36: Exemple d'un test de digue.

III.3.2. Secteur Bessin

Les résultats sur l'ensemble du secteur Bessin sont résumés dans ce chapitre. Les planches des résultats sont montrées en plus de détail et avec des cartes indiquant les endroits des profils analysés aux paragraphes suivants.

Le test de digue est effectué sur 17 profils sur le secteur Bessin, listés dans le tableau III.4, et montrés dans la figure en annexe B.

Tableau III.4: Profils étudiés avec le test de digue, secteur Bessin.

Profil	Section Homogène	Description	Crête (m IGN69)
1-5	BSH1	Falaise du Cap Romain	5,5
1-10	BSH2	Digue de La Rive Plage (Est)	5,4
2-2		Digue de La Rive Plage (centre)	5,4
2-5		Digue de La Rive Plage (Ouest)	5,4
3-36	BSH3	Digue de Courseulles, secteur étroit près de la piscine	5,9
6-1	BSH6	Digue de la Plage (Est)	5,5
6-14		Digue de la Plage (Ouest)	5,2
6-26		Le Paisty Vert (Est)	5,5
6-32		Le Paisty Vert Ouest	4,8
7-24	BSH7	Le Pont Chaussée (marais de Ver-sur-Mer) : enrochement	5,0
9-7	BSH9	Roseau Plage, enrochement	5,5

Profil	Section Homogène	Description	Crête (m IGN69)
10-1	BSH10	Digue d'Asnelles : Ouest	4,2
10-6		Digue d'Asnelles : centre	4,8
11-3	BSH11	La Guerre : enrochement	4,2
11-6		La Guerre : cordon naturel	6,3
13-9	BSH13	Digue d'Arromanches	6,9

Le test de digue est effectué sur chaque profil, pour les conditions suivantes :

- Ouest : couples T100 k1, k5 et k10 ;
- Nord – Nord-Est : couples T100 k1, k5 et k10 ;
- Tempêtes historiques du Nord – Nord-Est : 1996, 1998 et 2001 ;
- Tempête historique d'Ouest : 2010 (Xynthia).

Les conditions de houle sont issues du modèle de houle 2D pour des conditions au large (couples T100 ou conditions historiques à partir des suites temporelles). Les débits de franchissements par paquets de mer sont calculés selon la méthode du guide Eurotop (2007) et exprimés en litres par mètre linéaire de digue et par seconde (l/m/s).

Les résultats sont résumés dans les tableaux suivants. Pour chaque profil, la condition la plus critique est indiquée en rouge.

Tableau III.5: Débits de franchissement par paquets de mer : conditions de référence NNE (T100N+20cm)

Profil	Débits de franchissement par paquets de mer (l/m/s)					
	1996	1998	2001	k1	k5	k10
1-5	10	0	0	0	0	0
1-10	112	45	54	0	0	35
2-2	142	51	60	0	1	25
2-5	5	0	0	0	0	0
3-36	0,4	0	0	0	0	0
6-1	115	50	58	0	0	42
6-14	14	1	1	0	0	0
6-26	23	5	6	0	0	1
6-32	163	42	60	0	1	12
7-24	18	1	1	0	0	0
9-7	18	4	5	0	0	4
10-1	696	181	317	0	4	307
10-6	251	122	139	0	2	88
11-3	421	154	191	0	0	168
11-6	0	0	0	0	0	0
11-14	0	0	0	0	0	0
13-9	7	1	1	0	0	1

Tableau III.6: Débits de franchissement par paquets de mer : conditions de référence Ouest (T100W+20cm)

Profil	Débits de franchissement par paquets de mer (l/m/s)			
	Xynthia	k1	k5	k10
1-5	0	0	0	1
1-10	4	0	29	105
2-2	2	0	32	86
2-5	0	10	0	11
3-36	0	0	0	0,1
6-1	22	0	36	166
6-14	0	0	0	4
6-26	0	0	3	7
6-32	1	0	36	165
7-24	0	0	0	6
9-7	1	0	2	49
10-1	175	0	188	surverse
10-6	18	0	78	379
11-3	110	0	153	surverse
11-6	0	0	0	0
11-14	0	0	0	0
13-9	0	0	1	6

Il ressort du test de digue que deux conditions sont critiques :

- la tempête de février 1996, qui dépasse les conditions centennales (T100) du Nord – Nord-Est, en raison de la pénétration des houles à la côte, engendrant des franchissements importants ;
- le couple k10 des conditions d'Ouest, avec le niveau maximal étudié en conditions de référence.

Pour chaque profil, le débit critique sera retenu pour le scénario de référence PPRL (T100 + 20 cm). Les résultats sont brièvement discutés par secteur aux paragraphes suivants.

III.3.2.1. Falaise du Cap Romain et la Rive plage

L'emplacement des profils est présenté sur la figure III.37. Le profil 1-5 est extrait au niveau de la falaise naturelle de Cap Romain. Les trois autres profils (1-10, 2-2 et 2-5) sont des coupes de la digue de la Rive Plage.

Pour les profils 1-5, 1-10 et 2-2, la tempête historique de 1996 est critique. Les profils 1-10 (Av. Georges Pierre) et 2-2 (rue Des Hironnelles) ont des débits importants (112 et 142 l/m/s au moment du pic de tempête, voir figures III.38 et III.39).

Le débit au niveau du profil 2-5 (Avenue de la Manche, la Rive plage), est beaucoup plus faible (11 l/m/s). Ce débit est trouvé en conditions k10W (c'est-à-dire le couple avec le niveau d'eau maximal de toutes les conditions analysées).

En conditions « Xynthia » de très faibles débits de franchissements sont trouvés pour les profils 1-10 et 2-2 (4 et 2 l/m/s). Ces débits sont trop faibles pour avoir une forte conséquence sur la submersion marine. Aucune information sur la submersion marine lors de la tempête Xynthia n'a été retrouvée sur le secteur.

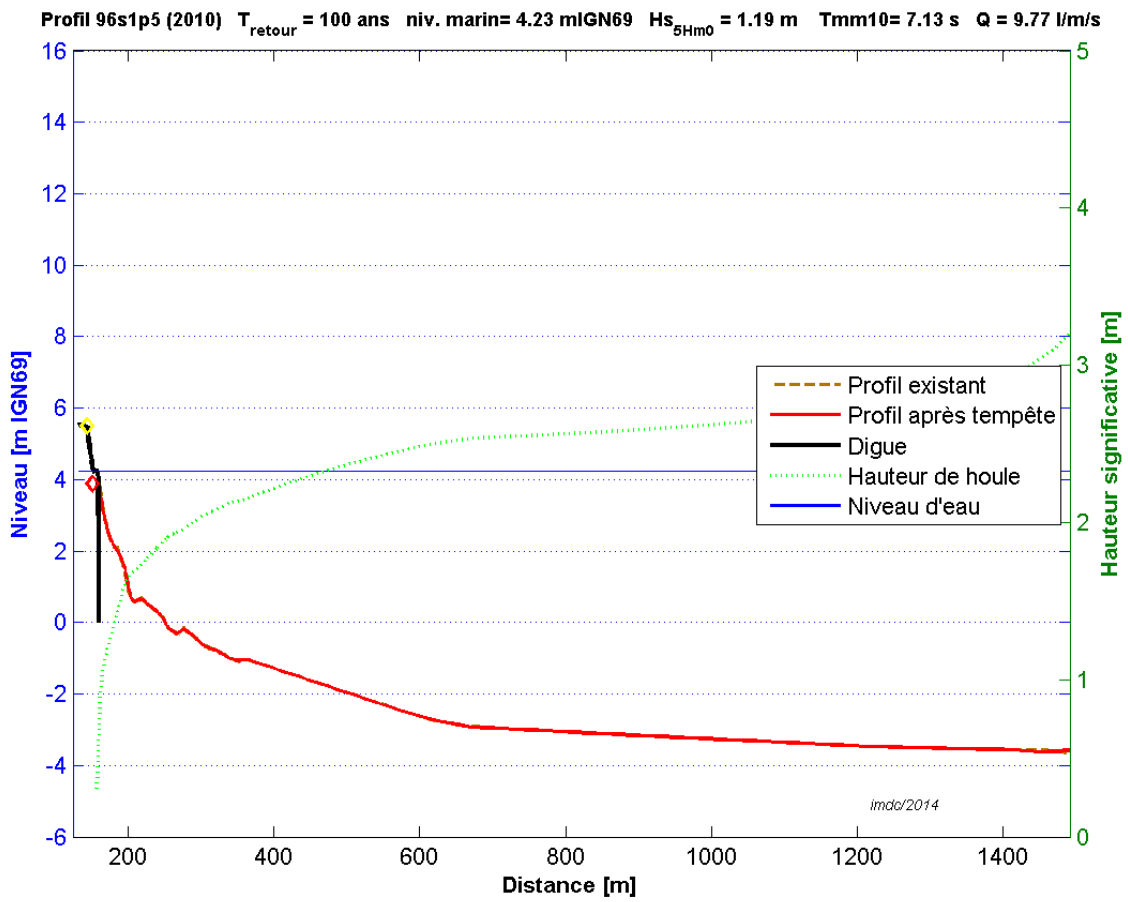


Figure III.37: Profil 1-5, le Cap Romain, conditions historiques (tempête de 1996)

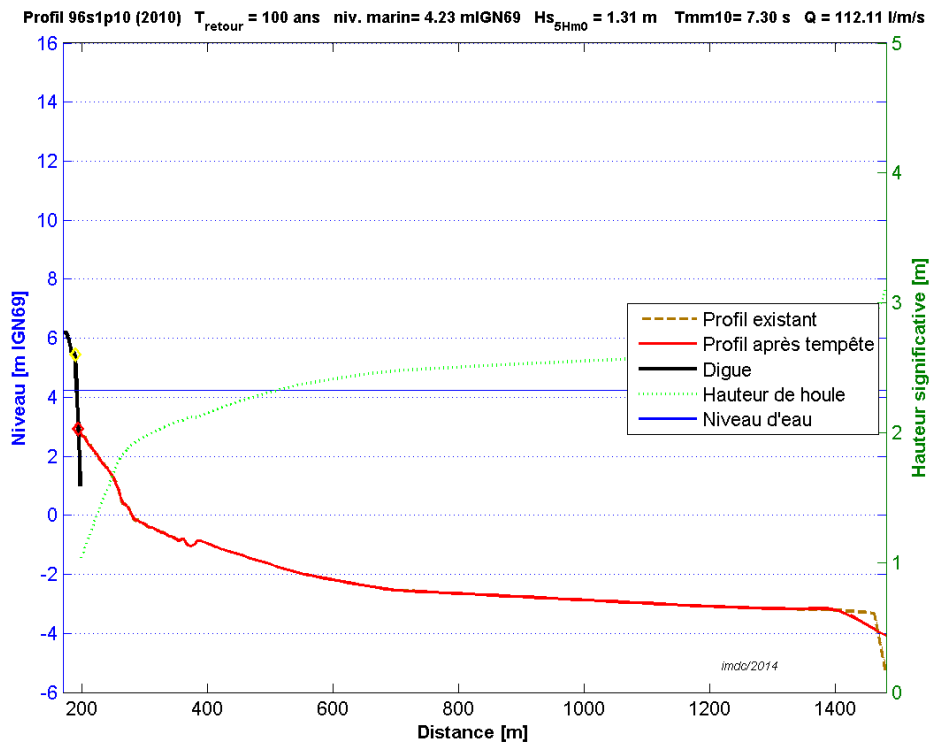


Figure III.38: Résultat du test de digue, profil 1-10 (Avenue Georges Pierre, La Rive Plage), conditions de la tempête de 1996.

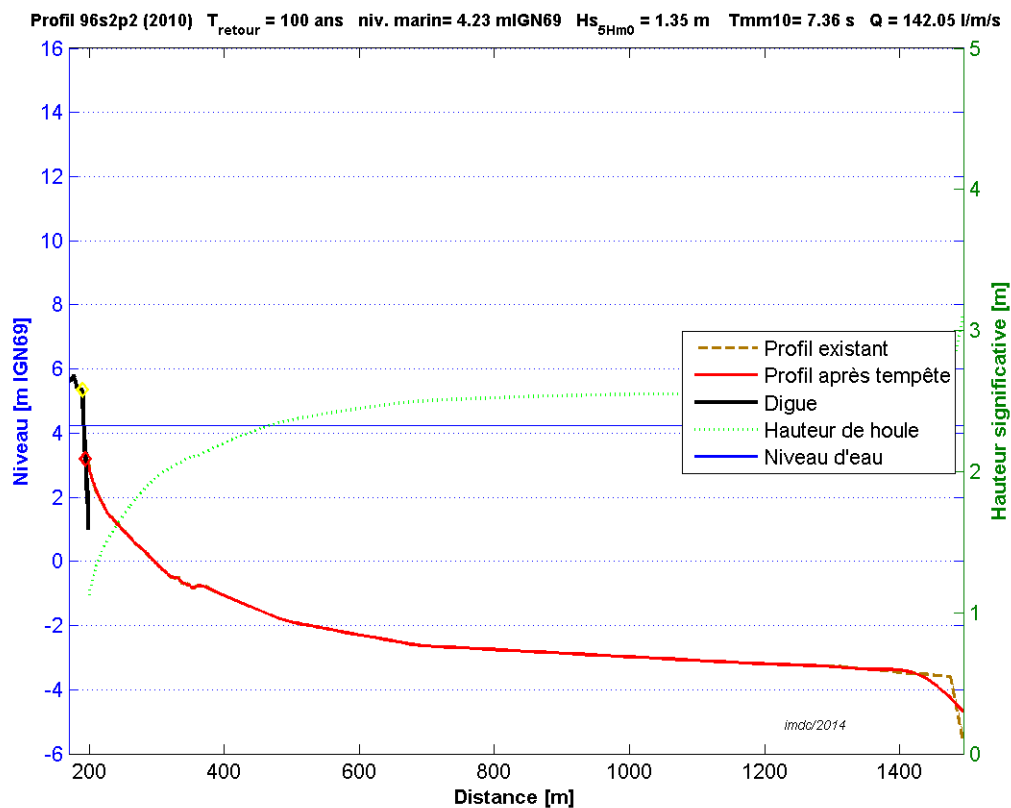


Figure III.39: Résultat du test de digue, profil 2-2 (rue des Hirondelles, La Rive Plage), conditions de la tempête de 1996

III.3.2.2. Digue de Courseulles

Le profil 3-36 au niveau de la piscine de Courseulles-sur-Mer est analysé avec le test de digue. Ce profil est considéré comme un point critique, en raison de la faible largeur de la digue et la faible largeur de la plage devant la digue (voir figure III.40).

De faibles débits de franchissements sont trouvés aux scénarios historique de 1996 (0,4l/m/s) et k10W (0,1l/m/s). Ces débits sont trop faibles pour causer des submersions marines importantes, mais indiquent qu'il y a un risque d'instabilité due à l'action des houles sur la digue (voir chocs mécaniques). En effet, le rapport du BRL de diagnostic de la digue fait mention de chocs mécaniques liés à l'action des vagues, lors de la tempête du 26 février 1990.



Figure III.40: Profil 3-36 de la digue de Courseulles-sur-Mer.

III.3.2.3. Digue de La Plage

Deux profils sont extraits sur la digue de La Plage à Ver-sur-Mer : profil 6-1 à l'extrémité est de la digue et profil 6-14 au niveau de la cale de mise à l'eau (voir figure III.45).

De forts franchissements par paquets de mer sur la partie est de la digue sont trouvés avec les conditions de la tempête 1996 et le couple k10W : les débits de franchissement sont de l'ordre de 160 l/m/s. Le résultat du couple critique est montré dans la figure III.41.

Un débit de franchissement non négligeable de 22 l/m/s est trouvé sur la digue de Ver-sur-Mer en conditions « Xynthia » (voir figure III.42). Ce résultat est confirmé par les observations effectuées lors de cette tempête :

- submersions marines par les paquets de mer franchissant la digue de Ver-sur-Mer (voir figure III.62) ;
- dégâts au revêtement de la digue (voir figure III.43).

Une autre photo (figure III.44), prise en mars 2013, montre la digue franchie par les vagues par un vent du Nord.

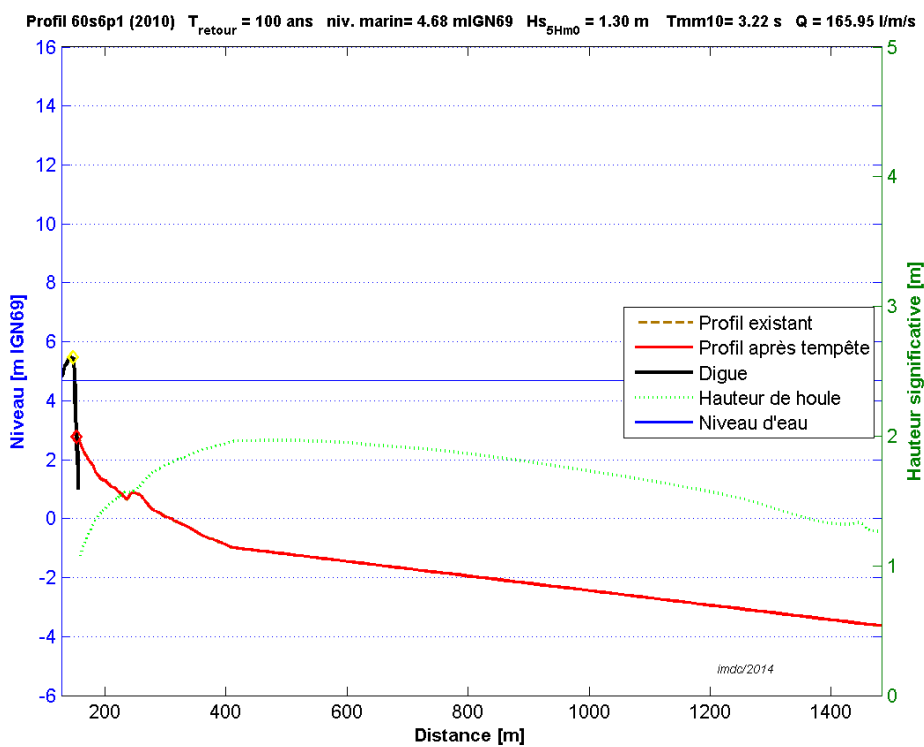


Figure III.41: Résultat du test de digue sur la digue de la Plage (Ver-sur-Mer), Est, condition k10W.

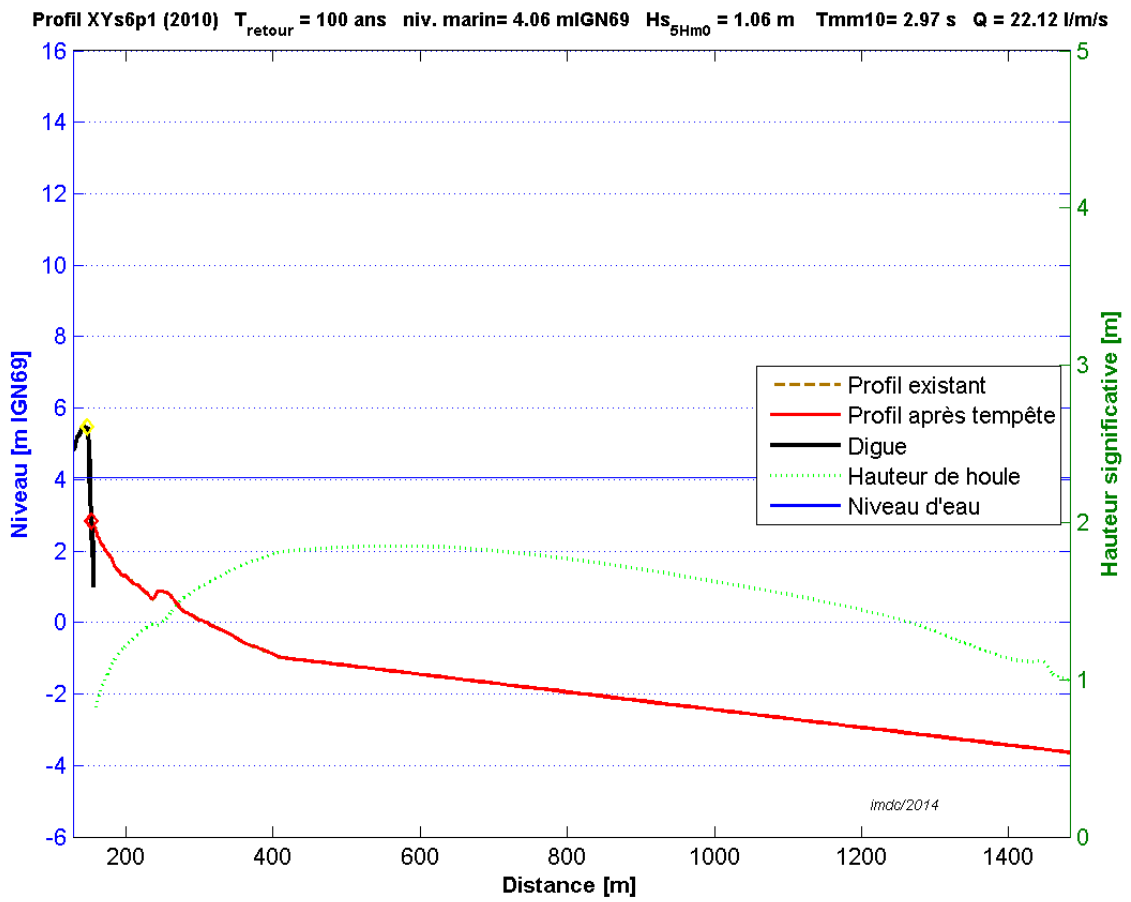


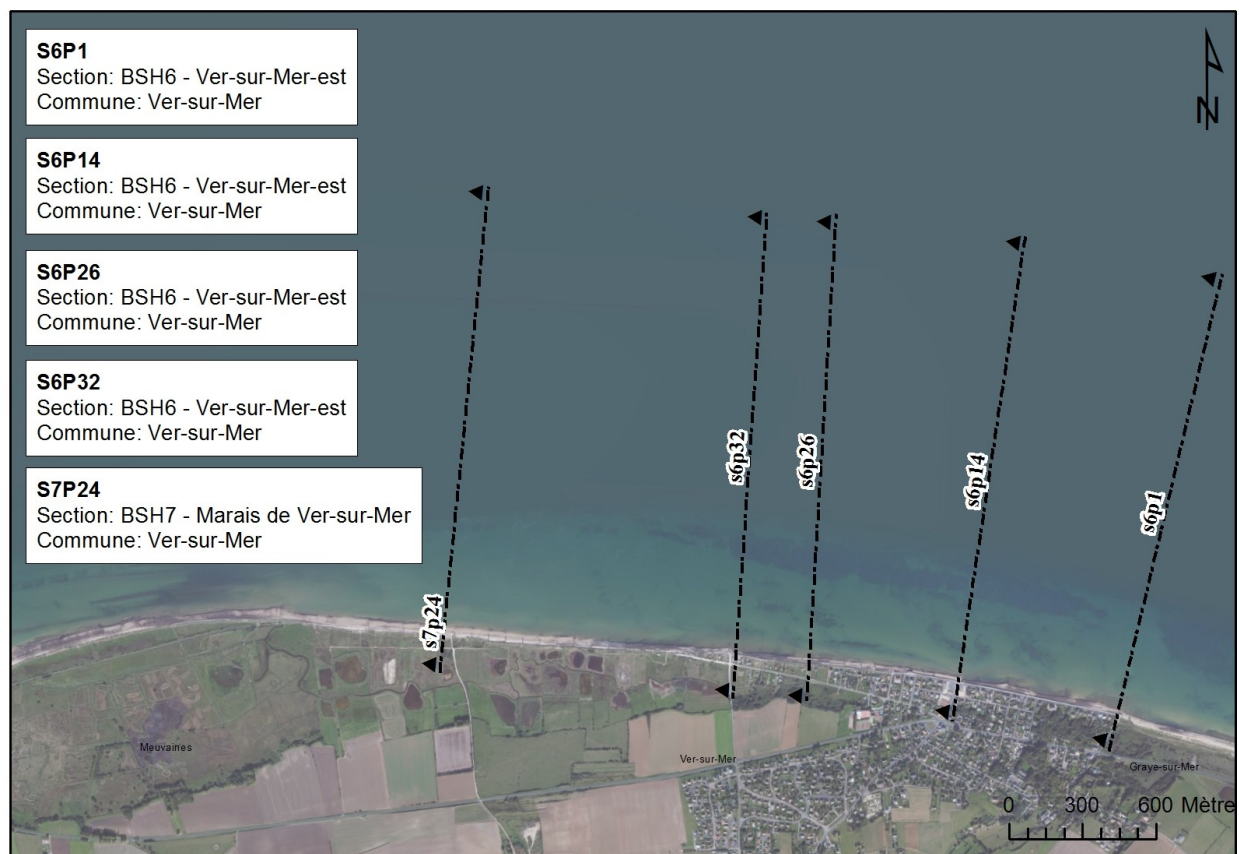
Figure III.42: Test de digue et débit de franchissement par paquets de mer calculées en conditions Xynthia (février 2010) au niveau de la digue de Ver-sur-Mer (profil s6p1)



Figure III.43: Endommagement du revêtements de la digue par les paquets de mer, lors de la tempête Xynthia, février 2010 (source : DDTM Bayeux).



Figure III.44: Franchissement de la digue de Ver-sur-Mer, tempête de mars 2013 (photo : S. Boulay).



III.3.2.4. Le Paisty Vert

Deux profils sont extraits (profils 6-26 et 6-32) au niveau du Paisty Vert. Les débits d'eau franchissant l'enrochement du Paisty Vert sont de 23 l/m/s et de 165 l/m/s en conditions de 1996 et k10W respectivement. Le résultat du calcul de test de digue pour le profil 6-32 est présenté sur la figure III.46.

Pour les conditions de la tempête Xynthia, un débit de franchissement de 36 l/m/s est trouvé. Lors de cette tempête une submersion marine a été relevée en quelques points (voir figure III.62).

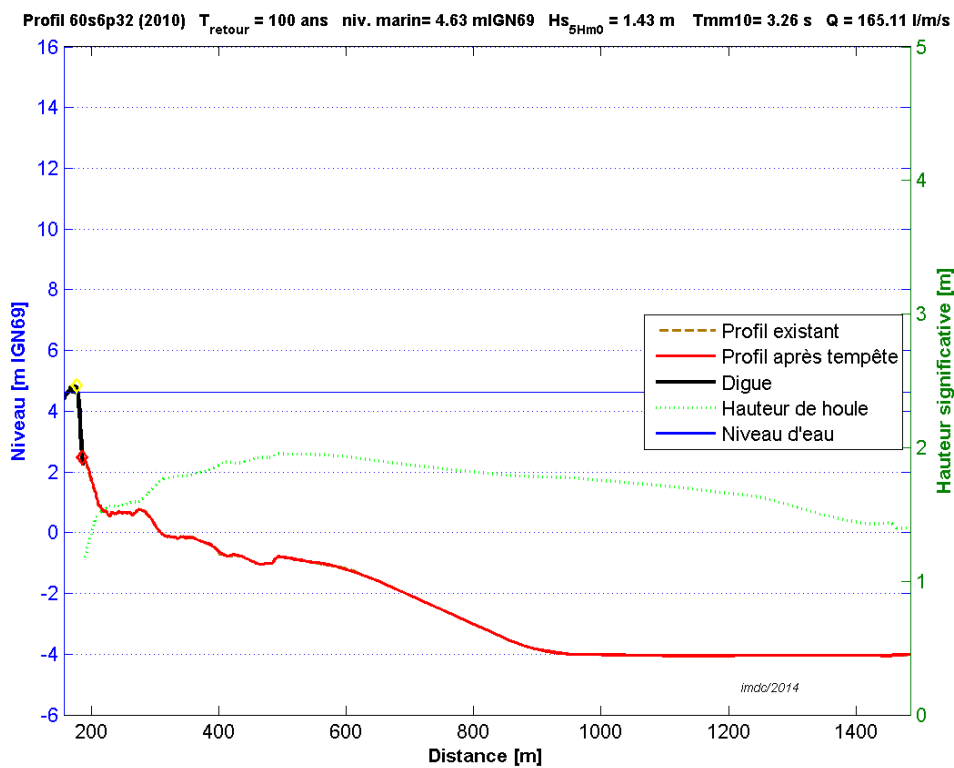


Figure III.46: Résultat du test de digue au Paisty Vert, profil 6-32, condition k10W.



Figure III.47: Relevés des profondeurs d'eau par la submersion marine lors de Xynthia (février 2010) à la Plage et au Paisty Vert à Ver-sur-Mer (source : DDTM de Bayeux).

III.3.2.5. Enrochements du marais de Ver-sur-Mer (Le Pont Chaussé)

Un débit de 18 l/m/s est trouvé au niveau de l'enrochement du Pont Chaussé (profil 7-24) à Ver-sur-Mer. Le résultat est montré dans la figure III.48. Ce débit est suffisant pour générer l'érosion en crête d'ouvrage et pour déstabiliser l'enrochement.

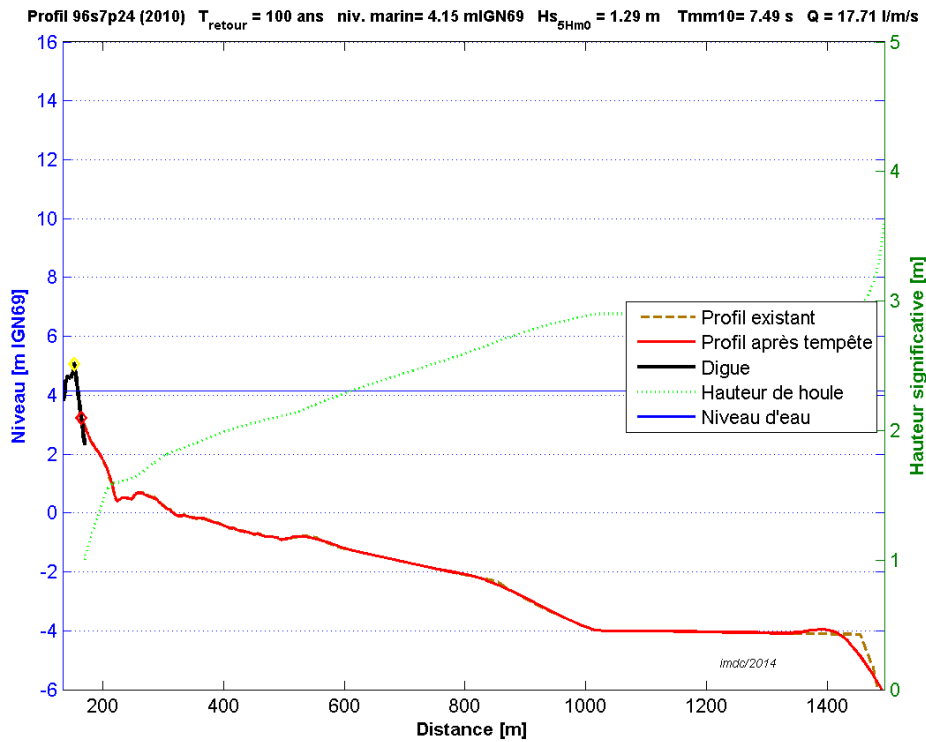


Figure III.48: Résultat du test de digue Le Pont Chaussé à Ver-sur-Mer, conditions de la tempête de 1996.



Figure III.49: Aspect de l'enrochement au Pont Chaussé à Ver-sur-Mer. Faible altimétrie de l'enrochement et signes de franchissement par la mer assez fréquent : plage à galets en crête d'ouvrage et ligne de végétation poussée en arrière (photo AGR & IMDC, 2013).

III.3.2.6. Enrochements Roseau Plage et digue d'Asnelles

Le test de digue est effectué :

- au niveau l'enrochement de Roseau Plage à Asnelles, entre les deux cales de mise à l'eau, à ouest de la commune (profil 9-7).
- sur la digue d'Asnelles, au niveau de la rue du Débarquement (profil 10-1) et de la rue de Southampton (profil 10-6).

Le débit de franchissement calculé sur le profil 9-7 (enrochement de Roseau Plage) est de 49 l/m/s en conditions k10W (niveau d'eau maximal).

Les débits de franchissement sont plus importants au niveau de la digue d'Asnelles (profils 10-1 et 10-6) du fait de la faible altimétrie de la digue et de la plage au pied de la digue.

Pour le phénomène de Xynthia, la même constatation est faite : le débit est quasiment nul au niveau de l'enrochement de Roseau Plage. L'entrée d'eau principale se produit localement au niveau du parking du Boulevard de la Mer à Asnelles (175 l/m/s). Sur le reste de la digue un débit plus faible est trouvé (18 l/m/s).

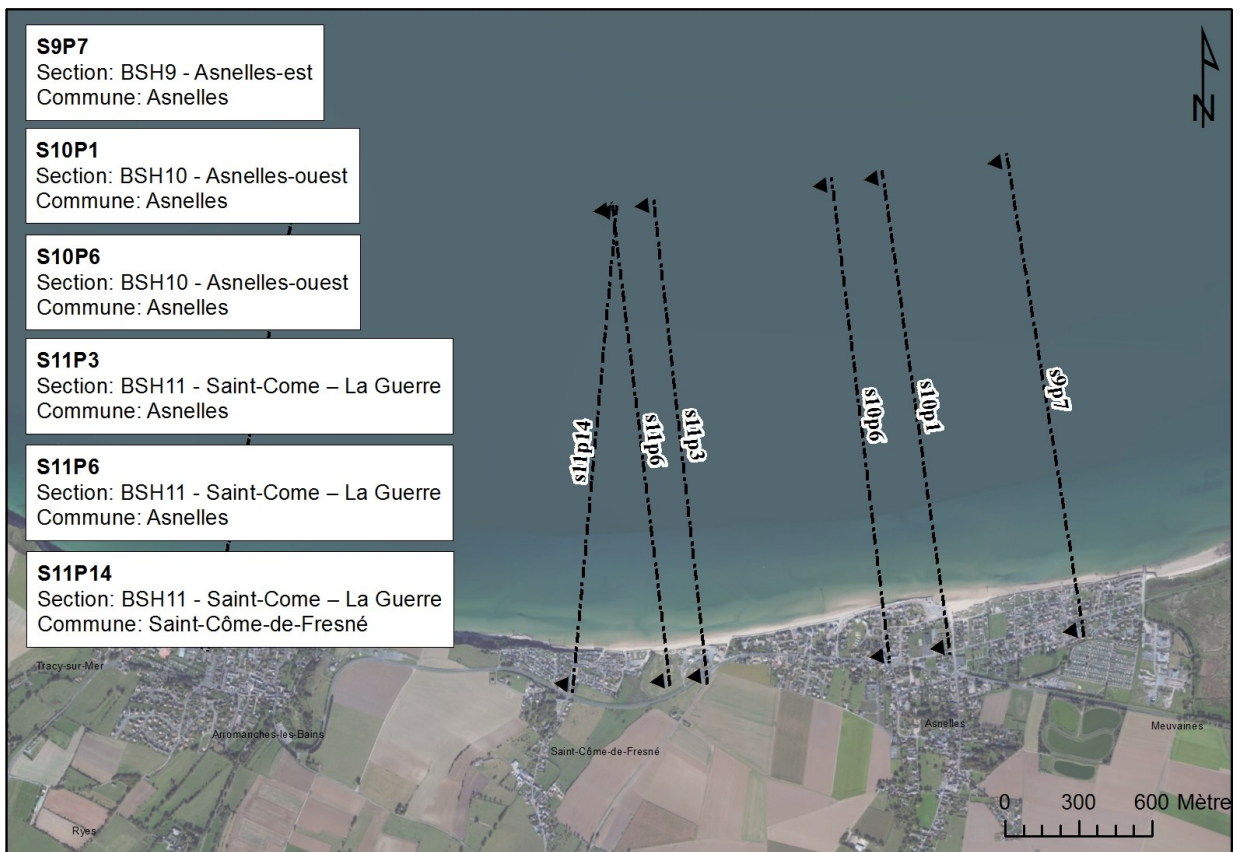


Figure III.50: Profils à Asnelles, Roseau plage et digue d'Asnelles.



Figure III.51: Franchissements par paquets de mer et submersion marine sur la digue d'Asnelles (photo prise en novembre 2013 au niveau de la rue du Débarquement, transmise par la DDTM Bayeux).

III.3.2.7. La Guerre

Les deux profils (11-3 et 11-6) se situent au niveau du centre ostréicole de La Guerre, entre le Hamel et la Fontaine Saint-Côme, où le front littoral est protégé par un enrochement (voir figure III.52).

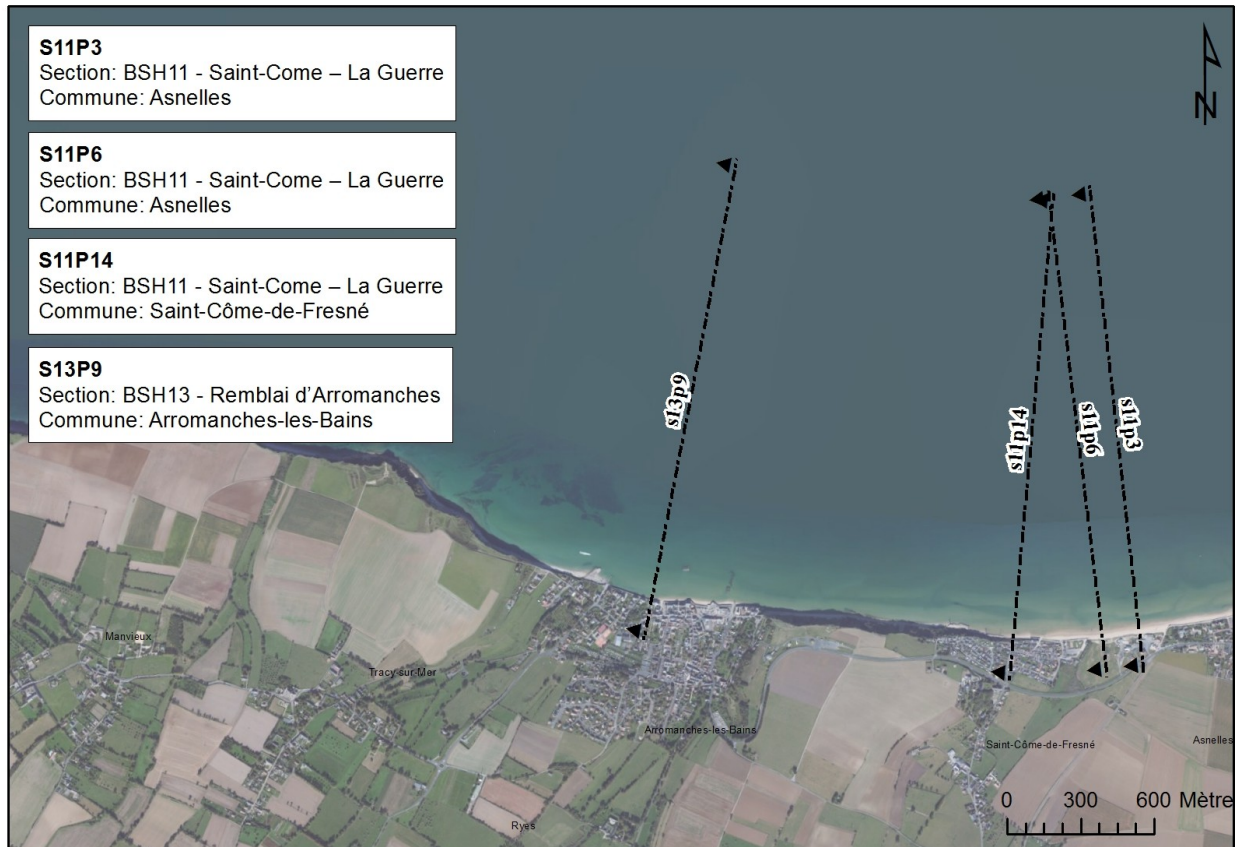
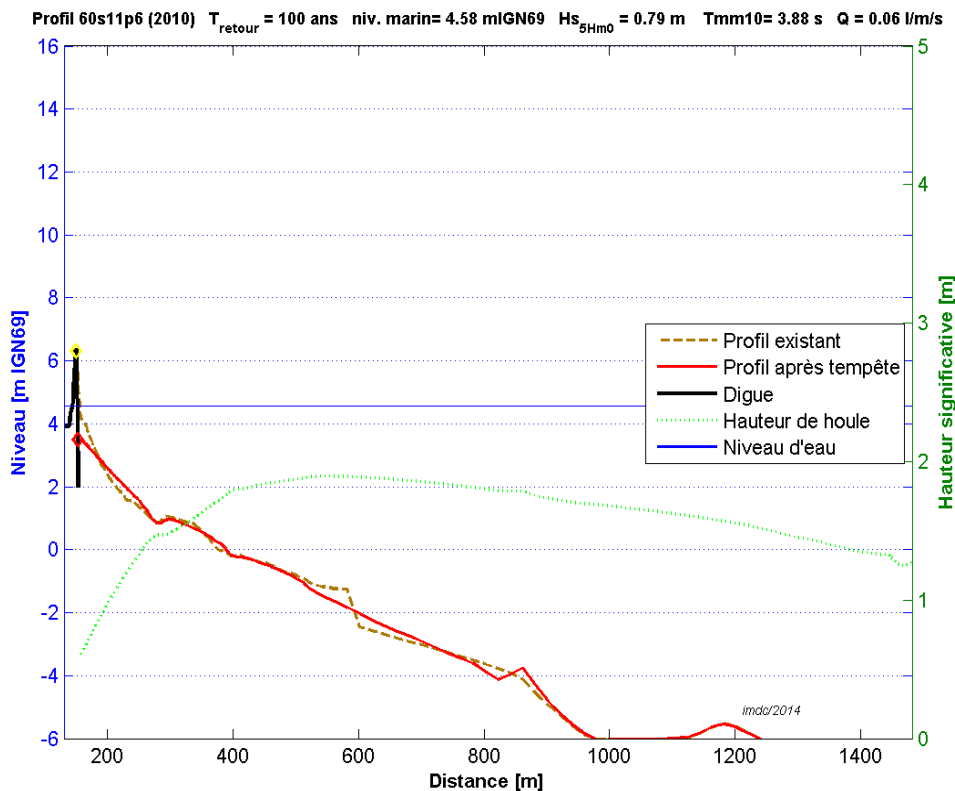


Figure III.52: Profils de la Guerre, la Fontaine Saint-Côme et Arromanches.

L'enrochement est submergé (surverse) pour le niveau marin maximal (k10W) au niveau du profil 11-3. Au niveau du profil 11-6, le débit de franchissement est nul si la digue est considérée comme non érodable (voir figure III.53). Il est toutefois constaté que l'érosion de la plage devant la digue est assez forte, et que le risque d'une rupture de la digue est réelle aux conditions analysées.



. Figure III.53: Résultat du test de digue, digue/enrochement de La Guerre (profil 11-6), condition k10W.

III.3.2.8. Digue d'Arromanches-les-Bains

Le profil 13-9, caractéristique du perré d'Arromanches, est extrait au niveau du Quai Général Leclerc, entre la Cale Neptune et la rue Ltdv J. Carpentier.

Le débit de franchissement est relativement faible, grâce à l'enrochement placé en pied d'ouvrage et à la cote élevée de la digue (6,9 m IGN69). Des débits maximaux de 7 l/m/s et 6 l/m/s sont trouvés en conditions de 1996 (résultat montré dans la figure) et k10W.

En conditions « Xynthia » le débit de franchissement est nul. Aucune information relative à des franchissements ou à une submersion marine lors de la tempête Xynthia n'a été trouvée.

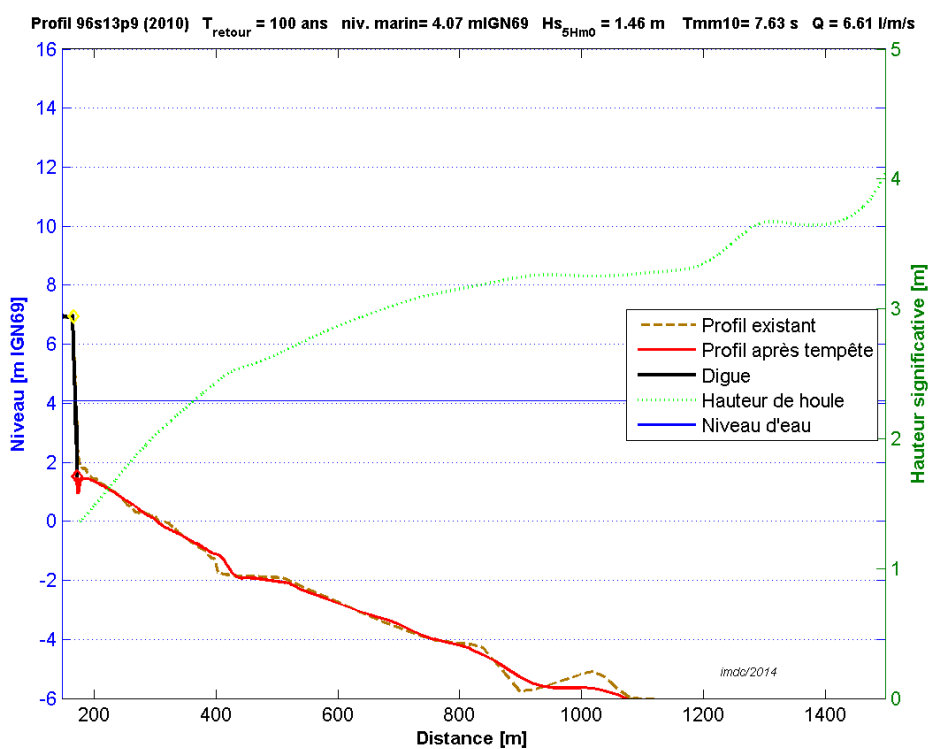


Figure III.54: Résultat du test de digue, Pérré d'Arromanches-les-Bains, condition de la tempête de 1996.

III.3.2.9. Résultats du scénario de référence +60cm

Pour le scénario de référence +60cm d'élévation du niveau marin, les débits issus du test de digue les plus pénalisant sont repris dans le tableau suivant. Les planches sont reprises en Annexe D.

Tableau III.6: Débits de franchissement par paquets de mer : conditions de référence (T100W+60cm)

Profil	Débits de franchissement par paquets de mer (l/m/s)
	k10W
1-5	29
1-10	329
2-2	344
2-5	101
3-36	4,3
6-1	305
6-14	102,9
6-26	71
6-32	surverse
7-24	431
9-7	191
10-1	surverse
10-6	>>200
11-3	surverse
11-6	1,1
11-14	0
13-9	18

III.3.2.10. Résultats du scénario décennal (T10)

Pour le scénario fréquent (T10), les débits issus du test de digue les plus pénalisant sont repris dans le tableau suivant. Les planches sont reprises en Annexe D.

Tableau III.5: Débits de franchissement critiques, secteur Bessin (T10)

<i>Profil</i>	<i>Débits de franchissement par paquets de mer (l/m/s)</i>
1-5	0,0
1-10	21,2
2-2	15,7
2-5	0,0
3-36	0,0
6-1	55,6
6-14	0,1
6-26	0,4
6-32	11,0
7-24	0,0
9-7	4,15
10-1	554,87
10-6	110,59
11-3	420,87
11-6	0,1
11-14	0,0
13-9	0,77

III.3.2.11. Résultats du scénario extrême (T1000)

Pour le scénario extrême (T1000), les débits issus du test de digue les plus pénalisant sont repris dans le tableau suivant. Les planches sont reprises en Annexe D.

Tableau III.5: Débits de franchissement par paquets de mer critiques : millénaires (T1000)

Profil	Débits de franchissement par paquets de mer (l/m/s)
1-5	23,6
1-10	304,0
2-2	315,0
2-5	87,4
3-36	1,0
6-1	284,3
6-14	72,4
6-26	59,8
6-32	surverse
7-24	308,9
9-7	173,2
10-1	surverse
10-6	>>200,0
11-3	surverse
11-6	0,43
11-14	0,0
13-9	16,6

III.3.3. Secteur Dives-Orne

Les résultats sur l'ensemble du secteur Dives – Orne sont résumés dans ce chapitre. Les planches des résultats sont montrées en plus de détail et avec des cartes indiquant les endroits des profils analysés aux paragraphes suivants.

Le test de digue a été effectué sur 7 profils, listés dans le tableau III.7 et localisés sur les plan présentés en annexe.

Tableau III.7 : Profils du test de digue, secteur Dives – Orne.

Profil	Section Homogène	Description	Crête (m IGN69)
3-6	DOSH3 – Remblai de Cabourg	Avenue Durand Morimbeau	7,0
4-93	DOSH 4 Dune de Varaville et Franceville-Merville	Digue du parking Boulevard Wattier	7,2
10-2	DOSH10 – Remblai de Ouistreham	Avenue Lamartine (poste de secours no. 2)	6,5
10-10		Bvd. A. Briand, entre l'Av. Delavigne et Verdun	6,7
11-32	DOSH11 – Cordon dunaire de Colleville et Remblai de Hermanville	Avenue F. Fauré	6,9
11-37		Pl. Du Cuirassé Courbet	6,6
11-44		Rue A. Fichot	6,1

Le test de digue est effectué sur chaque profil, pour les conditions suivantes :

- Ouest : couples T100 k1, k5 et k10 ;
- NNE : couples T100 k1, k5 et k10 ;
- Tempêtes historiques du Nord – Nord-Est : 1996, 1998 et 2001 ;
- Tempête historique d'Ouest : 2010 (Xynthia).

Les conditions de houle sont issues du modèle de houle 2D pour des conditions au large (couples T100 ou conditions historiques à partir des suites temporelles). Les débits de franchissements par paquets de mer sont calculés selon la méthode du guide Eurotop (2007) et exprimés en litres par mètre linéaire de digue et par seconde (l/m/s).

Les résultats sont résumés dans les tableaux suivants. Pour chaque profil, la condition la plus critique est indiquée en rouge.

Tableau III.8 : Débits de franchissement par paquets de mer : conditions de référence Nord (T100N+20 cm)

Profil	Débits de franchissement par paquets de mer (l/m/s)					
	1996	1998	2001	k1	k5	k10
3-6	0	0	0	0	0	0
4-93	0	0	0	0	0	0
10-2	0	0	0	0	0	0
10-10	1	0	0	0	0	0
11-32	1	0	0	0	0	0
11-37	0	0	0	0	0	0
11-44	10	4	3	0	0	2

Tableau III.9 : Débits de franchissement par paquets de mer : conditions de référence Ouest
(T100W+20 cm)

Profil	Débits de franchissement par paquets de mer (l/m/s)			
	Xynthia	k1	k5	k10
3-6	0	0	0	0
4-93	0	0	0	0
10-2	0	0	0	0
10-10	0	0	0	0
11-32	0	0	0	0
11-37	0	0	0	0
11-44	0	0	1	9

Il ressort du test de digue que les débits de franchissements sont limités. Sur plusieurs secteurs, les débits sont nuls dans toutes les conditions testées :

- Le remblai de Cabourg (profil 3-6) ;
- À Ouistreham, au niveau du poste de secours n°2 (profil 10-2) ;
- La Place du Cuirassé Courbet à Hermanville (profil 11-37).

Sur les autres secteurs, les débits sont relativement faibles. Sur le secteur Dives – Orne, le risque de submersion marine due aux franchissements par paquets de mer est donc limité sur la majeure partie du territoire.

Cette plus faible sensibilité à l'action des houles s'explique d'une part par le climat de houle plus clément comparé au secteur Bessin (surtout en conditions d'Ouest) et, d'autre part, par des plages plus larges et des ouvrages de protection plus élevés. Les vagues déferlent sur les pentes de plage, et l'abaissement des plages pendant les tempêtes est moins critique, ce qui limite le climat de houle en pied d'ouvrage.

III.3.3.1. Remblai de Cabourg

Un profil de plage (profil 3-6) est choisi sur l'extrémité est du remblai de Cabourg (voir figure III.55).

La géométrie de la « nouvelle » coupe caractéristique (voir fiches sections homogènes, AGR & IMDC 2014b) est prise en compte, avec un parapet de 60 cm. La rugosité du revêtement n'est pas pris en compte, ce qui constitue une hypothèse conservative. Le diamètre médian du sable est figé à 1 mm ($D_{50}=1\text{mm}$).



Figure III.55: Profil remblai de Cabourg.

Dans toutes les conditions testées, le débit de franchissement est nul. Un exemple du test de digue est présenté sur la figure III.56. Grâce à la faible érosion de la plage, les houles déferlent en s'approchant de la digue. De plus, la digue est assez haute (cote de crête de l'ordre de 9,8m IGN69) pour éviter les franchissements par paquets de mer.

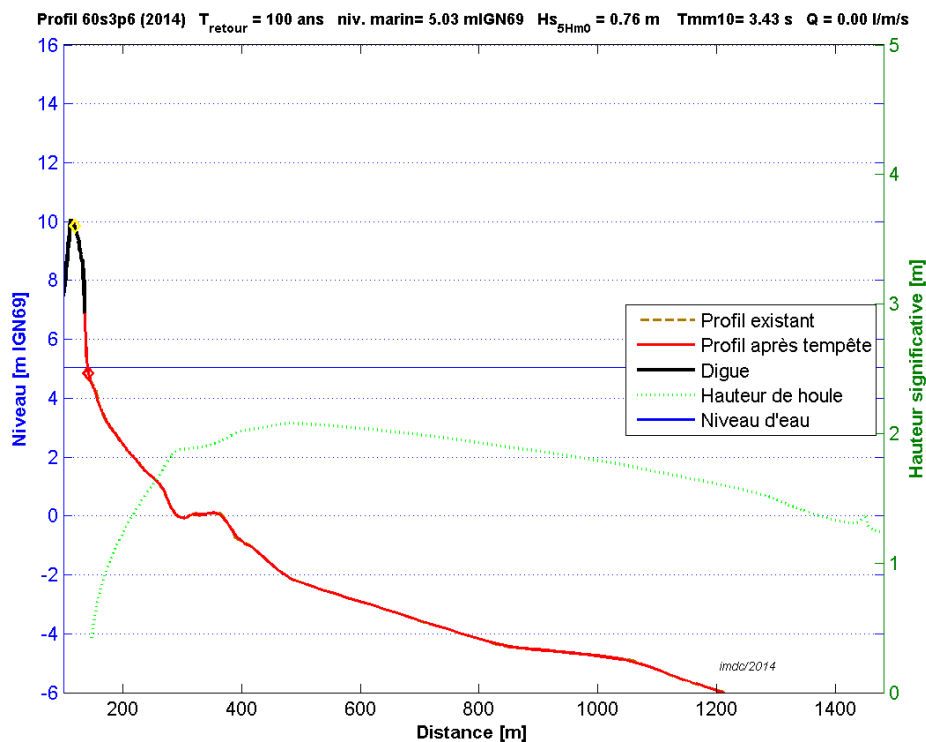


Figure III.56: Résultat du test de digue, remblai de Cabourg, couple k10 conditions d'Ouest (T100W k1).

III.3.3.2. Franceville-Merville : parking Boulevard Wattier

Un banc de sable devant le remblai du parking Bd. Wattier à Franceville-Merville a un effet atténuant sur les houles au droit du remblai.

Dans les résultats du test de digue (exemple couple T100k5W dans la figure III.58), on voit que ce banc de sable ne s'érode pas tout à fait dans les conditions centennales. Les vagues déferlent sur le banc résiduel et la digue n'est jamais franchie par les paquets de mer dans les conditions étudiées (T100 et historiques).



Figure III.57: Profil Parking Franceville-Merville.

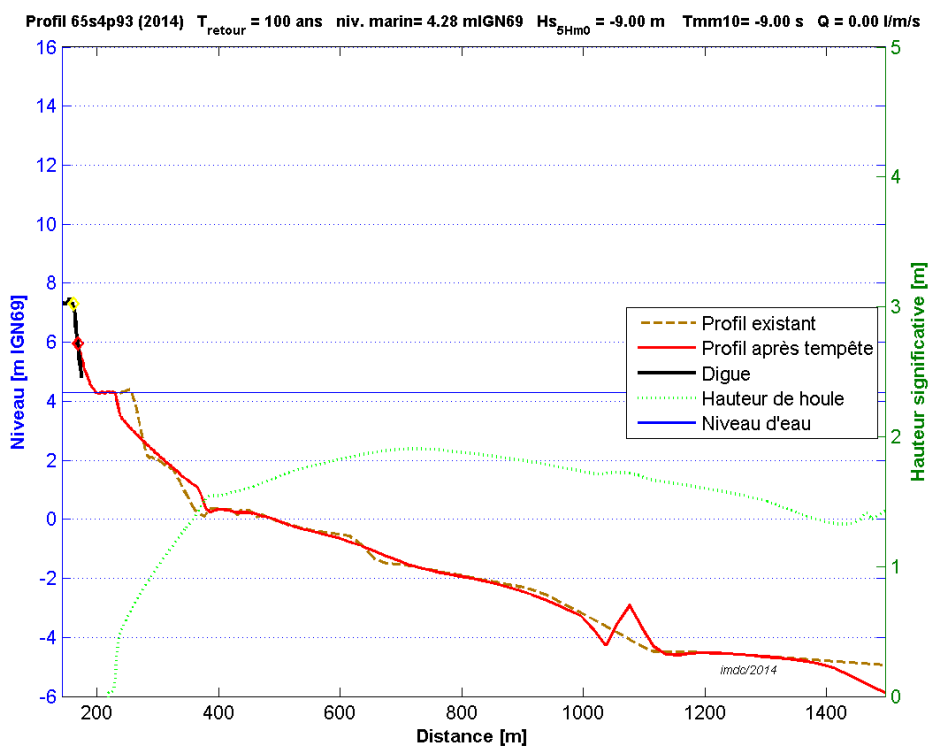


Figure III.58: Profil parking Bd. Wattier à Franceville-Merville-Plage, conditions T100 Ouest, couple 5

III.3.3.3. Riva Bella (Ouistreham)

Deux profils sont extraits au niveau de Riva Bella (profils 10-2 et 10-10). Dans tous les cas étudiés, les débits de franchissements par paquets de mer sont négligeables ou inexistant.



Figure III.59: Profils plage de Riva Bella²

Les conditions de houle sont néanmoins assez violentes près de l'ouvrage de protection. Une hauteur de houle de 1,2 m est trouvée près du perré de Riva Bella (Bd. Aristide Briand, Ouistreham). Il y a donc un risque de chocs mécaniques par l'action des vagues en conditions de tempête du Nord.

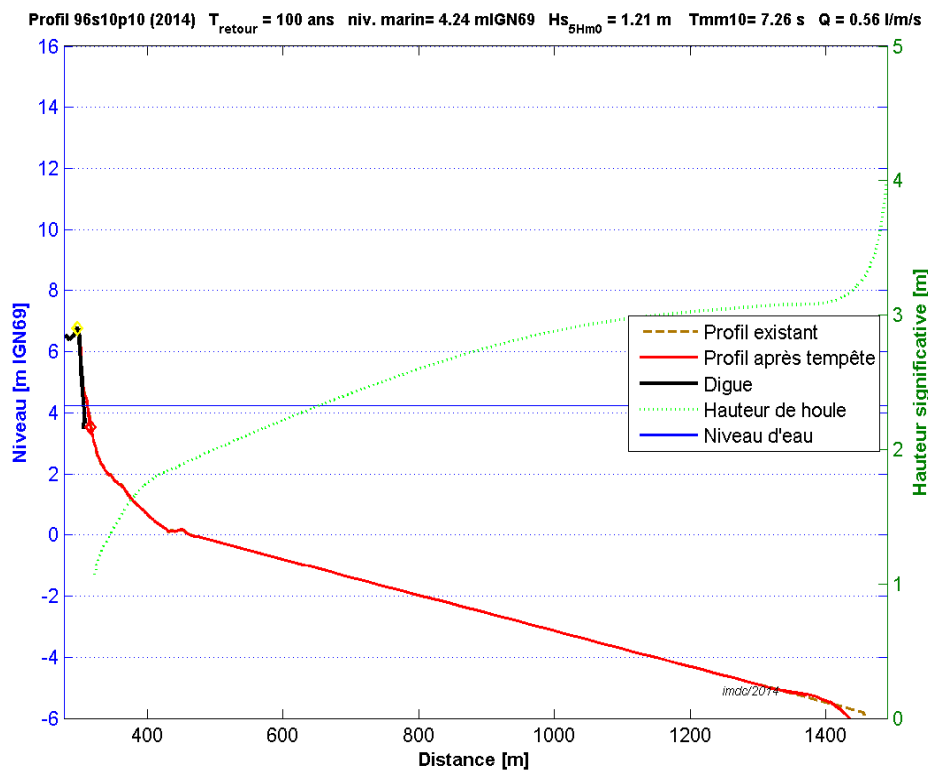


Figure III.60: Résultat du test de digue, sur la plage de Riva Bella (Ouistreham), faible débit de franchissement en conditions historiques de la tempête de février 1996.

III.3.3.4. Remblai de Hermanville-sur-Mer

Trois profils sont retenus au niveau du remblai d'Hermanville (profils 11-32, 37 et 44, voir figure III.61).

Un point sensible aux franchissements par paquets de mer est identifié au niveau du profil 11-44 (avenue Fichot). Un débit de pic de 9 l/m/s à 10 l/m/s est calculé pour les conditions de référence (tempête de 1996 et condition k10W).

Des débits plus faibles sont également trouvés pour les tempêtes historiques de 1998 et 2001. Le résultat de la tempête de 1996 est présenté dans la figure III.62. Sur les 2 autres profils étudiés, le test de digues n'indique pas de débit de franchissement.

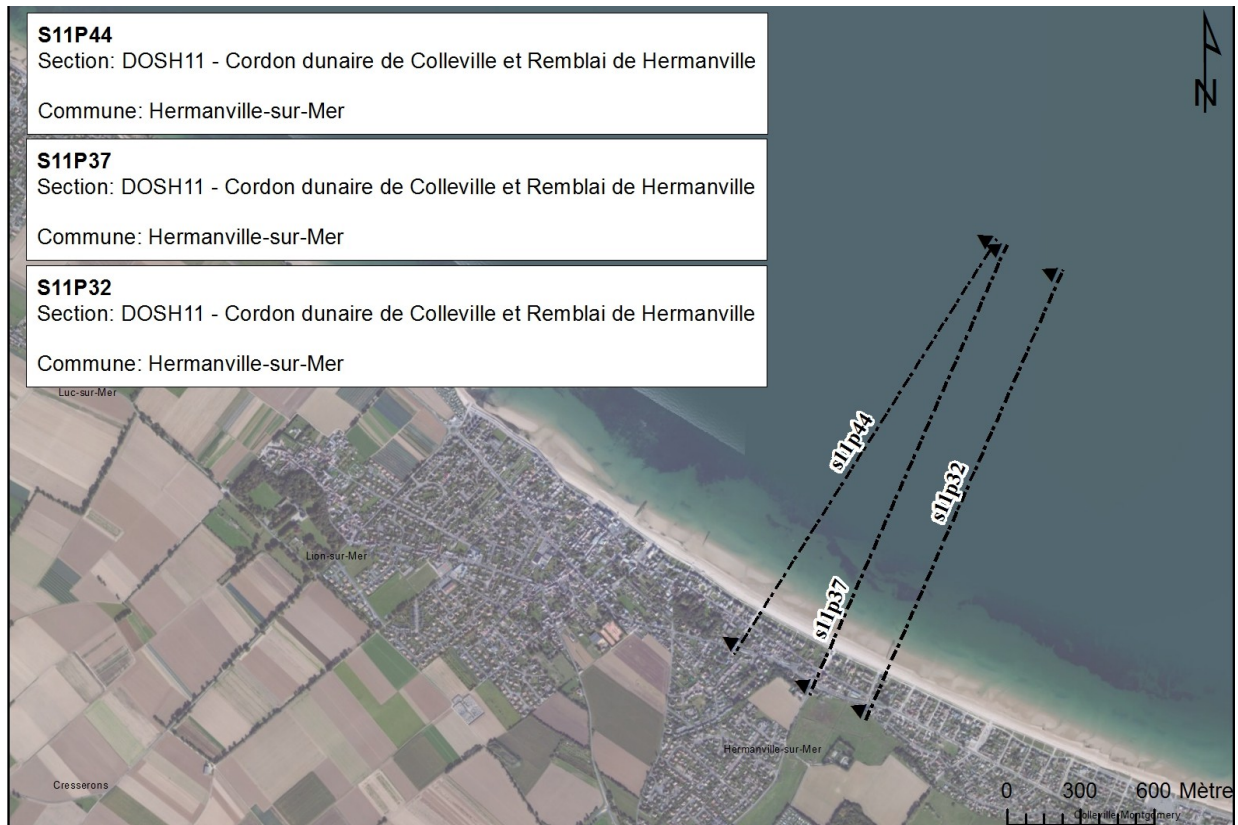


Figure III.61: Profils du remblai de Hermanville.

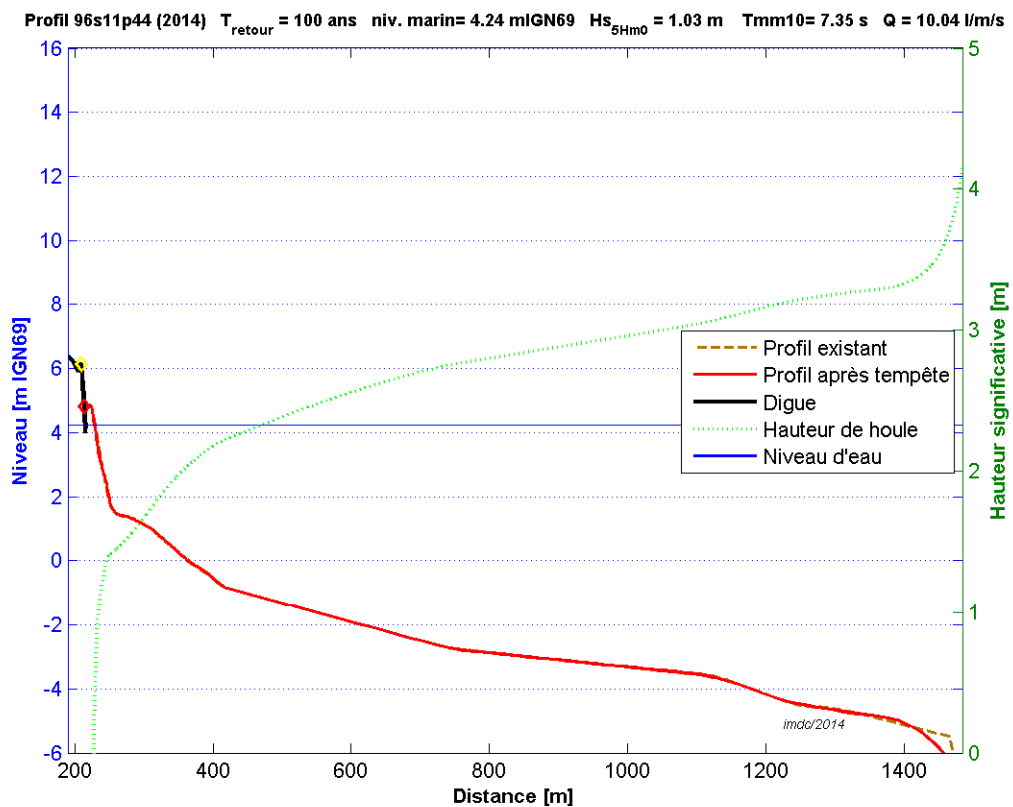


Figure III.62: Résultat du test de digue, avenue Fichot à Hermanville-sur-Mer, conditions historiques de la tempête de 1996.

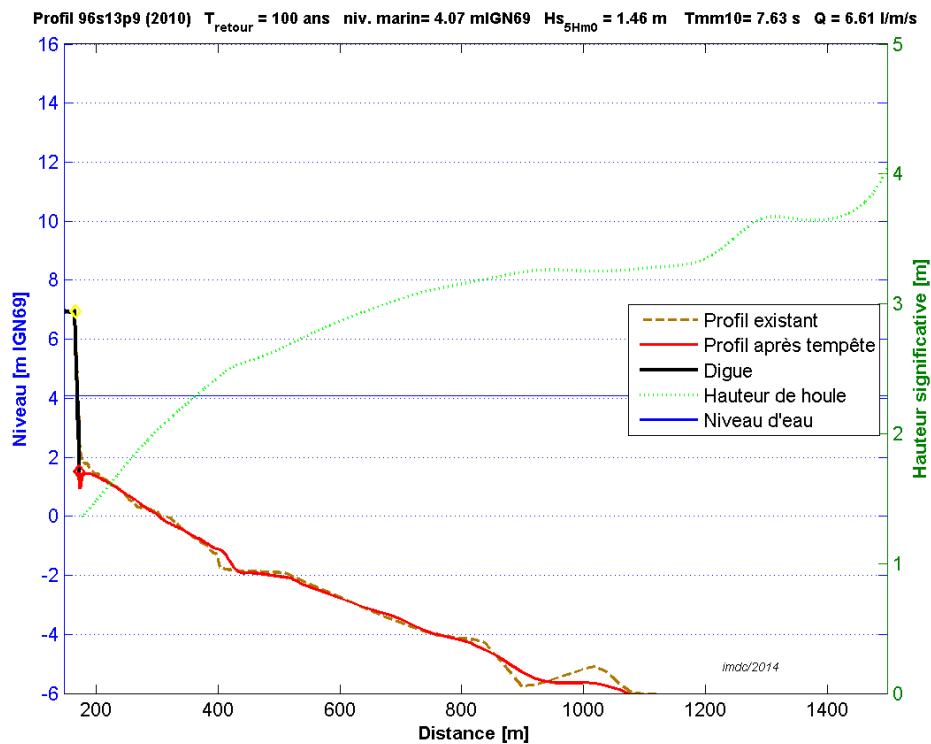


Figure III.63: Résultat du test de digue, Pêré d'Arromanches-les-Bains, condition de la tempête de 1996.

III.3.3.5. Résultats du scénario de référence +60cm

Pour le scénario de référence +60cm d'élévation du niveau marin, le couple le plus pénalisant k10W est retenu (les tempêtes historiques exclues). Les débits résultant du test de digue sont listés dans le tableau suivant. Les planches sont reprises en Annexe D.

Tableau III.9 : Débits de franchissement par paquets de mer : conditions de référence Ouest (T100W+60 cm)

Profil	Débits de franchissement par paquets de mer (l/m/s)
3-6	0
4-93	0
10-2	0
10-10	0
11-32	0,2
11-37	0
11-44	37.47

III.3.3.6. Résultats du scénario décennal (T10)

Pour le scénario fréquent, le couple le plus pénalisant k10W est retenu (les tempêtes historiques exclues). Les débits résultant du test de digue sont listés dans le tableau suivant. Les planches sont reprises en Annexe D.

Tableau III.9: : Débits de franchissement par paquets de mer critiques : conditions décennales (T10)

Profil	Débits de franchissement par paquets de mer (l/m/s)
3-6	0
4-93	0
10-2	0
10-10	0
11-32	0
11-37	0
11-44	1,11

III.3.3.7. Résultats du scénario extrême (T1000)

Pour le scénario extrême, le couple le plus pénalisant k10W est retenu (les tempêtes historiques exclues). Les débits résultant du test de digue sont listés dans le tableau suivant. Les planches sont reprises en Annexe D.

Tableau III.9: : Débits de franchissement par paquets de mer critiques : conditions millénaires (T1000)

Profil	Débits de franchissement par paquets de mer (l/m/s)
3-6	0,2
4-93	0
10-2	0
10-10	4,2
11-32	0
11-37	0
11-44	34,6

IV. Modélisation de l'évolution du trait de côte

Une analyse diachronique de l'évolution des côtes a été effectuée en première phase du PPRL (AGR & IMDC, 2014a). L'étude diachronique de la dynamique côtière consiste en une comparaison, à différentes dates, de la position des formes littorales les mieux à même de caractériser les évolutions du milieu. La position de la côte est déterminée à partir d'orthophotoplans.

L'analyse diachronique est effectuée sur deux périodes 1966-2009 et 1992-2009.

Cette analyse porte sur l'évolution réelle de la côte entre deux dates, et inclut donc :

- l'évolution morphodynamique à long terme de la côte, c'est-à-dire les tendances à l'érosion et accrétion de la côte à long terme (due aux courants de marée, houles, etc. en conditions normales) ;
- les reculs ponctuels qui se sont produits lors des tempêtes historiques ;
- l'influence de l'anthropisation de la côte, notamment la mise en place d'ouvrages de protection (épis, perrés, enrochements), les effets de la poldérisation, l'extension du port de Ouistreham (gare maritime).

Le port de Ouistreham a été étendu après la prise des images utilisées pour les orthophotoplans de 2009. Ainsi, l'effet de cette deuxième extension portuaire n'est pas comprise dans l'analyse diachronique de la dynamique côtière. Afin d'étudier l'impact de cette extension récente du port sur l'accrétion des plages de Riva Bella (à l'Ouest du port) et l'éventuel effet sur les plages situées à l'ouest du port (Pointe du Siège, Franceville-Merville), un modèle numérique d'évolution côtière (Litpack) a été utilisé.

IV.1. Description du logiciel Litpack

Un modèle Litpack est utilisé pour l'étude de la dynamique côtière. Litpack est un modèle 1D, capable de simuler les transports sédimentaires dans un grand nombre de conditions de houle. La combinaison de ces simulations permet de construire une suite temporelle de l'évolution côtière. Le logiciel Litpack est développé par DHI, Danemark (2009).

L'outil LITLINE fait partie du logiciel Litpack et calcule la position du trait de côte, sur la base d'entrées de houle sous forme de suite temporelle. Le modèle s'appuie sur une théorie dite « uniligne », dans laquelle un profil de plage est avancé ou reculé pour simuler l'évolution côtière (sans que le profil ne change de forme). Ainsi, la morphologie côtière est décrite par la position de la côte, et le profil de plage.

Le transport sédimentaire dépend non seulement des conditions de houle, mais également de la géométrie du profil de plage. Pour cela, l'outil LITDRIFT calcule le débit de charriage le long du profil transversal² de plage en fonction de différentes conditions de houle et des caractéristiques sédimentaires. Le modèle LITLINE fait alors successivement appel au calcul LITDRIFT pour établir le transport sédimentaire, le long de la côte, et en fonction de la suite temporelle de houle.

Des épis et jetées portuaires peuvent être intégrés comme structures transversales à la côte. Les deux ont un effet de blocage sur le transport sédimentaire (en fonction de leur longueur).

Le modèle permet également d'introduire des éléments parallèles à la côte, tels que les digues littorales, les enrochements ou les brise-lames offshores (détachés de la côte). Les digues littorales fixent la côte dans le modèle, et évitent un recul au-delà de l'ouvrage de défense. La profondeur d'eau peut augmenter au droit de l'ouvrage par affouillement en pied de digue.

IV.1.1. Paramètres et construction du modèle

IV.1.1.1. Paramètres

Les données d'entrée suivantes sont employées pour le modèle :

- Le climat de houle en conditions normales. Une suite temporelle d'une année « moyenne » est générée avec le modèle de houle Swan. La sélection de l'année moyenne est faite au large (point COAST-2525), sur la base de la distribution des fréquences d'occurrence des hauteurs de houle.

Les données relatives à la houle sont injectées sur des points choisis pour capter le maximum de la variation des houles le long de la côte. Ils résultent donc de plusieurs essais pendant la construction du modèle. Les 8 points d'entrée retenus dans le modèle sont localisés sur la figure IV.1.

- Les profils topo-bathymétriques. Ces profils sont issus de la base de données Lidar, couplée à la bathymétrie (voir figure II.1).
- Le trait de côte initial est issu des mesures Lidar. La cote 3,5 m IGN69 est retenue comme trait de côte initial. Cette cote correspond à la pleine mer de vive eau moyenne sur tout le secteur étudié, et délimite donc la borne supérieure de la zone morphologiquement active pour la modélisation LITPACK.

2 Profil de la plage parallèle à la côte.

- Le diamètre médian du sable : dans le rapport de la phase 1 du PPRL (AGR et IMDC, 2014a), les résultats de prélèvements de sable effectués par le CREC ont été analysés. Il a été conclu, que la granulométrie des sédiments varie fortement sur les plages du Calvados. En haut de plage, des sédiments moyens à grossiers ($D_{50} \geq 1 \text{ mm}$), des graviers et des plages à galets sont présents. Sur les estrans, des sables fins ($D_{50} \leq 500 \mu\text{m}$) et des vases ($D_{50} \leq 200 \mu\text{m}$) sont présents. Enfin, sur le secteur Bessin, des couches de tourbe sont présentes sur les plages. Une valeur moyenne de $D_{50}=500 \mu\text{m}$ est retenue pour l'ensemble de la côte.
- La profondeur de fermeture (c'est-à-dire la profondeur limite au-delà de laquelle il n'y plus de transport sédimentaire) est déterminée avec la formule de Hallermeier (1978, 1981). La valeur de la profondeur de fermeture calculée sur la base des houles au large est de l'ordre de 8,0 à 8,5 m. Cette valeur correspond aux valeurs trouvées dans la littérature (Avoine, 1992 *in* ACTIMAR, 2010).

$$DOC = 2,28 H_e - 68,5 \frac{H_e^2}{g T_e^2}$$

H_e : Hauteur de houle au large avec un dépassement annuel de 12h (m)
 T_e : Période de houle correspondant à H_e (s)

- La vitesse de chute des particules est déterminée selon la formule de Jimenez et Madsen (2003). La valeur calculée est de 0,03

$$w = \sqrt{g(s-1)d} \cdot \left(\left(\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g(s-1)d^3} \right)^{1/2} - \left(\frac{36v^2}{g(s-1)d^3} \right)^{1/2} \right)$$

g : accélération de la pesanteur terrestre ($9,81 \text{ m/s}^2$)

s : densité relative du sable (1,48)

d : diamètre médian du sable ($500 \mu\text{m}$)

v : viscosité cinématique de l'eau de mer ($9,29 \text{ E-}7 \text{ m}^2/\text{s}$)

Tableau IV.1: Paramètres du modèle morphodynamique.

Paramètre	Valeur
Diamètre médian du sable	$D_{50}=500 \mu\text{m}$
Profondeur de fermeture (Hallermeier)	8,0 m à 8.5 m
Trait de côte initial	Isobathe de +3.5 m IGN69 issu du Lidar Litto3D
Vitesse de chute des particules	$w = 0,03 \text{ m/s}$

IV.1.1.2. Construction du modèle

Afin de reproduire les processus du transport sédimentaire à grande échelle, le modèle est construit sur une plus grande échelle que la zone d'intérêt. Il s'étend de la Baie des Veys (Cricqueville-en-Bessin) à l'Ouest jusqu'à Trouville-sur-Mer à l'Est (voir figure IV.1).

Le trait de côte est défini à partir d'une ligne de référence (« *baseline* », voir figure IV.1), avec une inclinaison de 11° par rapport à la ligne Ouest – Est. Cette ligne est constituée de 743 points distants de 100 m. Pour chaque point, la position de la côte (trait rouge dans la figure IV.1) est définie par sa distance mesurée perpendiculairement à la ligne de référence.

Le trait de côte morphologique du modèle correspond à l'isobathe de 3,5 m IGN69 de la base de données Lidar. Le trait de côte au niveau des ouvrages est défini de deux manières :

- soit un ouvrage de protection s'est substitué à la côte naturelle. À marée haute, le rivage n'existe plus, et l'ouvrage est en contact direct avec la mer (pas de plage aérienne). Dans ce cas, le trait de côte est fixé par la façade maritime de l'ouvrage (cas d'un perré, ou d'une « digue promenade »).
- soit l'ouvrage et la plage (sables ou galets) coexistent. La ligne isobathe se trouve devant la façade maritime de l'ouvrage. La côte est dynamique et non fixée. Par l'érosion à long terme, il se peut qu'à un certain point dans le temps l'ouvrage se substitue à la côte, et qu'on se retrouve dans le premier cas.

Le modèle Litpack permet d'étudier les tendances de la côte sans prise en compte des ouvrages de protection contre l'érosion. Le modèle étudie ainsi la tendance au recul de la côte si l'érosion n'était pas stoppée par les ouvrages linéaires (perrés, enrochements, digues...) ou transversales (épis, brise-lames) et il permet de déterminer le taux moyen de recul de trait de côte T_x .

Dans un second temps, les zones où l'ouvrage de protection se substitue à la côte naturelle du fait du recul total de la côte à échéance 100 ans, sont identifiées. Le guide PPRL (DGPR, 2013) indique que « *si les arguments sont apportés que l'ouvrage, de par sa taille, ses caractéristiques, son implantation et son mode de gestion permet d'assurer cette fixation et que les zones adjacentes sont soumises à une érosion négligeable, il peut être considéré que la portion de linéaire côtier est fixée sur le long terme* ». Le guide précise que, pour les ouvrages ne protégeant qu'une partie d'une zone géomorphologiquement homogène, le recul doit être déterminé par le recul des zones adjacentes non protégées.

Deux ouvrages formant des avancées sur la mer ont une influence considérable sur la dynamique côtière : la jetée de Courseulles-sur-Mer et la gare maritime de Ouistreham. Ces structures ont un effet important de blocage du transport sédimentaire d'Ouest en Est, ce qui se traduit par une accumulation de sable (zone d'accrétion) à l'Ouest de la structure et une zone érodée à l'Est de la structure. Ces deux ouvrages sont bien considérées dans le modèle. Au niveau de la gare maritime de Ouistreham, la dernière extension du port est prise en compte et l'accumulation du sable liée à cette extension est donc considérée dans le modèle.

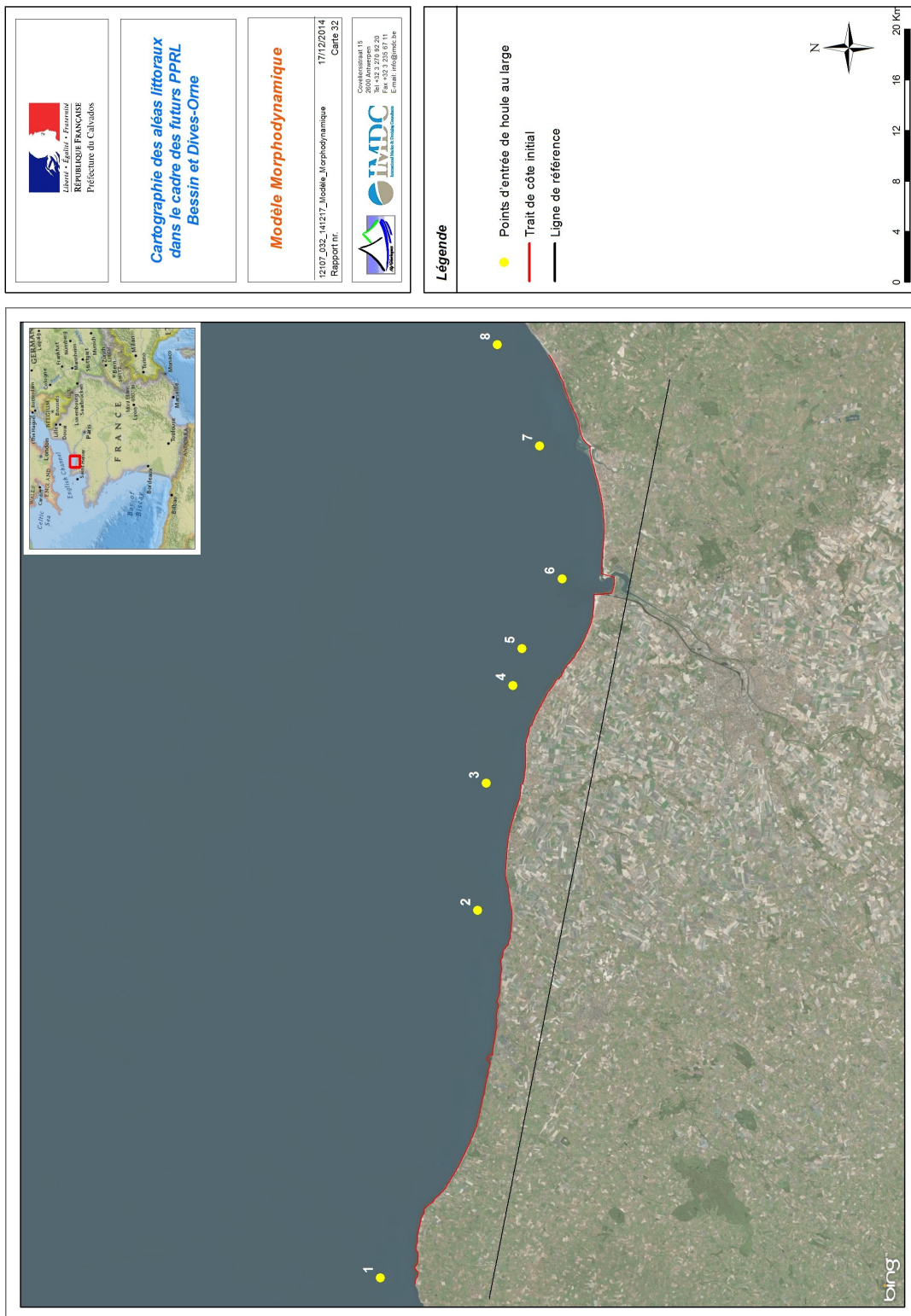


Figure IV.1: Emprise du modèle morphodynamique, ligne de référence (en noire), trait de côte initial (en rouge) et entrées de houle (points jaunes).

IV.1.1.3. Conclusions de l'étude diachronique et de la littérature

Sur les deux secteurs, Bessin et Dives – Orne, on constate que l'évolution côtière à court terme (1992-2009) est beaucoup plus faible que celle observée sur une plus longue période (1966-2009). Cette tendance récente à la stabilisation des côtes du Calvados est aussi décrite par Hirschberger (1996), qui identifie les côtes basses entre les falaises du Bessin comme intrinsèquement vulnérables à l'érosion côtière.

Hirschberger indique que la ligne de dunes est aujourd'hui stabilisée sur presque toute sa longueur par des épis, des enrochements et des digues promenades, et que le recul de côte historique (dont témoignent les multiples blockhaus glissés en mer) est aujourd'hui stoppé à l'exception de quelques secteurs faiblement protégés (notamment le marais de Ver-sur-Mer et Meuvaines). L'exploitation des archives de la DDTM Bessin a confirmé que la plupart des épis le long des marais de Bessin (Ver, Ver et Meuvaines et marais de l'Édit) ont été construits à partir des années 1960 (DDTM Bayeux, 2014) et qu'ils sont donc postérieurs à la phase d'érosion mise en évidence par les témoins que constituent les blockhaus.

Les communes vulnérables à l'érosion côtière ont été identifiées par l'IFREMER sur la base du suivi des côtes effectué par le CREC. Les communes indiquées en zone à risque sont Merville-Franceville-Plage et Varaville sur le secteur Dives – Orne, et l'ensemble des communes de Bernières-sur-Mer à Asnelles sur le secteur Bessin (voir figure IV.2).

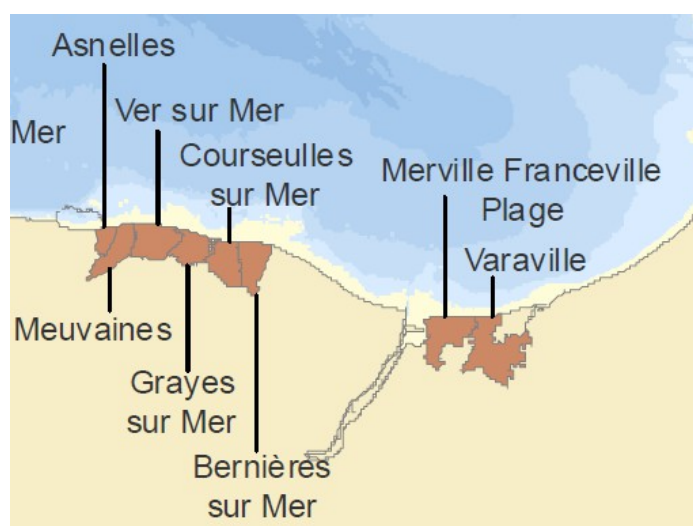


Figure IV.2: Identification des zones à risque d'érosion côtière (IFREMER, 2013).

Sur le secteur Dives – Orne l'analyse diachronique met en évidence une forte tendance à l'accrétion sur la plus grande partie du secteur (à l'exception d'un très léger recul au niveau de la dune de Colleville-Montgomery). Cette tendance à l'accrétion semble stabilisée entre 1992 et 2009.

Sur le secteur Bessin, une tendance à l'érosion est trouvée sur la partie Ouest du secteur (marais de Ver et Meuvaines, jusqu'aux falaises de Tracy-sur-Mer) entre 1966 et 2009. Ici aussi, la côte semble stabilisée entre 1992 et 2009. Comme indiqué ci-dessus, cette stabilisation s'explique par la construction des épis tout le long du secteur Bessin à partir des années 1960.

IV.1.1.4. Mise en œuvre du modèle

L'étude diachronique et les études disponibles (voir paragraphe précédent) montrent que la côte du Calvados est à présent stabilisée (dynamique à court ou moyen terme), Cette stabilisation – ou au moins le ralentissement significatif des processus d'érosion – est notamment dû aux multiples ouvrages de protection contre l'érosion à petite échelle, dispersés le long des côtes (épis, enrochements, blockhaus, etc.).

Le but du modèle est de cartographier la dynamique côtière naturelle à long terme, c'est-à-dire sans fixation anthropique de la côte. De ce fait, les traits de côte diachroniques, qui intègrent les effets des petits ouvrages, ne fournissent pas les données nécessaires à la mise en œuvre du modèle.

En revanche, les effets anthropiques majeurs qui peuvent influencer cette dynamique naturelle à grande échelle doivent bien être pris en compte : la dernière extension de la Gare Maritime à Ouistreham et l'arrêt des extractions de sable à Ouistreham. Cette évolution n'est pas décrite dans les traits de côte diachroniques mais peut être simulée avec le modèle Litpack.

Les changements récents (premières extensions de Ouistreham, arrêt des extractions de sable à Riva Bella et Merville-Franceville-Plage) peuvent être étudié avec le modèle alors que c'est impossible en s'appuyant exclusivement sur des traits de côte historiques.

Afin de simuler les tendances naturelles à grande échelle, le modèle est donc mis en œuvre sur la base des connaissances des processus morphologiques, plutôt que sur la base des traits de côte historiques.

Des mesures du transit littoral ont été effectuées au large du secteur Dives – Orne (ACTIMAR, 2010) et ont été utilisées pendant la calibration du modèle. Des campagnes de traceurs radioactifs et luminescents ont été effectuées en 1980, 1991 et 1996. Par la suite Sogreah (in ACTIMAR, 2010) a fait une nouvelle estimation du transit global, sur la base de données de l'évolution historiques et des campagnes de mesures :

- transit Ouest-Est : 100 000 m³/an
- transit Est-Ouest : 50 000m³/an
- transit net Ouest-Est : 50 000m³/an

Sur la base d'une comparaison diachronique de relevés bathymétriques, le blocage de sédiments sur la plage de Riva Bella (immédiatement à l'Ouest du port) par l'extension portuaire à Ouistreham a été estimée à 30 000 à 50 000 m³/an. Cette estimation est basée sur une longue période (1880-1989). Entre 1989 et 2006, l'accumulation se poursuit en se déplaçant vers le bas d'estran (ACTIMAR, 2010).

En réalité, le phénomène se produit à partir de l'extension portuaire et évolue dans le temps. Le blocage est maximal juste après la construction du terre-plein, et diminue graduellement au cours du temps. Dès que le blocage maximal est atteint, la plage se stabilise, et le transport sédimentaire passe au-delà du terre-plein (« *bypass* »). Il est donc possible que le blocage sédimentaire (et donc le transit littoral sur ce secteur) soit supérieur à 50 000m³ net par an.

Pour le calage du modèle, la rugosité du sédiment est ajustée afin d'obtenir un transit net vers l'Ouest de l'ordre de 50 000 à 100 000m³/an.

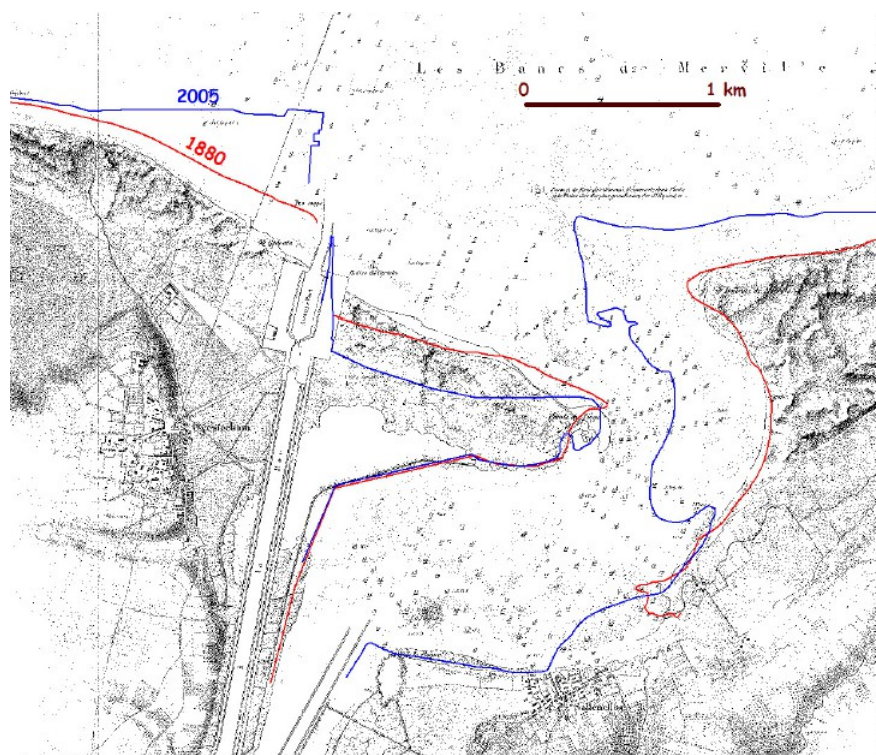


Figure IV.3: Évolution du trait de côte entre 1880 et 2005 d'après le rapport ACTIMAR (2010).

IV.2. Résultat du modèle

IV.2.1. Evolution du trait de côte et transit littoral

Le calcul est effectué sur une période de 50 ans. Les conditions de houle de l'année "moyenne" dans les 8 points indiqués sur la figure IV.1 sont répétées sur une période de 50 ans. Les résultats de la simulation montrent donc l'évolution de la côte après une période de 50 années normales, c'est-à-dire sans tempêtes extrêmes.

La planche de la figure IV.6 montre le résultat sur **le secteur de Dives - Orne**. La planche supérieure montre le trait de côte initial et après 50 ans. La planche inférieure montre le transit littoral (ou le transport sédimentaire) moyen annuel. Trois courbes sont présentées :

- les valeurs moyennes par an, calculées sur les dix premières années : cette courbe correspond à une période de transition, après la dernière extension du port de Ouistreham ;
- les valeurs moyennes par an, calculées sur les dix dernières années : cette courbe approche la situation « stabilisée » après l'extension de Ouistreham ;
- les valeurs moyennes par an, calculées sur l'ensemble des 50 années.

La courbe de la première année (courbe noire) montre une assez forte variation du transit littoral : cette situation initiale doit encore se stabiliser. La dixième année (courbe bleue) montre une variation beaucoup plus lisse. Il y a très peu d'évolution entre la courbe sur 10 (rouge) et 50 (vert) ans, ce qui confirme la stabilité à long terme des processus (accrétion et érosion à long terme).

Les zones où le transit diminue correspondent à des zones en accrétion. Les zones où le transport sédimentaire augmente, correspondent à des zones en érosion.

Ainsi, au point A, une forte diminution du transport est produite par la nouvelle extension portuaire à Ouistreham, et ce surtout sur les 10 premières années. Au fil du temps, l'effet de l'extension est moins prononcé. L'accrétion de la plage est visible au point A de la figure.

Au point B de la figure, le modèle ne représente pas bien la dynamique des bancs sableux de Merville et de l'estuaire de l'Orne (processus trop compliqués pour le modèle unidimensionnel Litpack). Une partie de la dune de Merville s'érode pour nourrir l'estuaire de l'Orne (effet de lissage numérique dans le modèle). De cette sorte, le transport s'inverse localement d'Est en Ouest (pic négatif au point D). Le recul de côte sur la partie ouest des dunes de Merville n'est donc pas fiable dans le modèle.

De même, un effet de lissage se produit dans l'estuaire de la Dives. L'accrétion de la Pointe de Cabourg est exagérée dans le modèle (point C).

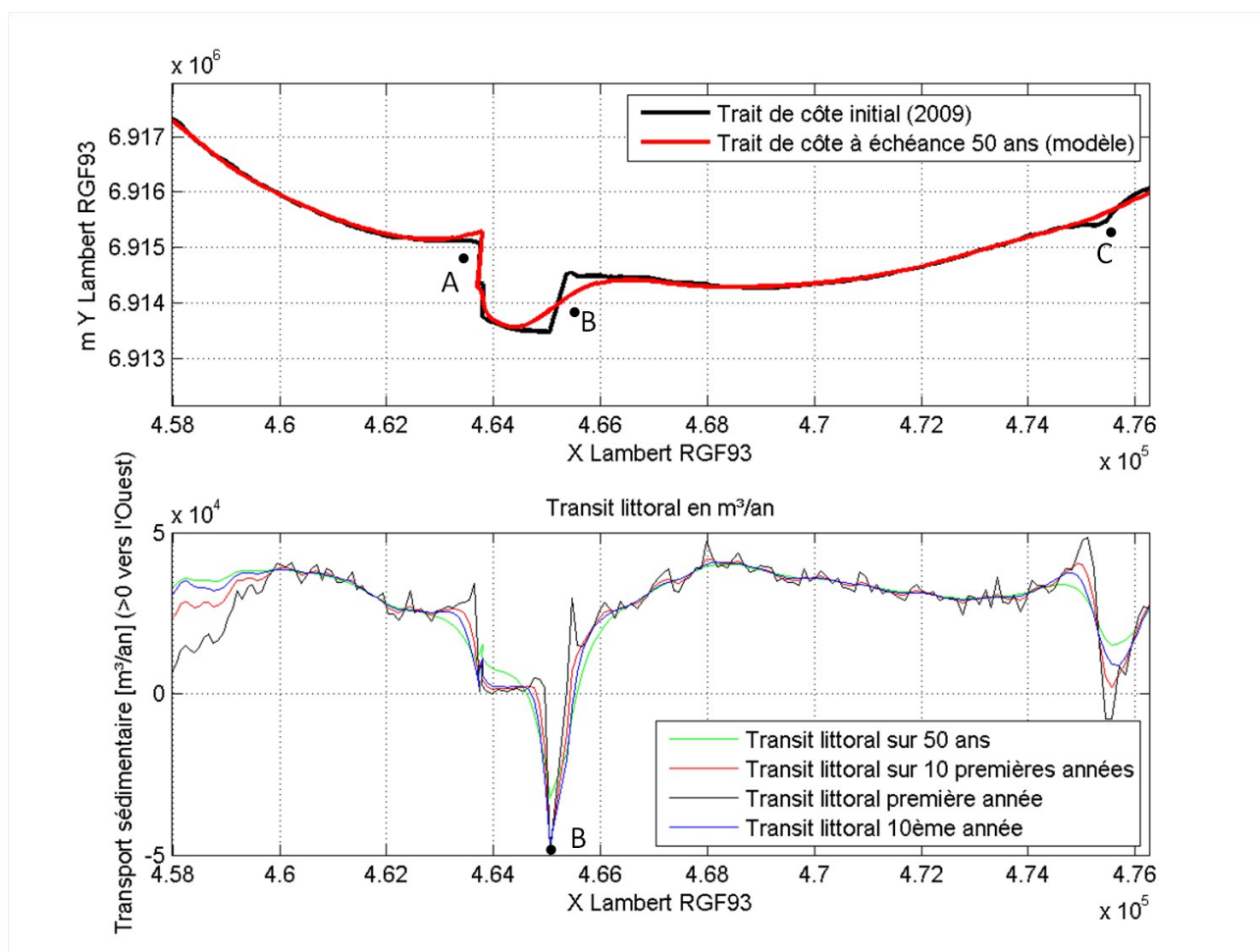


Figure IV.4: Résultat du modèle morphodynamique : secteur Dives – Orne.

Le transit littoral net au large de Ouistreham est de l'ordre de 30 000 m³/an à 40 000 m³/an ; il augmente vers l'Est pour atteindre 45 000 m³/an à 50 000 m³/an. Une (très) légère diminution est trouvée vers l'Est (Cabourg), en raison du changement de l'orientation de la côte. Cette diminution se traduit par une situation stable (légère accrétion) sur le secteur situé à l'Est de l'Orne. Sur la période totale de 50 ans (courbe verte), le transit littoral est relativement stable sur tout le secteur de Dives – Orne (à l'exception des embouchures) et fluctue autour de 45 000 m³/an. Ce résultat correspond bien à la réalité, qui montre une grande stabilité (ou même légère accrétion) de la côte à long terme sur ce secteur.

La planche de la figure IV.5 présente le résultat sur le **secteur Bessin**. Le transport sédimentaire est quasiment nul au niveau des falaises de Tracy-sur-Mer (point A). Ce résultat correspond bien à la réalité : peu de sédiments transitent au droit des pointes rocheuses de la falaise et les plages en pied de falaise sont très pauvres en sédiments fins.

Le transit littoral se rétablit sur Arromanches (point B), ce qui implique une forte érosion locale, au niveau de la digue d'Arromanches. Ce phénomène n'est toutefois pas observé dans la réalité. Il est possible que :

- Le modèle surestime ici l'érosion, car l'atténuation du climat de houle par les vestiges du port Winston Churchill n'est pas prise en compte.
- La tendance à l'érosion existe, mais le recul est arrêté par l'ouvrage de protection d'Arromanches. Cet ouvrage, vaste en apparence, a fait objet de plusieurs réparations historiques, qui peuvent être liés au recul de côte. L'ouvrage fixe à présent la côte (absence d'une plage aérienne et large estran).

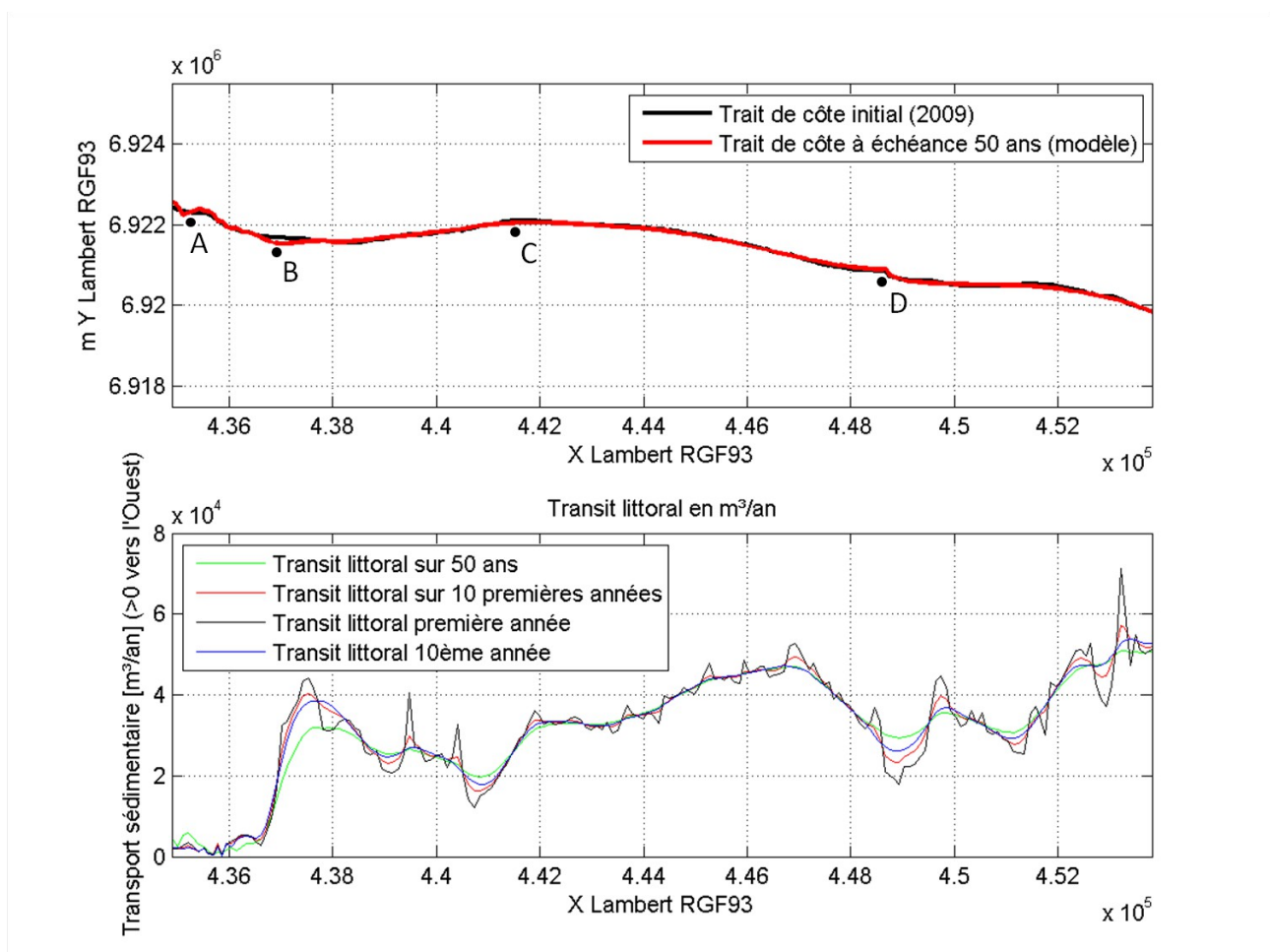


Figure IV.5: Résultat du modèle morphodynamique : secteur Bessin.

Une deuxième zone d'érosion est identifiée au niveau du point C dans la figure. Cette zone correspond à la digue du Hable de Heurtot et Pont Chaussé. L'érosion se produit par la réorientation de la côte (pointe avancée de la côte), qui est extrêmement vulnérable à l'érosion (figure IV.6). On remarque une forte augmentation du transit littoral sur ce secteur, sur toutes les périodes montrées dans la figure, ce qui indique qu'il n'y pas de stabilisation naturelle de cette érosion.

Entre le point C (Hable de Heurtot) et D (Courseulles-sur-Mer) une légère augmentation du transit littoral indique que cette zone se trouve en érosion stable à long terme.

Vers l'Est, le transport est bloqué au niveau de la jetée de Courseulles-sur-Mer (point D) ce qui produit une zone locale d'accrétion à hauteur de la dune de Courseulles-sur-Mer (figure IV.7). Le graphe du transit littoral montre clairement une stabilisation de ce processus.

À l'Ouest du port de Courseulles, les épis de Courseulles ne sont pas pris en compte. Le blocage des sédiments à Courseulles, se traduit par une zone d'érosion (figure IV.7). Cet effet est moyenné sur l'ensemble de la section homogène BSH3 (Bernières-ouest et Courseulles-est) grâce à l'accrétion au niveau du Marais de l'Edit. L'évaluation des ouvrages fixant la côte sera faite dans une phase suivante.



Figure IV.6: Zone érosive au niveau entre Roseau Plage (Asnelles) et Le Paisty Vert (Ver-sur-Mer) : trait noir : côte initiale, trait rouge côte à échéance 50 ans.



Figure IV.7: Comparaison du trait de côte actuel (noir) et à échéance 50 ans (rouge) au niveau du Port de Courseulles-sur-Mer : accrétion de la dune de Courseulles, érosion à l'Est du port.

IV.2.1.1. Recul moyen annuel par section homogène

Les valeurs du recul moyen par section homogène, issues du modèle Litpack, sont récapitulées dans les tableaux IV.2 (Dives – Orne) et IV.3 (Bessin). Les valeurs inférieures à 0,10 m par an sont négligeables et correspondent à une stabilité du littoral.

Il ressort des valeurs de **Dives – Orne** que la côte est relativement stable sur le secteur de Cabourg et Merville-Franceville-Plage. L'accrétion de la dune de Riva Bella du fait de l'extension du port est estimé à 0,6 m/an.

À Colleville-Montgomery et Hermanville, une accrétion nette d'environ 0,20 m/an est obtenue. Cette accrétion peut être l'effet de l'extension du port à Ouistreham.

Tableau IV.2: Recul moyen par section homogène du secteur Dives – Orne (modèle Litpack, sur 50 ans).

N°	Commune	Nom	Progrès (+) / Recul (-) moyen [m/an]	Remarque
2	Cabourg	Dune de la Pointe de Cabourg	+0,86	Accrétion de la Pointe de Cabourg surestimée par le modèle
3	Cabourg	Remblai de Cabourg	— 0,05	
4	Varaville Franceville- Merville-Plage	Cordon dunaire de Varaville et Franceville-Merville-Plage	+0,01	Partie érodée dans le modèle par lissage du trait de côte exclue du calcul
9	Ouistreham	Dunes Ouistreham	+1,36	
10	Ouistreham	Remblai Ouistreham	+0,59	
11	Colleville-Mty et Hermanville / Mer	Cordon dunaire de Colleville et Remblai de Hermanville	+0,18	

Sur le **secteur Bessin**, l'ensemble de la zone à l'Ouest se trouve en recul net. Il est à noter que les (multiples) épis ne sont pas pris en compte sur ce secteur. Leur prise en compte pour l'aléa érosion sera évaluée dans une phase ultérieure.

La dune de Courseulles-sur-Mer est en accrétion, alors que les marais de Ver-sur-Mer et Meuvaines sont en érosion. À partir d'Asnelles, les zones érosives et en accrétion fluctuent assez fortement. Ces résultats peuvent être expliqués par les effets du port Winston Churchill, qui ne sont pas inclus dans les climats de houle utilisés pour la modélisation Litpack.

Tableau IV.3: Recul moyen par section homogène du secteur Bessin (modèle Litpack sur 50 ans).

N°	Commune	Nom	Progrès (+) / Recul (-) moyen [m/an]	Remarque
1	Bernières / Mer	Bernières-est	— 0,39	
2	Bernières / Mer	Remblai de Bernières	— 0,74	
3	Bernières et Courseulles / Mer	Bernières-ouest et Courseulles-est	— 0,02	Épis de Courseulles non pris en compte
4	Courseulles et Graye / Mer	Dune de Courseulles et Graye-sur-Mer	+0,85	
5	Graye / Mer	Dune de Graye-sur-Mer	+0,09	
6	Ver / Mer	Ver-sur-Mer-est	— 0,42	
7	Ver / Mer	Marais de Ver-sur-Mer	— 0,17	
8	Meuvaines	Marais de Meuvaines	— 0,39	
9	Asnelles	Asnelles-est	+0,35	Effet du port W. Churchill
10	Asnelles et Saint- Come-de-Fresné	Asnelles-ouest	+0,20	Effet du port W. Churchill
11	Saint-Come-de- Fresné	Saint-Come – La Guerre	+0,49	Effet du port W. Churchill
12	Saint-Come-de- Fresné et Arromanches-I-B	Falaises de Saint-Come et Arromanches	— 1,06	Recul de falaises étudié séparément

N°	Commune	Nom	Progrès (+) / Recul (-) moyen [m/an]	Remarque
13	Arromanches-I-B et Tracy-s-M	Remblai d'Arromanches	— 1,22	Érosion probablement surestimée par le modèle (pour l'état actuel) (effet du port W. Churchill)
14	Tracy / Mer	Falaises de Tracy	+0,70	Recul de falaises étudié séparément

IV.2.1.2. Conclusion

Les résultats du modèle morphodynamique confirment les tendances générales observées des mouvements de côtes basses et meubles. L'accrétion par la jetée de Courseulles et le nouveau terre-plein de Ouistreham sont bien représentées par le modèle (et le modèle fournit une prédiction pour les années à venir, à partir de la situation actuelle). L'érosion des digues des marais du secteur Bessin et la stabilité de la côte entre l'Orne et la Dives ressortent également du modèle.

Au niveau du port Winston Churchill, le climat de houle, issu du modèle de houle (chapitre II.) ne prend pas en compte l'atténuation des vagues par les pontons du débarquement (dans la situation actuelle). Les résultats du modèle morphodynamique constituent donc plutôt une prédiction pour une situation future avec une dégradation du port Winston Churchill. Ces résultats sont donc à traiter avec prudence sur ce secteur.

Dans une seconde phase, lors de la détermination de l'aléa recul de trait de côte, les résultats du modèle Litpack seront comparés à l'étude diachronique des traits de côte, et l'effet des ouvrages de protection fixant la côte sera évaluée pour la projection du recul à échéance 100 ans.

V. Bibliographie et références

ACTIMAR (2010). *Etude d'impact hydrodynamique et sédimentaire pour un projet d'aménagement portuaire*. Projet MOC 0134.

Alp'Géorisques & IMDC, 2013. Photos issues de la visite de terrain réalisée entre le 17 et le 19 Juin 2013.

Alp'Géorisques & IMDC, 2014a. *Plan de Prévention de Risques littoraux : Bessin & Dives-Orne. Phase 1 : Analyse préalable des sites*. Rapport I/RA/12107/13.197/MCO v3.0

Alp'Géorisques & IMDC, 2014b. *Plan de Prévention de Risques littoraux : Bessin & Dives-Orne. Phase 2 : Méthodologie et conditions hydrodynamiques*. Rapport I/RA/12107/14.137/PHI v2.0

CETMEF / EDF R&D-LNHE 2010/2011. *ANEMOC – Atlas Numérique d'États de Mer Océanique et Côtier*. version : 1.1, disponible de : <http://anemoc.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>, consulté avril 2012.

CETMEF, 2012. *Étape de cartographie des surfaces inondables et des risques dans le cadre de la directive « inondations », Rapport de la mission 5 « Inondations par submersions marines et tsunamis », version 7 du Mai 2012 (méthodologie TRI v7)*

CETMEF, 2012b. *CANDHIS – Centre d'Archivage National de Données de Houle In Situ v2.0.0*. Disponible de <http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr>

CETMEF, 2012c. *Analyse des surcotes extrêmes le long des côtes métropolitaines*, Rapport version 4, 14 Novembre 2012.

CETMEF, Kergadallan X., 2013 *Analyse statistique des niveaux d'eau extrêmes – Environnements maritime et estuarien*.

CETMEF, 2013b. *Compte rendu des échanges CETMEF – IMDC sur la méthodologie statistique à suivre pour le PPRL Loire-Atlantique*, I/VV/12086/13.173/ABO, 29 et 30 avril 2013.

DDTM (2014). Informations archives de la DDTM Délégation Bayeux, sur les travaux d'ouvrages côtiers, transmis fin août 2014

DGPR, 2013. *Lettre du 19 avril 2013 concernant la détermination du niveau marin « extrême » dans le cadre de l'aléa submersion marine de la directive « inondations », du Service Risques Naturels et Hydrauliques ; Bureau des risques météorologiques*.

DHI (2009). *Litpack : An Integrated Modeling System for Littoral Processes And Coastline Kinetics*. User Manual.

EDF R&D, 2011. *TOMAWAC Software for sea state modeling on unstructured grids over oceans and coastal seas*, disponible de <http://www.opentelemac.org/index.php/modules-list/20-tomawac>

Eurotop, 2007. *Wave overtopping of sea defences and related structures : assessment manual*. EA, ENW et KFKI, 2007.

Hallermeier, R.J. (1978). *Uses for a calculated limit depth to beach erosion*. Proceedings of the 16th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp. 1493-1512.

Hallermeier, R.J. (1981). *A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate*. Coastal Engineering, 4, pp. 253-277.

Hinschberger (1996). *Les côtes bas-normandes au péril de la mer*. F. Hinschberger. In : Norois, N°169, 1996. La Basse-Normandie, pp. 63-73. DOI : 10.3406/noroi.1996.6683

IFREMER (2013). Site web : <http://envlit.ifremer.fr> consulté en octobre 2013.

Jimenez, J.A., and Madsen, O.S. (2003). *A simple formula to estimate settling velocity of natural sediments*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 129 (2), pp. 70-78.

SHOM, 2011. *Références Altimétriques Maritimes Ports de France métropolitaine et d'outre-mer. Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée*. Édition 2011. ISBN 978-2-11-097286-6

SHOM / CETMEF, 2012. *Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique)*. ISBN 978-2-11-128331-2

Annexe A : Conditions de houle extrême à la côte

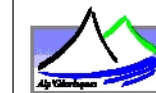
Points de sortie secteur Bessin



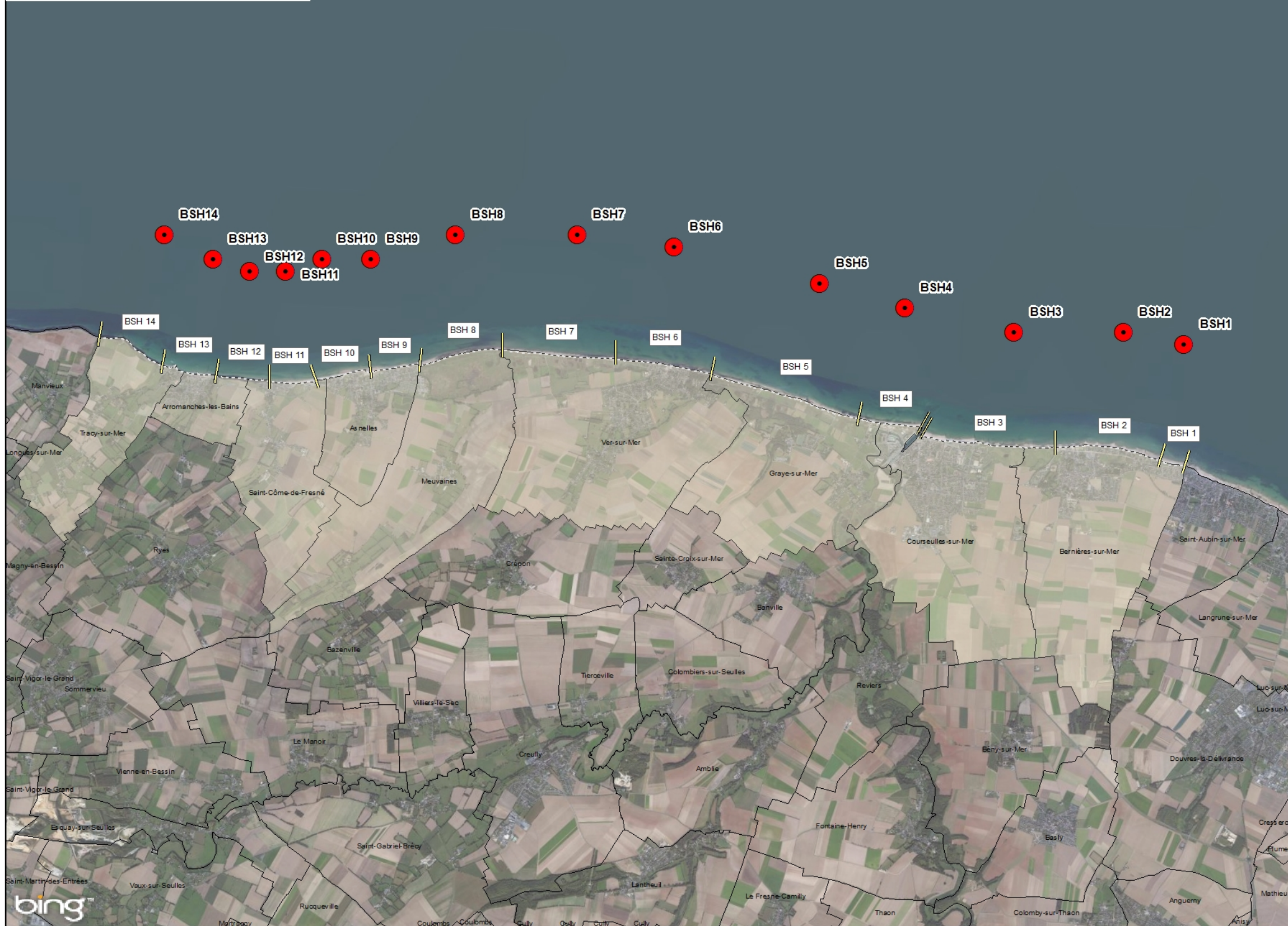
**Cartographie des aléas littoraux
dans le cadre des futurs PPRL
Bessin et Dives-Orne**

**Points de sorties
du modèle de houle
Secteur: Bessin**

12107_023_141201_points_sorties_du_modele_Bessin 1/12/2014
Rapport nr. Carte 23

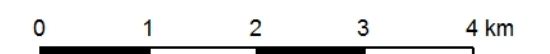


Coveliersstraat 15
2600 Antwerpen
Tel +32 3 270 92 20
Fax +32 3 235 67 11
E-mail: info@imdc.be



Légende

- Points de sortie du modèle de houle
- Zones homogènes



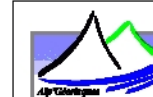
Points de sortie secteur Dives-Orne



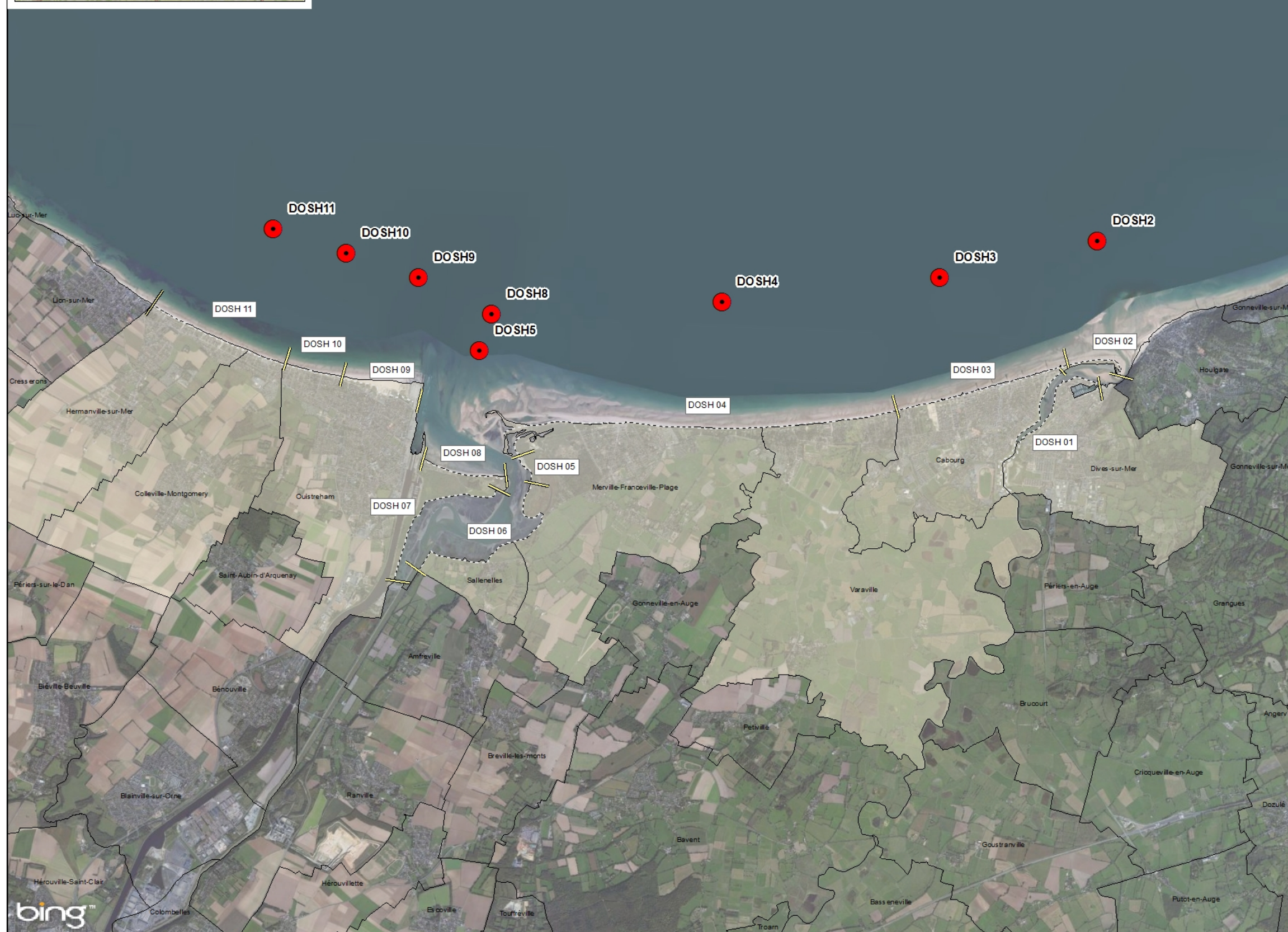
**Cartographie des aléas littoraux
dans le cadre des futurs PPRL
Bessin et Dives-Orne**

**Points de sorties
du modèle de houle
Secteur: Dives-Orne**

12107_022_141201_points_sorties_du_modele_DivesOrne 1/12/2014
Rapport nr. Carte 22

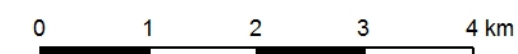


Coveliersstraat 15
2600 Antwerpen
Tel +32 3 270 92 20
Fax +32 3 235 67 11
E-mail: info@imdc.be



Légende

- Points de sortie du modèle de houle
- Zones homogènes



Conditions centennales (T100)

Tableau V.1: Hauteurs de houle par section homogène sur le secteur Bessin, conditions du NNE, T100

	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10
BSH1	2.50	2.70	2.85	3.04	3.16	3.26	3.29	3.20	2.83	2.27
BSH2	2.62	2.81	2.98	3.17	3.29	3.38	3.42	3.30	2.89	2.30
BSH3	3.54	3.71	3.84	3.99	4.06	4.05	3.81	3.21	2.61	2.11
BSH4	3.74	3.94	4.05	4.20	4.27	4.27	4.05	3.44	2.78	2.23
BSH5	3.43	3.63	3.77	3.95	4.03	4.08	3.98	3.50	2.83	2.25
BSH6	2.99	3.21	3.37	3.56	3.67	3.73	3.69	3.37	2.79	2.22
BSH7	3.14	3.34	3.48	3.66	3.76	3.82	3.76	3.38	2.76	2.21
BSH8	3.07	3.29	3.44	3.64	3.73	3.79	3.77	3.54	2.96	2.34
BSH9	2.70	2.89	3.06	3.23	3.36	3.46	3.48	3.36	2.94	2.33
BSH10	2.63	2.84	3.04	3.24	3.38	3.49	3.52	3.41	3.06	2.44
BSH11	2.96	3.19	3.34	3.54	3.63	3.68	3.60	3.30	2.81	2.24
BSH12	4.41	4.58	4.69	4.79	4.81	4.64	4.15	3.40	2.74	2.20
BSH13	5.70	5.81	5.86	5.82	5.67	5.19	4.44	3.59	2.89	2.31
BSH14	6.09	6.16	6.16	6.03	5.80	5.27	4.51	3.65	2.94	2.36

Tableau V.3: Hauteurs de houle par section homogène sur le secteur Bessin, conditions d'Ouest, T100

	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10
BSH1	3.056	3.170	3.289	3.440	3.546	3.584	3.483	3.154	2.866	2.327
BSH2	3.216	3.331	3.453	3.601	3.706	3.728	3.595	3.226	2.923	2.371
BSH3	3.707	3.748	3.784	3.738	3.641	3.376	3.025	2.613	2.379	1.963
BSH4	3.892	3.959	4.013	4.019	3.942	3.676	3.274	2.804	2.533	2.069
BSH5	3.859	3.947	4.029	4.086	4.067	3.853	3.452	2.951	2.654	2.154
BSH6	3.575	3.677	3.775	3.874	3.904	3.784	3.475	3.005	2.708	2.206
BSH7	3.648	3.747	3.843	3.944	3.978	3.864	3.565	3.096	2.799	2.284
BSH8	3.590	3.702	3.819	3.958	4.049	4.044	3.855	3.407	3.079	2.480
BSH9	3.259	3.369	3.479	3.627	3.727	3.785	3.718	3.422	3.129	2.519
BSH10	3.225	3.348	3.478	3.644	3.767	3.832	3.766	3.468	3.176	2.569
BSH11	3.436	3.544	3.660	3.770	3.832	3.753	3.504	3.067	2.777	2.268
BSH12	4.612	4.641	4.669	4.580	4.431	4.064	3.600	3.086	2.786	2.280
BSH13	4.951	4.920	4.890	4.708	4.498	4.106	3.647	3.138	2.836	2.327
BSH14	4.897	4.866	4.834	4.665	4.462	4.086	3.645	3.148	2.850	2.346

Tableau V.2: Hauteurs de houle par section homogène sur le secteur Dives-Orne, conditions du NNE, T100

	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10
DOSH2	4.40	4.55	4.65	4.74	4.74	4.54	3.98	3.28	2.69	2.18
DOSH3	4.49	4.64	4.76	4.85	4.87	4.69	4.11	3.38	2.76	2.23
DOSH4	4.38	4.51	4.61	4.65	4.63	4.40	3.85	3.21	2.64	2.14
DOSH6	2.28	2.49	2.65	2.84	2.95	3.05	3.08	2.96	2.66	2.17
DOSH7	2.75	2.95	3.11	3.29	3.39	3.47	3.46	3.28	2.81	2.25
DOSH9	3.86	4.03	4.16	4.29	4.36	4.31	3.95	3.29	2.67	2.15
DOSH10	4.34	4.51	4.63	4.74	4.78	4.65	4.13	3.39	2.75	2.21
DOSH11	4.61	4.76	4.88	4.97	4.98	4.77	4.16	3.40	2.75	2.21

Tableau V.4: Hauteurs de houle par section homogène sur le secteur Dives-Orne, conditions d'Ouest, T100

	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10
DOSH2	3.522	3.544	3.561	3.499	3.410	3.188	2.893	2.543	2.333	1.958
DOSH3	3.756	3.777	3.788	3.712	3.598	3.352	3.034	2.652	2.424	2.022
DOSH4	3.230	3.251	3.277	3.215	3.136	2.933	2.671	2.345	2.157	1.810
DOSH6	2.741	2.839	2.940	3.035	3.074	2.977	2.736	2.371	2.154	1.761
DOSH7	3.166	3.258	3.350	3.428	3.441	3.300	3.002	2.590	2.350	1.919
DOSH9	3.986	4.007	4.018	3.931	3.798	3.502	3.122	2.678	2.419	1.967
DOSH10	3.879	3.880	3.880	3.765	3.629	3.345	2.992	2.579	2.334	1.910
DOSH11	3.904	3.901	3.894	3.774	3.631	3.338	2.980	2.563	2.320	1.889

Annexe B : Cartes des profils de digue



**Cartographie des aléas littoraux
dans le cadre des futurs PPRL
Bessin et Dives-Orne**

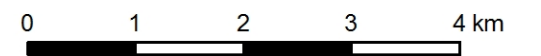
**Test de Dignes
Profils
Secteur: Dives-Orne**

12107_024_141216_test_de_dignes_Profils_DivesOrne 16/12/2014
Rapport nr. Carte 24

Coveliersstraat 15
2600 Antwerpen
Tel +32 3 270 92 20
Fax +32 3 235 67 11
E-mail: info@imdc.be

Légende

▲▲ Profils

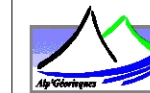




**Cartographie des alés littoraux
dans le cadre des futurs PPRL
Bessin et Dives-Orne**

**Test de Dignes
Profils
Secteur: Bessin**

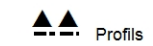
12107_025_141216_test_de_dignes_Profils_Bessin 16/12/2014
Rapport nr. Carte 25



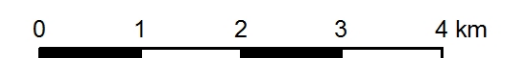
Coveliersstraat 15
2600 Antwerpen
Tel +32 3 270 92 20
Fax +32 3 235 67 11
E-mail: info@imdc.be



Légende



Profils



Annexe C : Résultats test de digue Secteur Bessin

C.1 Scénario de référence +0,20m

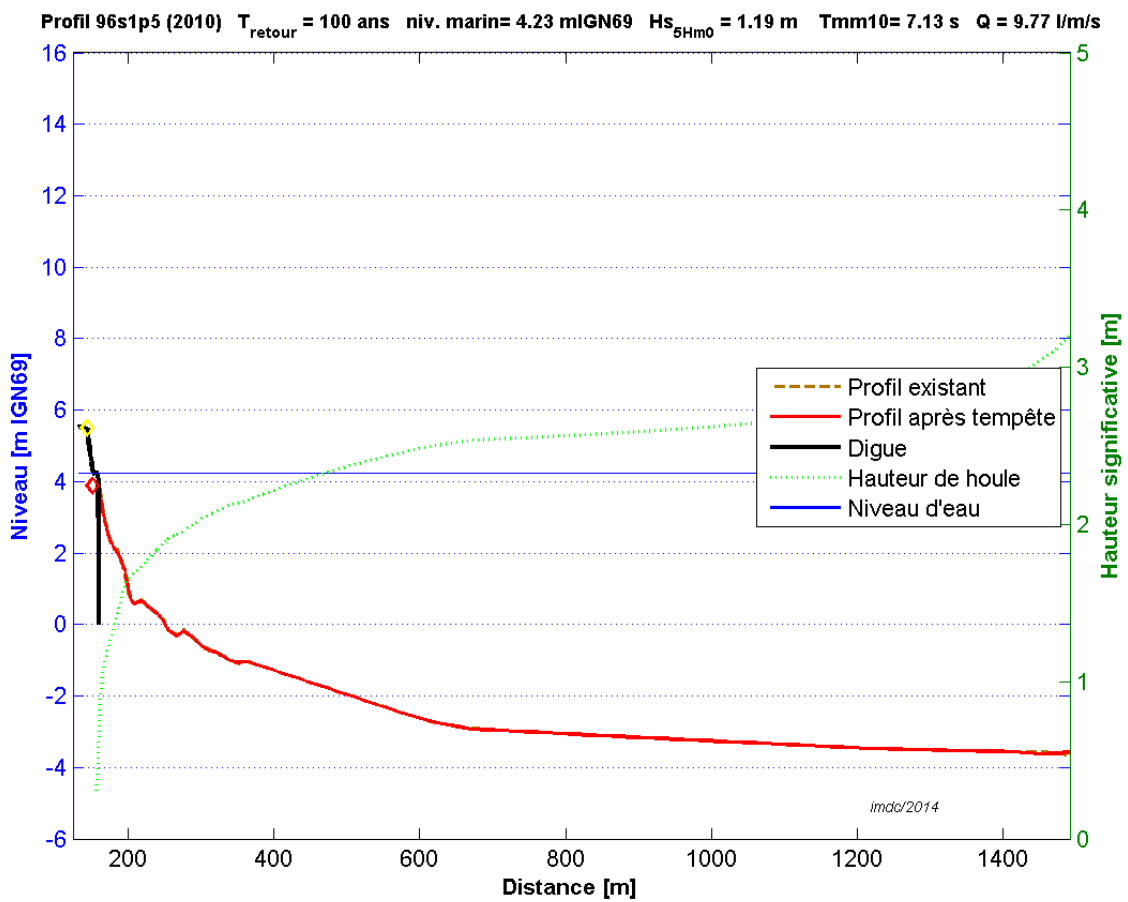


Figure V.1: Test de digue référence +20cm, profil s1p5

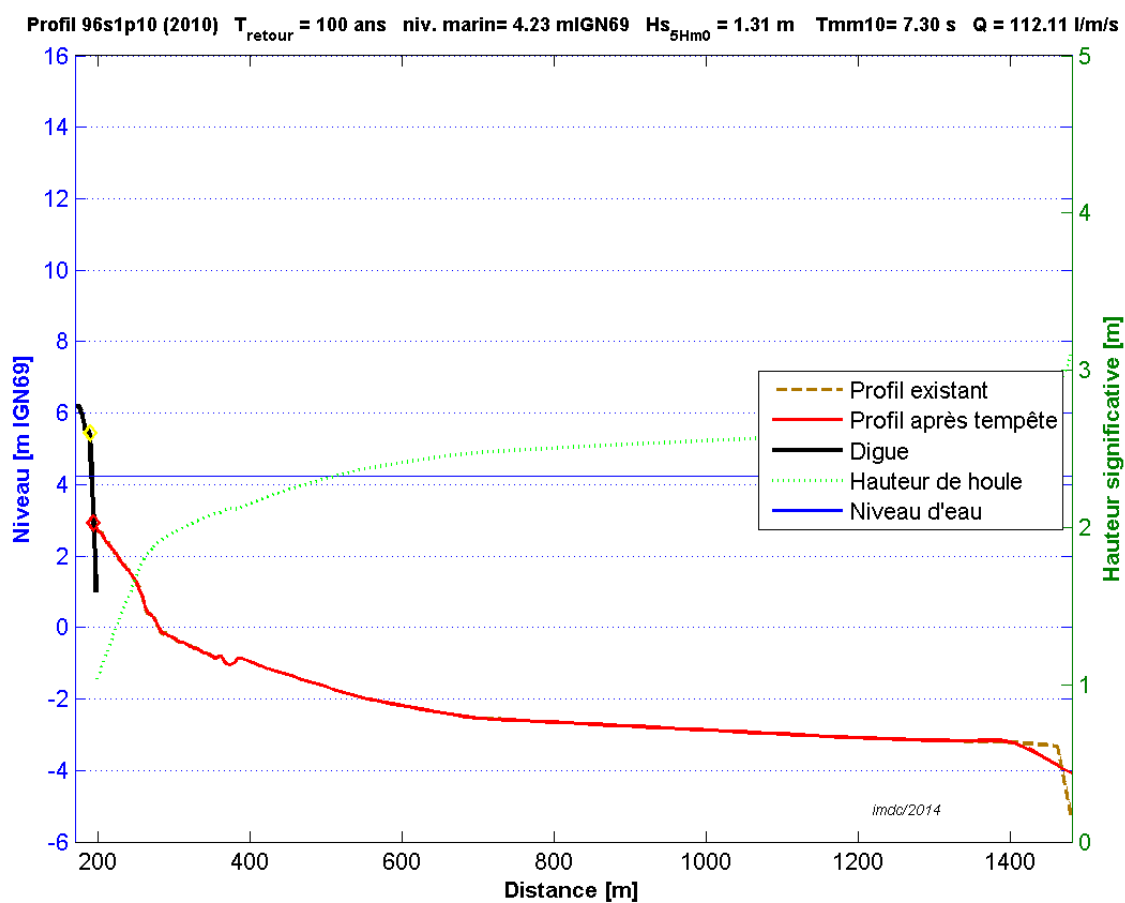


Figure V.2: Test de digue référence +20cm, profil s1p10

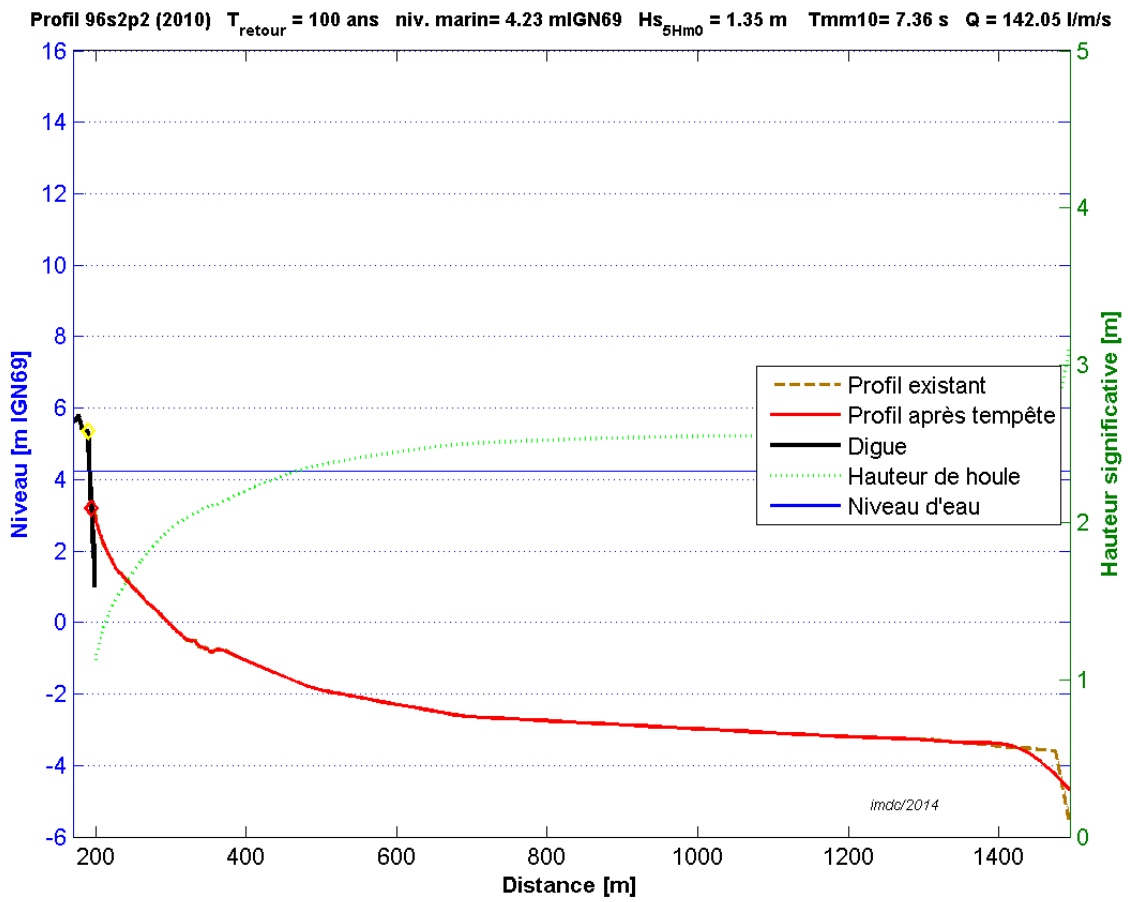


Figure V.3: Test de digue référence +20cm, profil s2p2

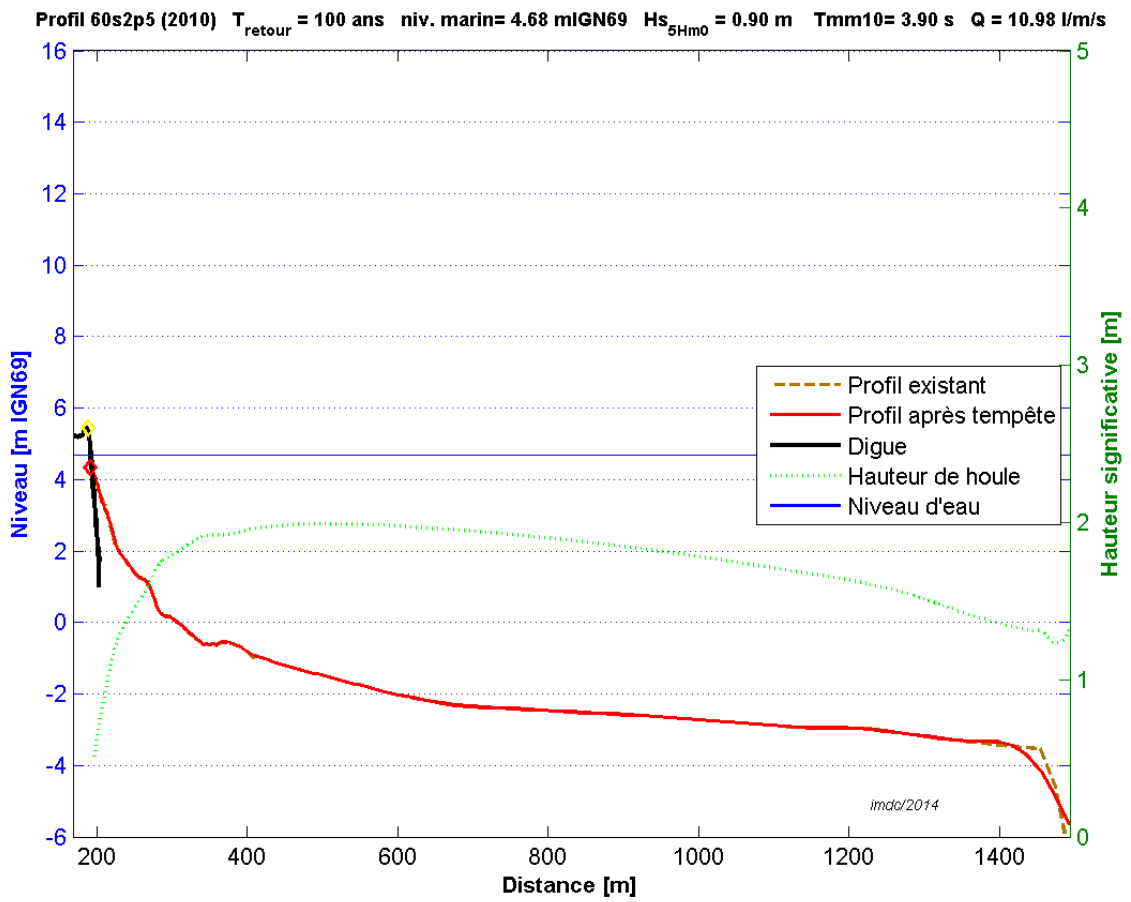


Figure V.4: Test de digue référence +20cm, profil s2p5

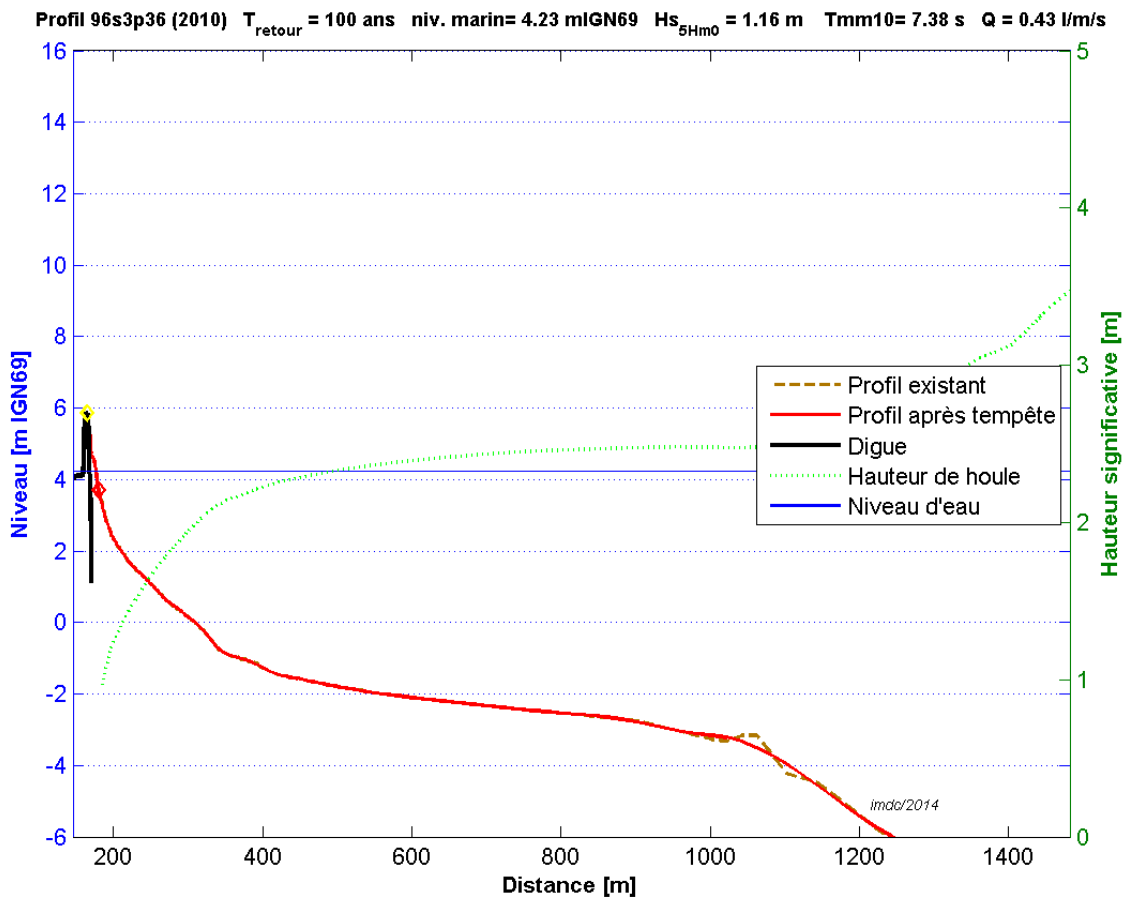


Figure V.5: Test de digue référence +20cm, profil s3p36

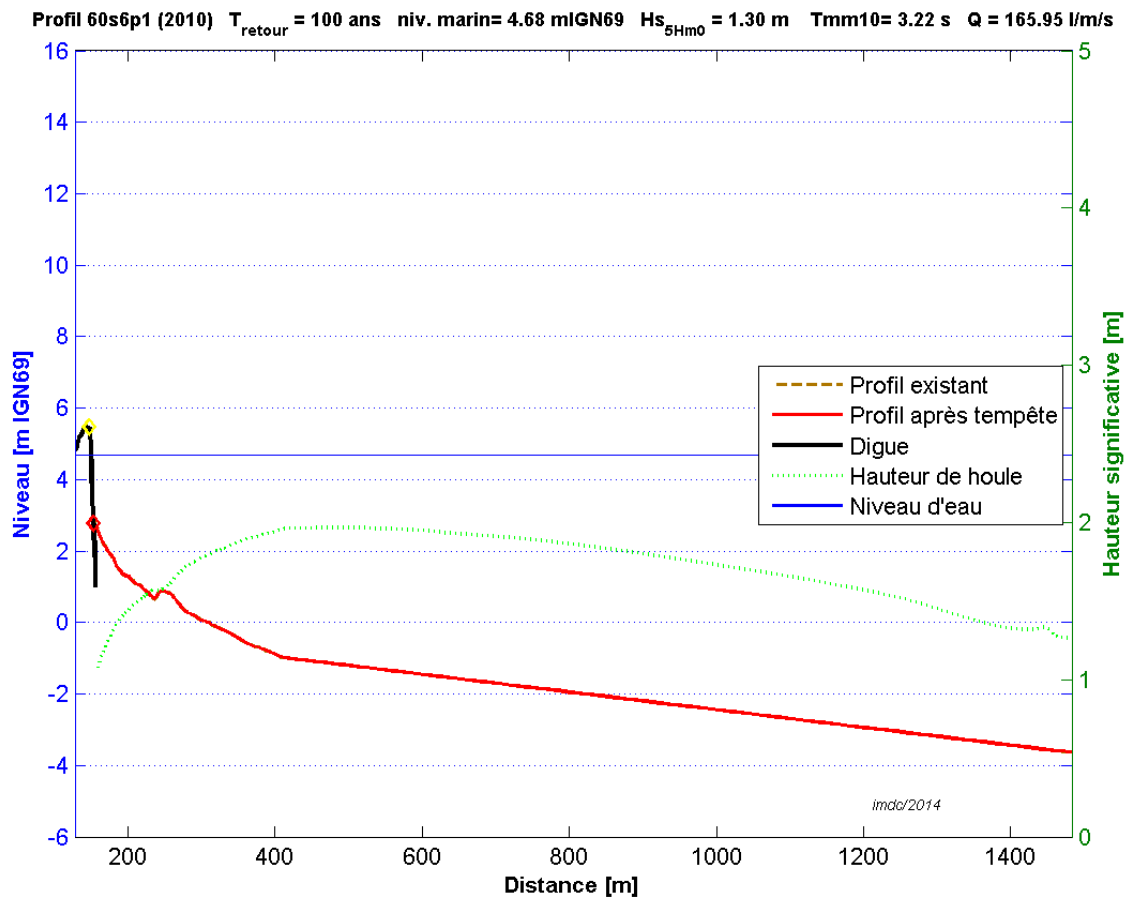


Figure V.6: Test de digue référence +20cm, profil s6p1

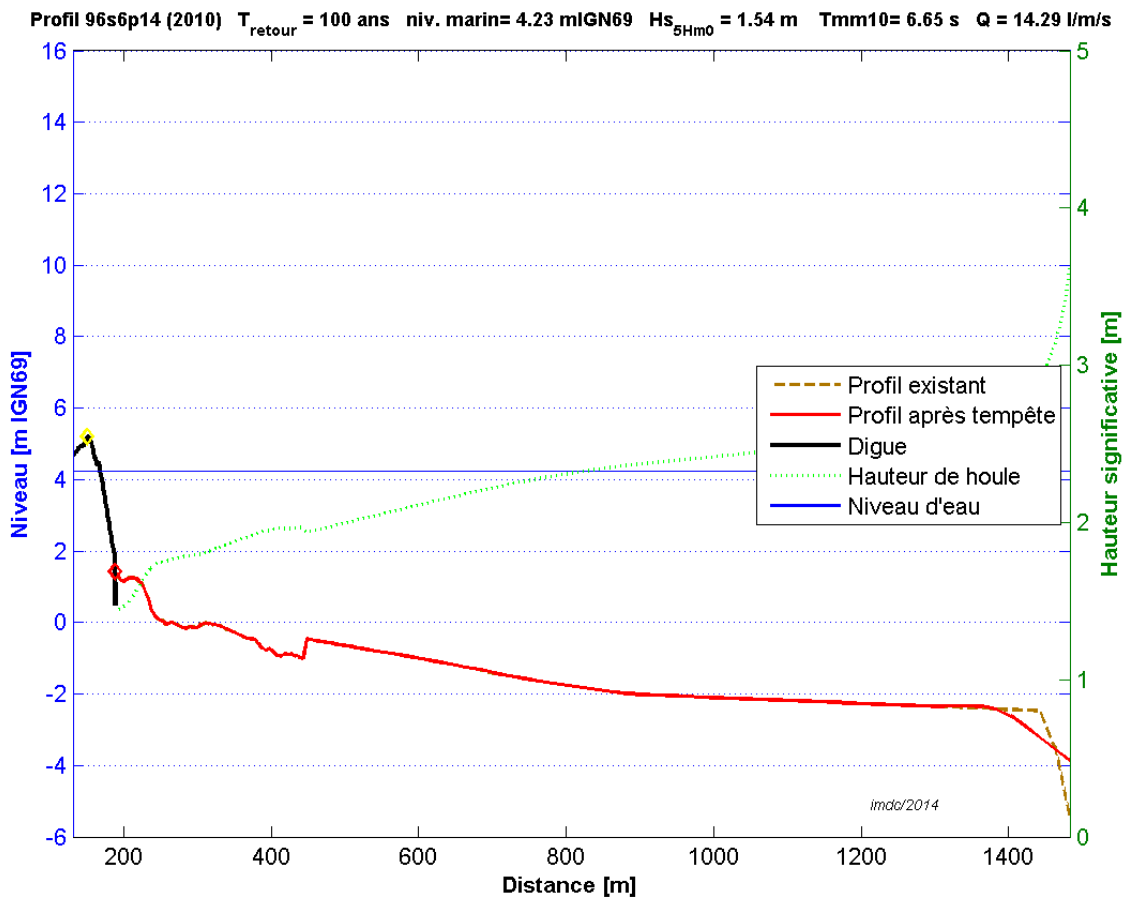


Figure V.7: Test de digue référence +20cm, profil s6p14

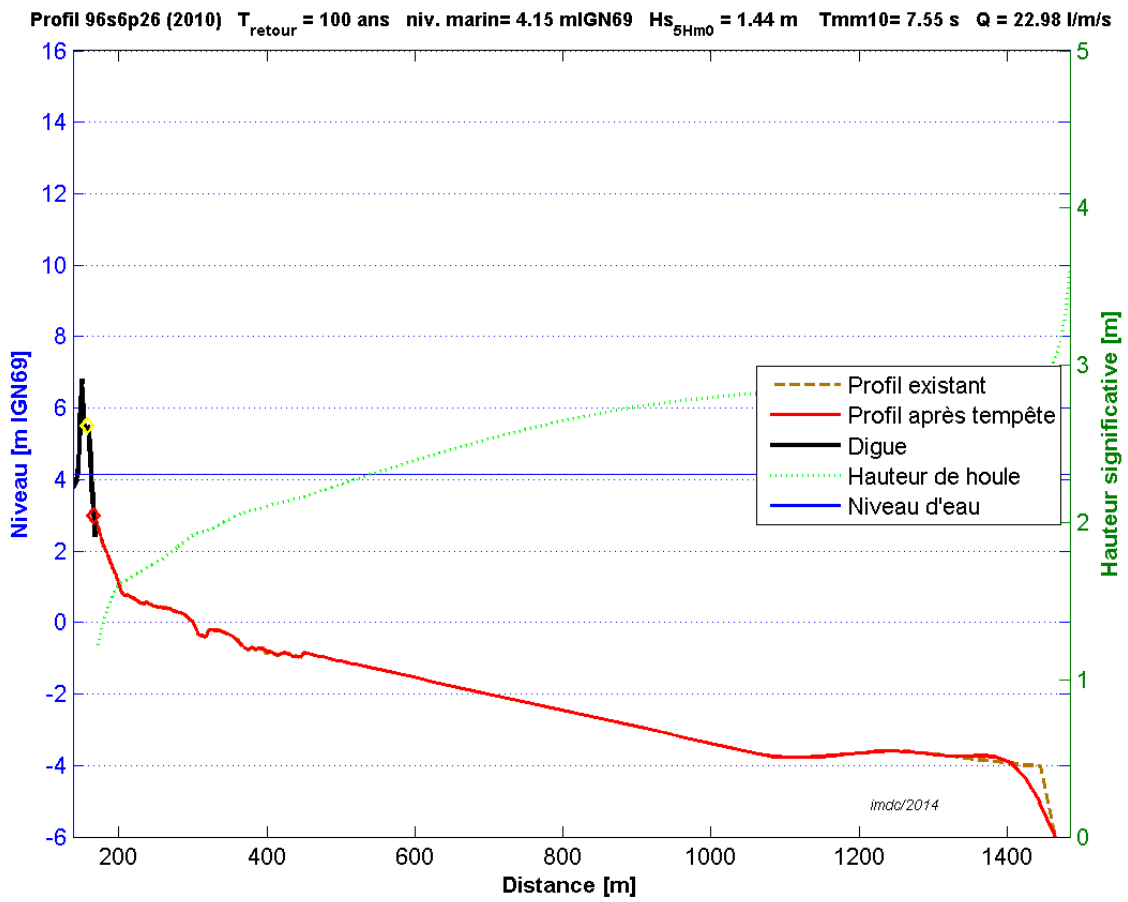


Figure V.8: Test de digue référence +20cm, profil s6p26

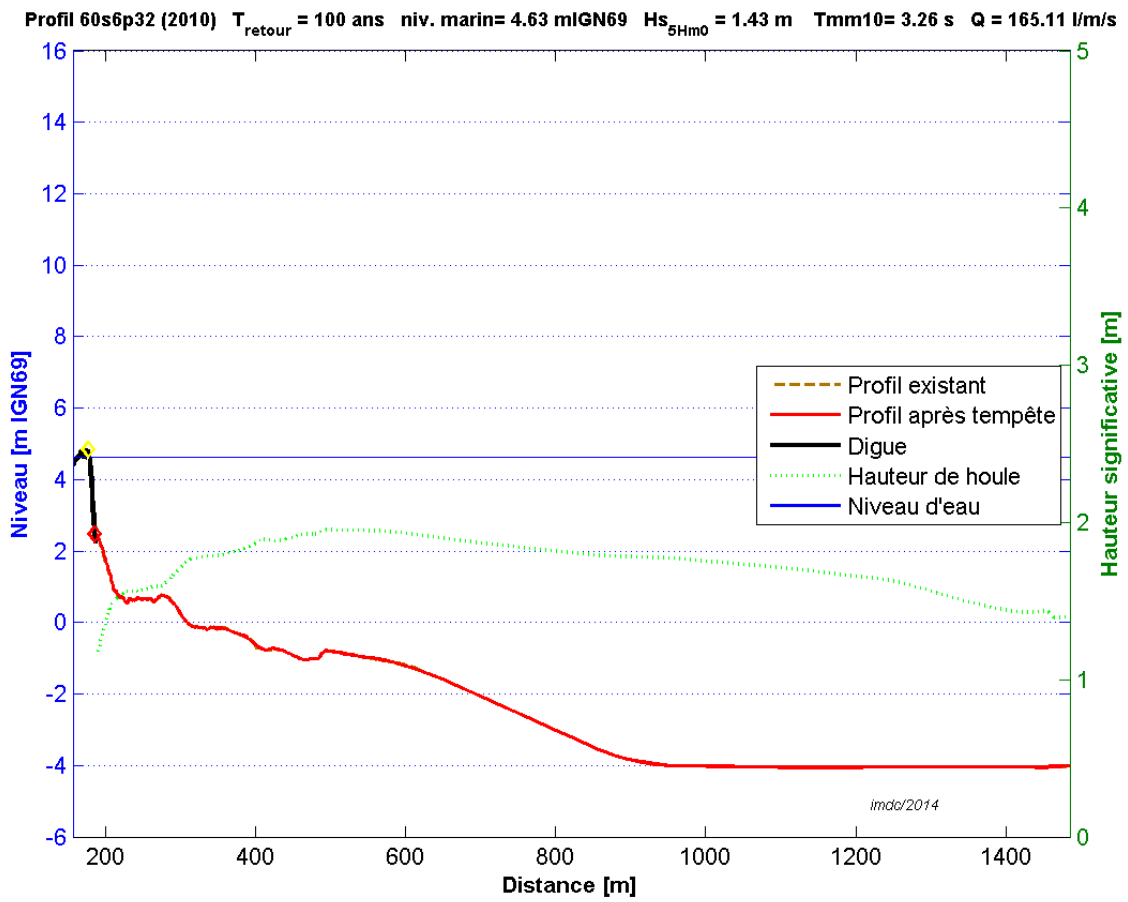


Figure V.9: Test de digue référence +20cm, profil s6p32

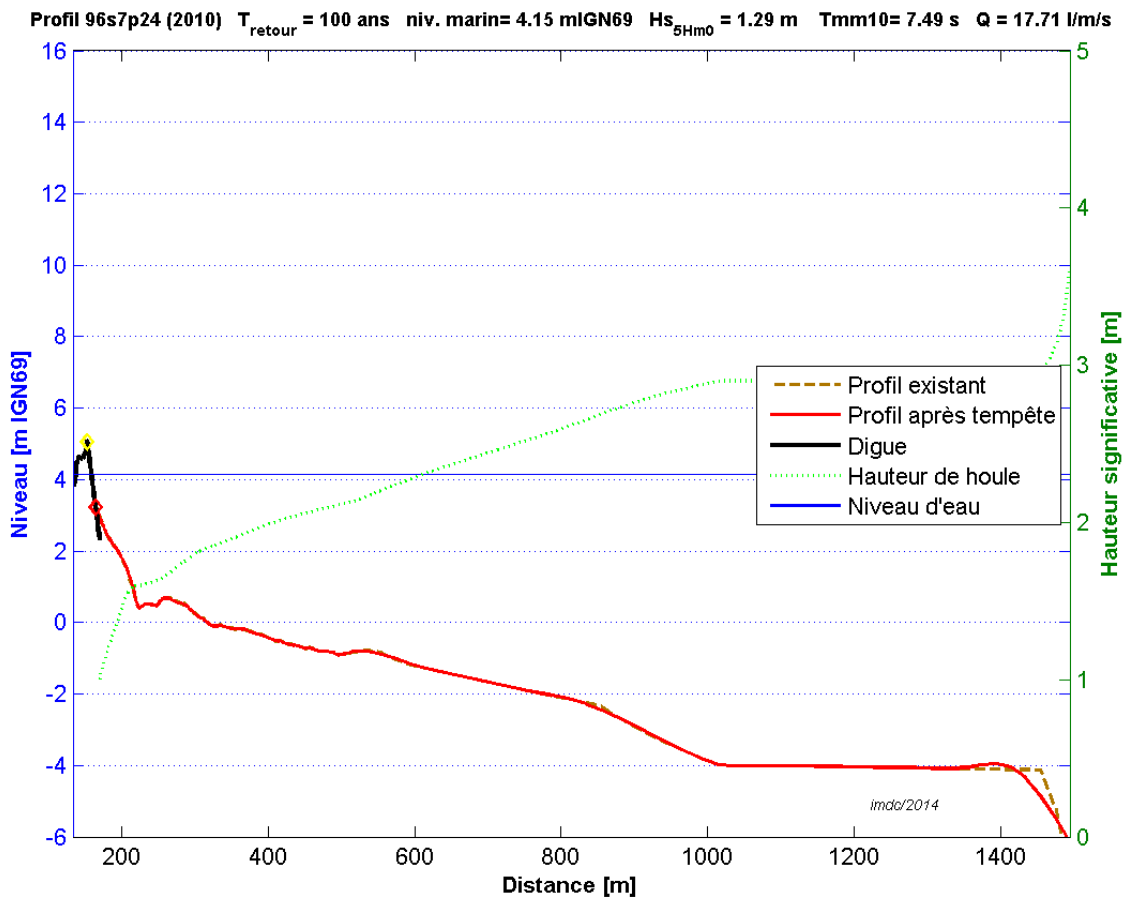


Figure V.10: Test de digue référence +20cm, profil s7p24

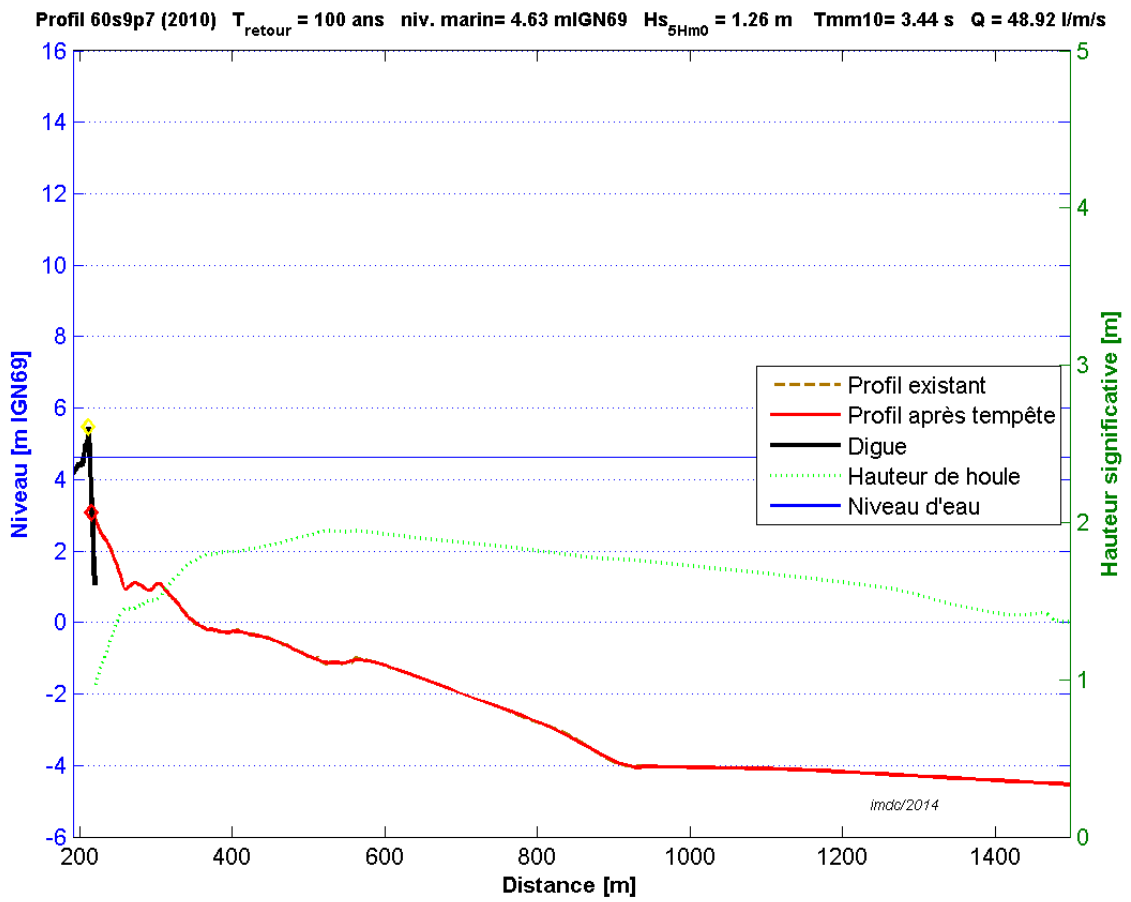


Figure V.11: Test de digue référence +20cm, profil s9p7

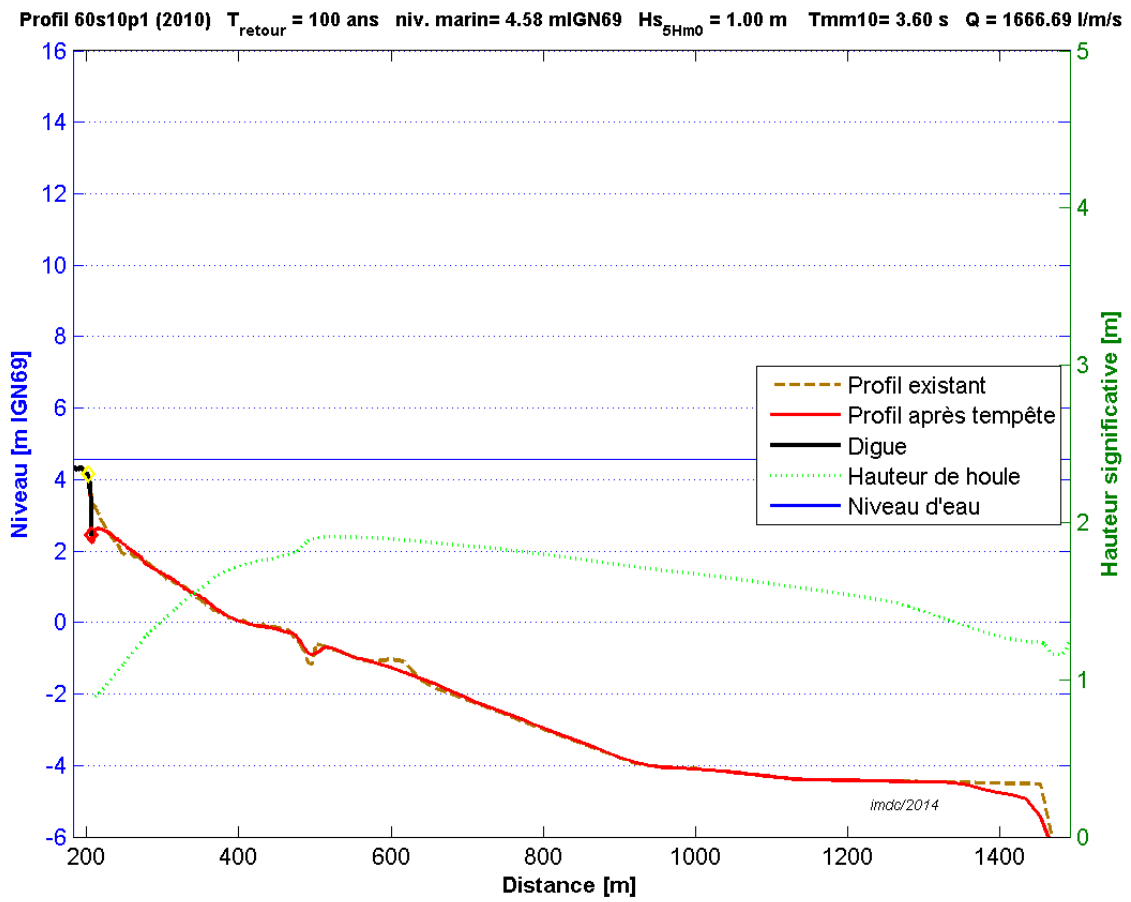


Figure V.12: Test de digue référence +20cm, profil s10p1

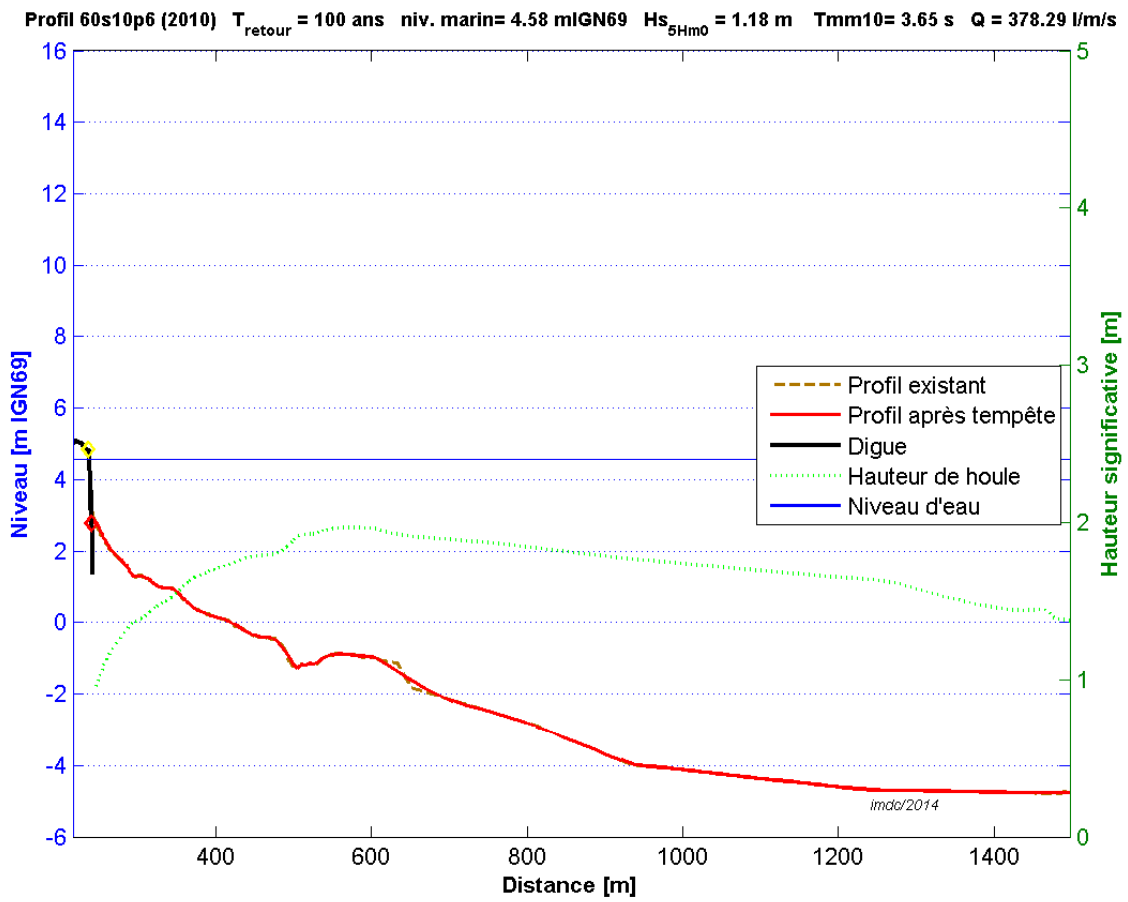


Figure V.13: Test de digue référence +20cm, profil s10p6

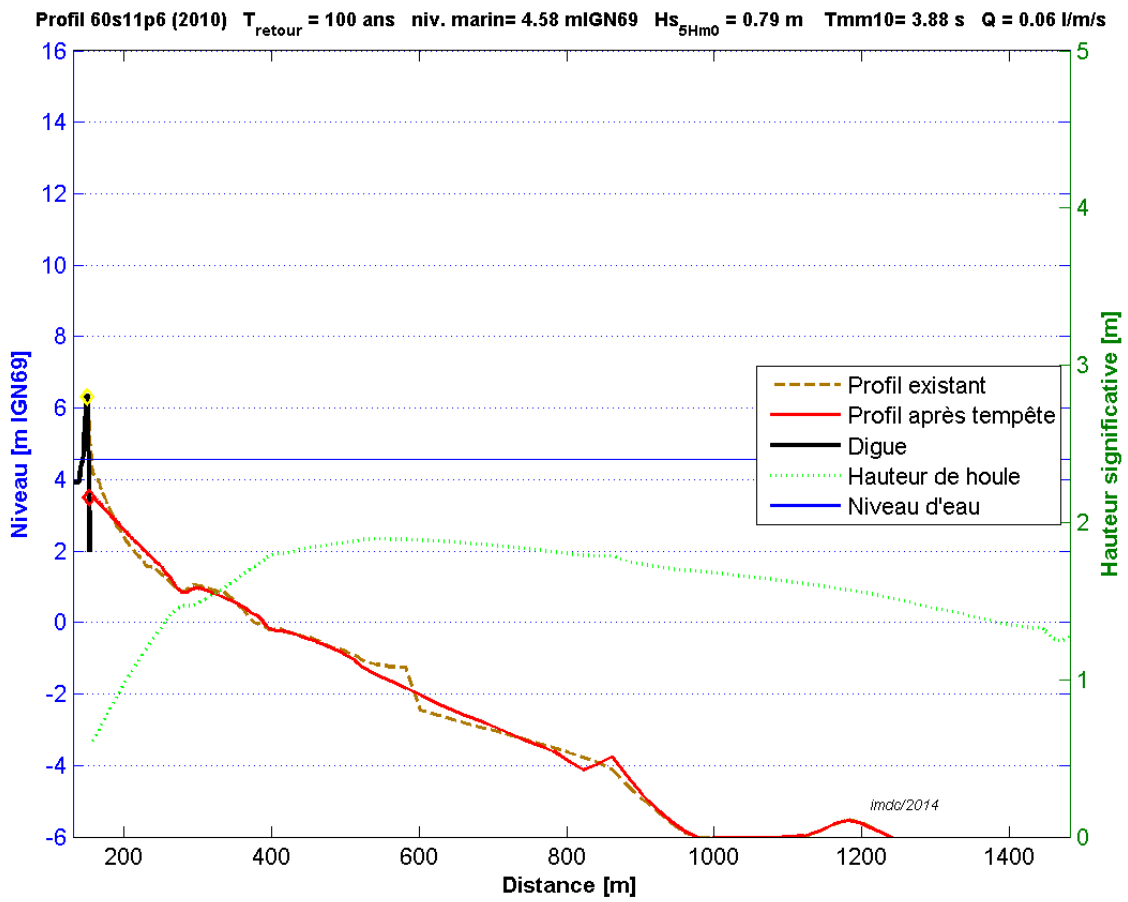


Figure V.14: Test de digue référence +20cm, profil s11p6

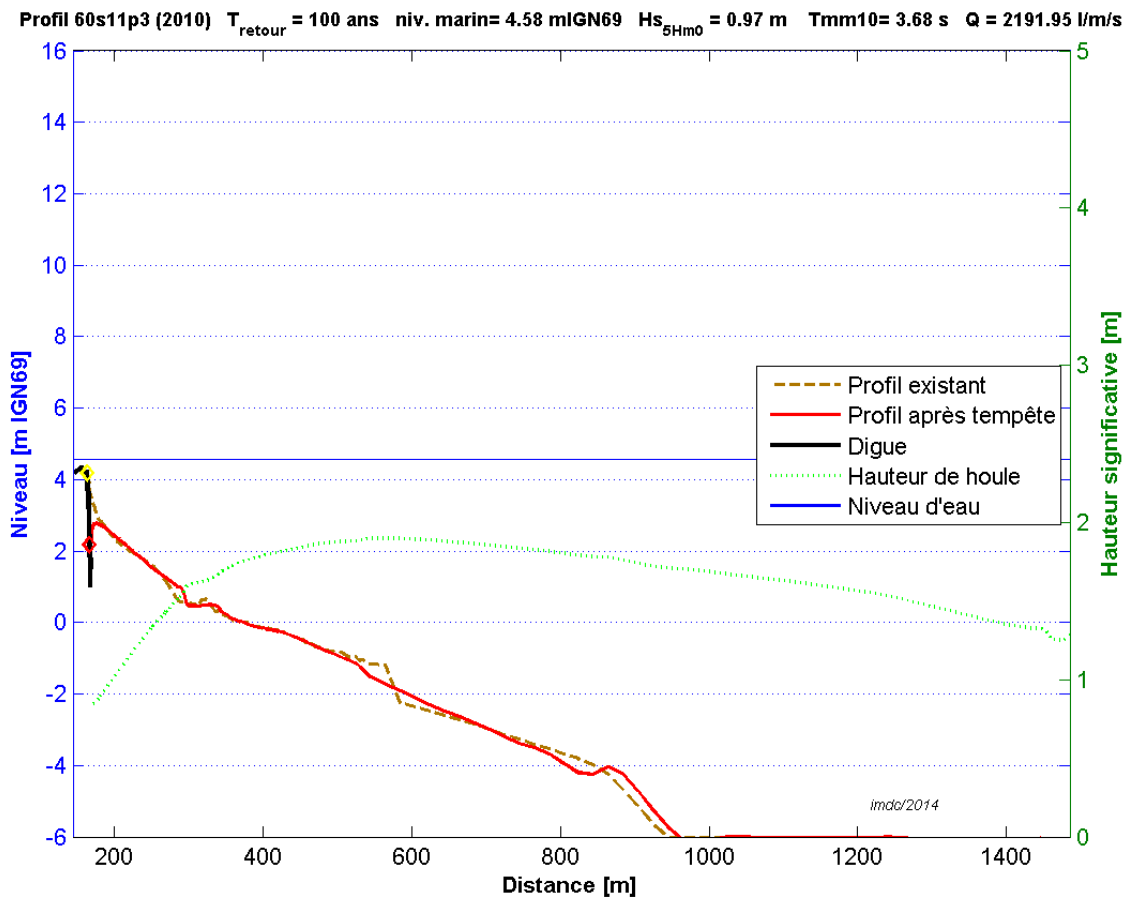


Figure V.15: Test de digue référence +20cm, profil s11p3

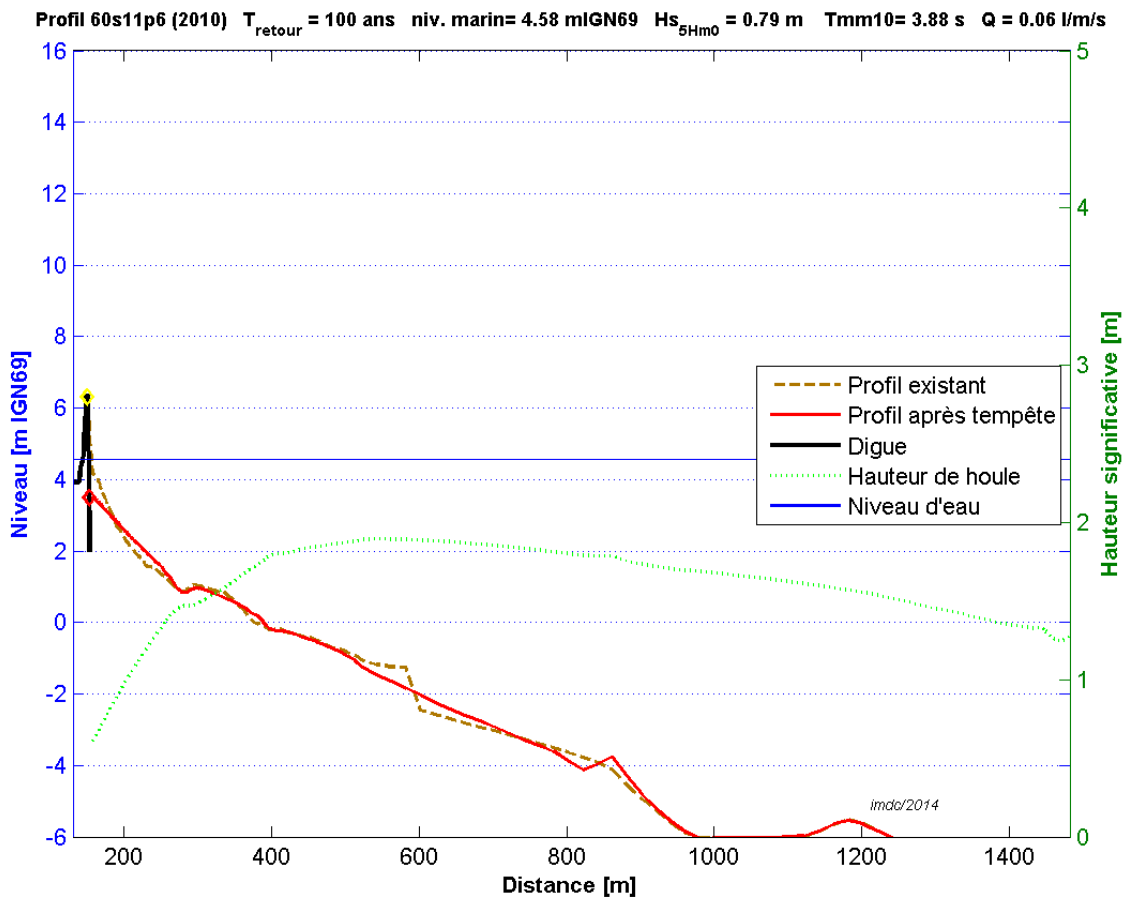


Figure V.16: Test de digue référence +20cm, profil s11p6

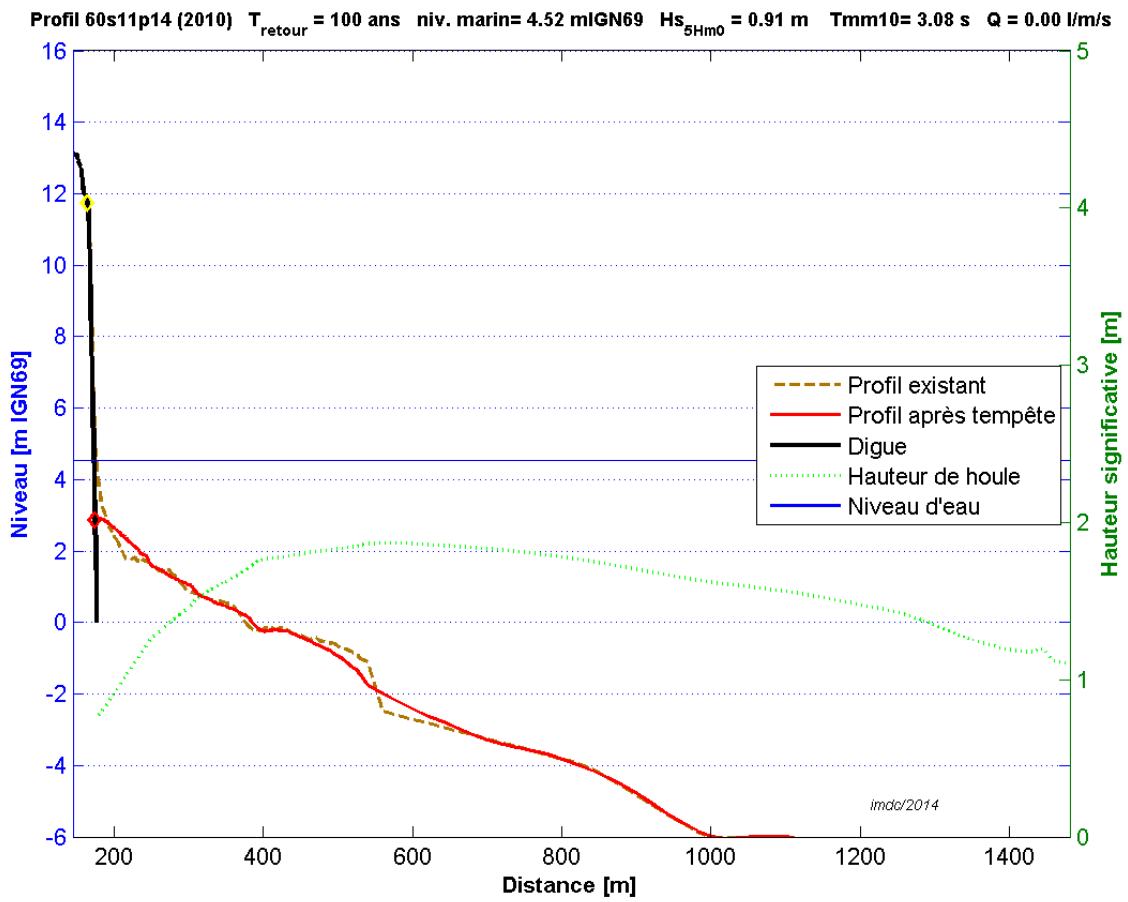


Figure V.17: Test de digue référence +20cm, profil s11p14

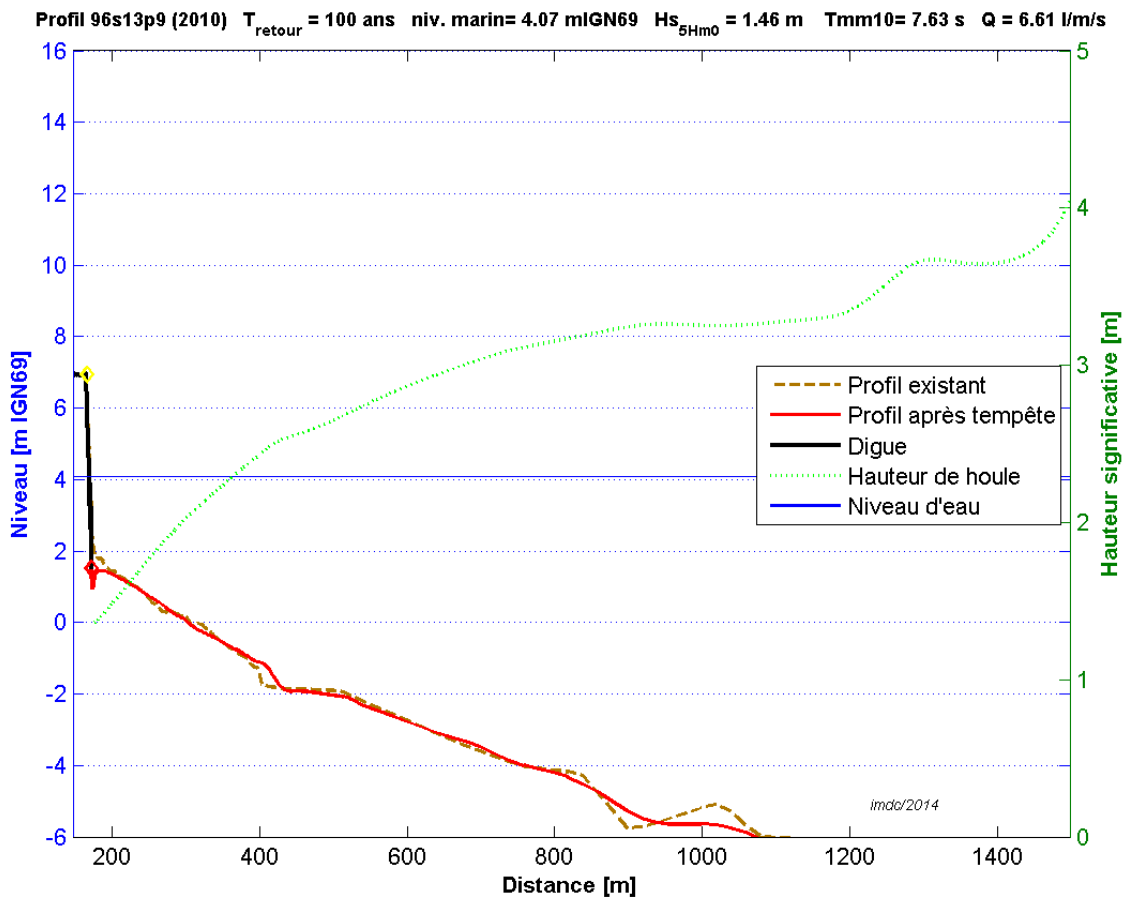


Figure V.18: Test de digue référence +20cm, profil s13p9

C.2 Scénario de référence +0,60m

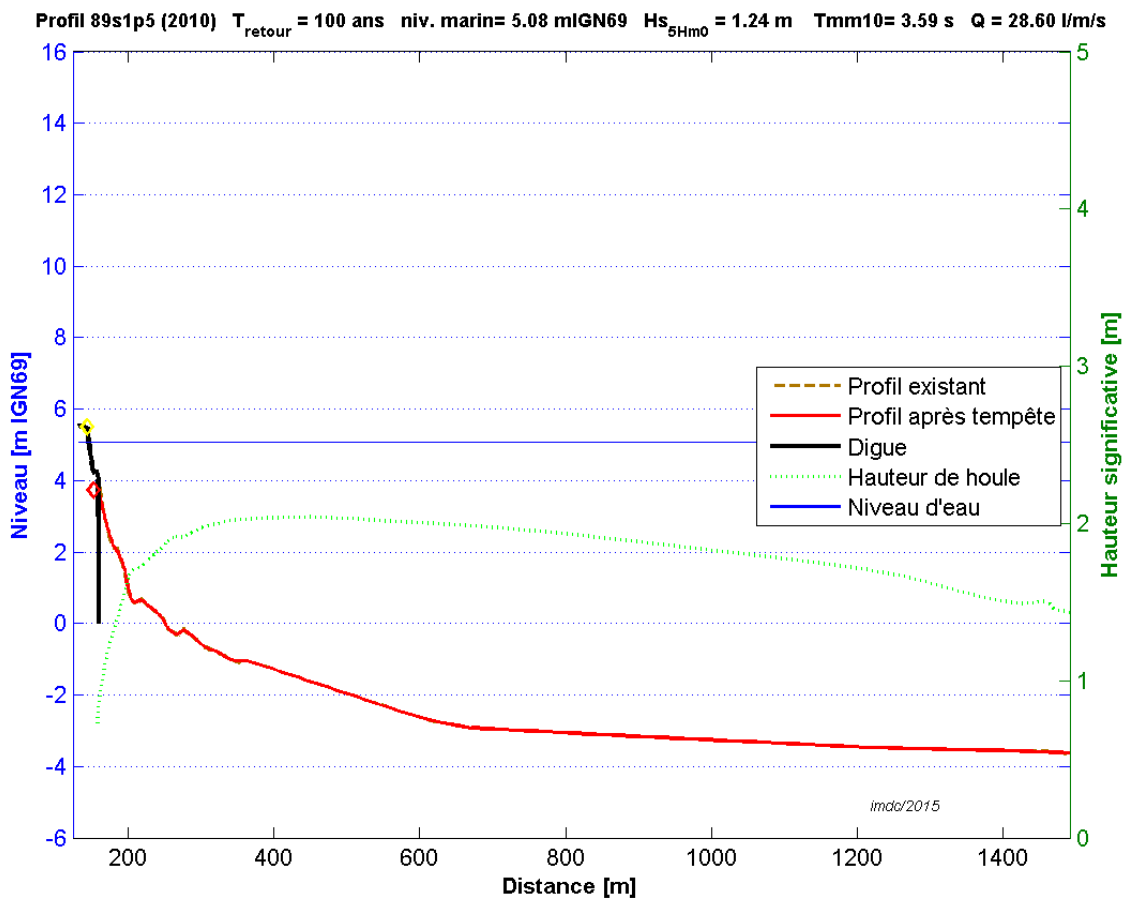


Figure V.19: Test de digue référence +60cm, profil s1p5

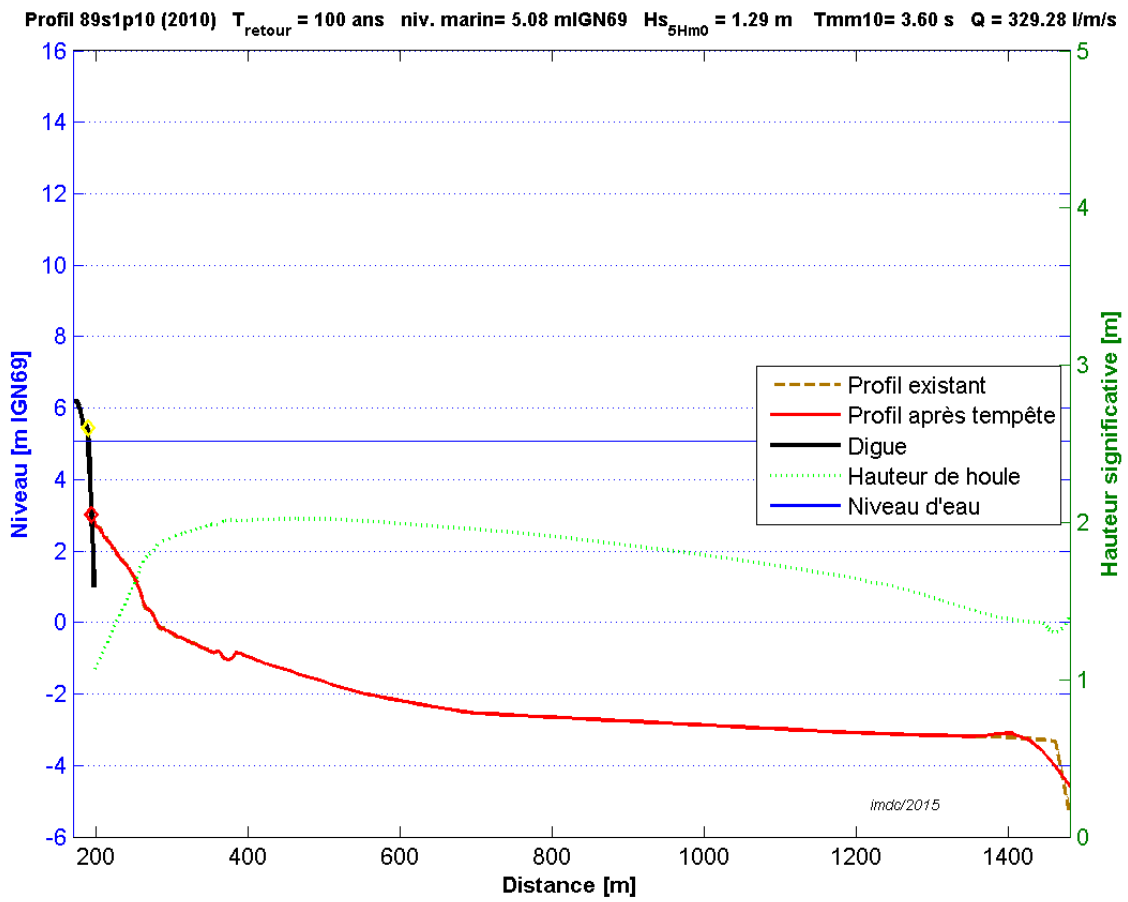


Figure V.20: Test de digue référence +60cm, profil s1p10

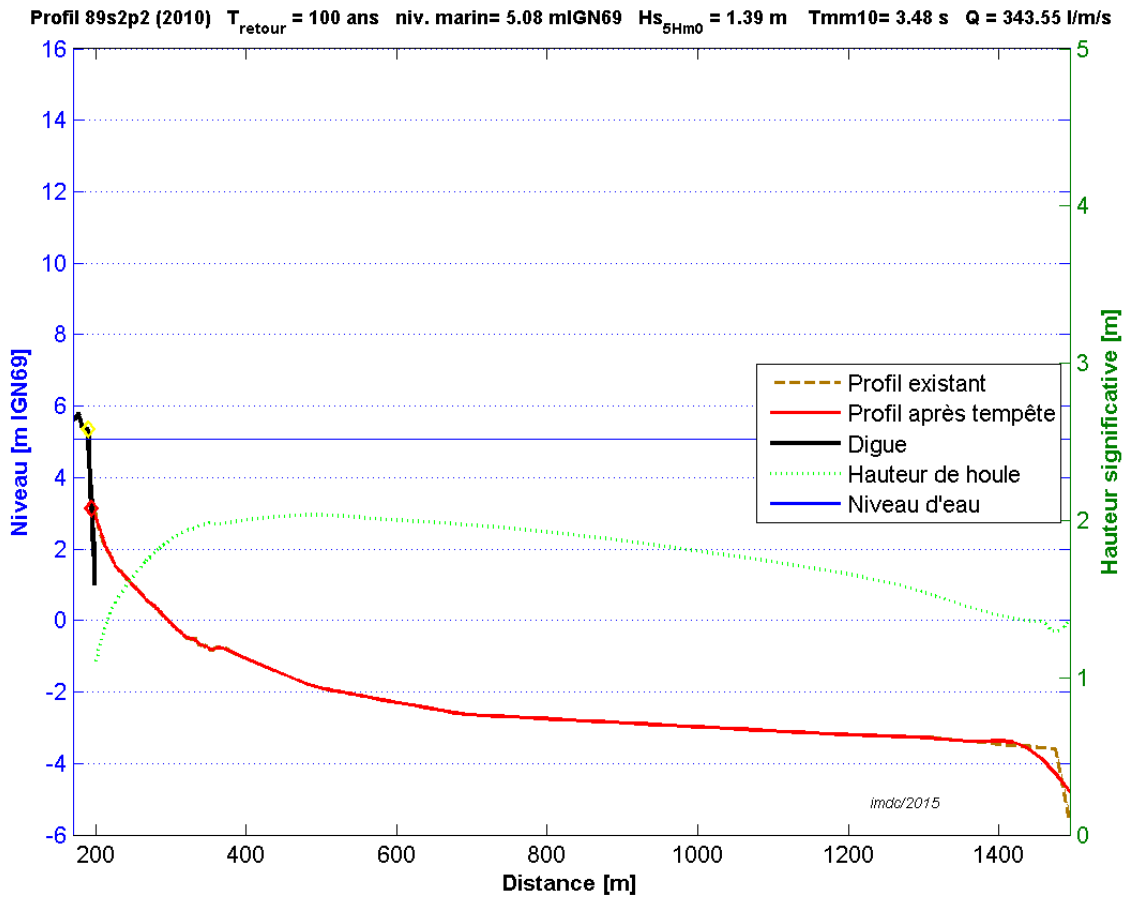


Figure V.21: Test de digue référence +60cm, profil s2p2

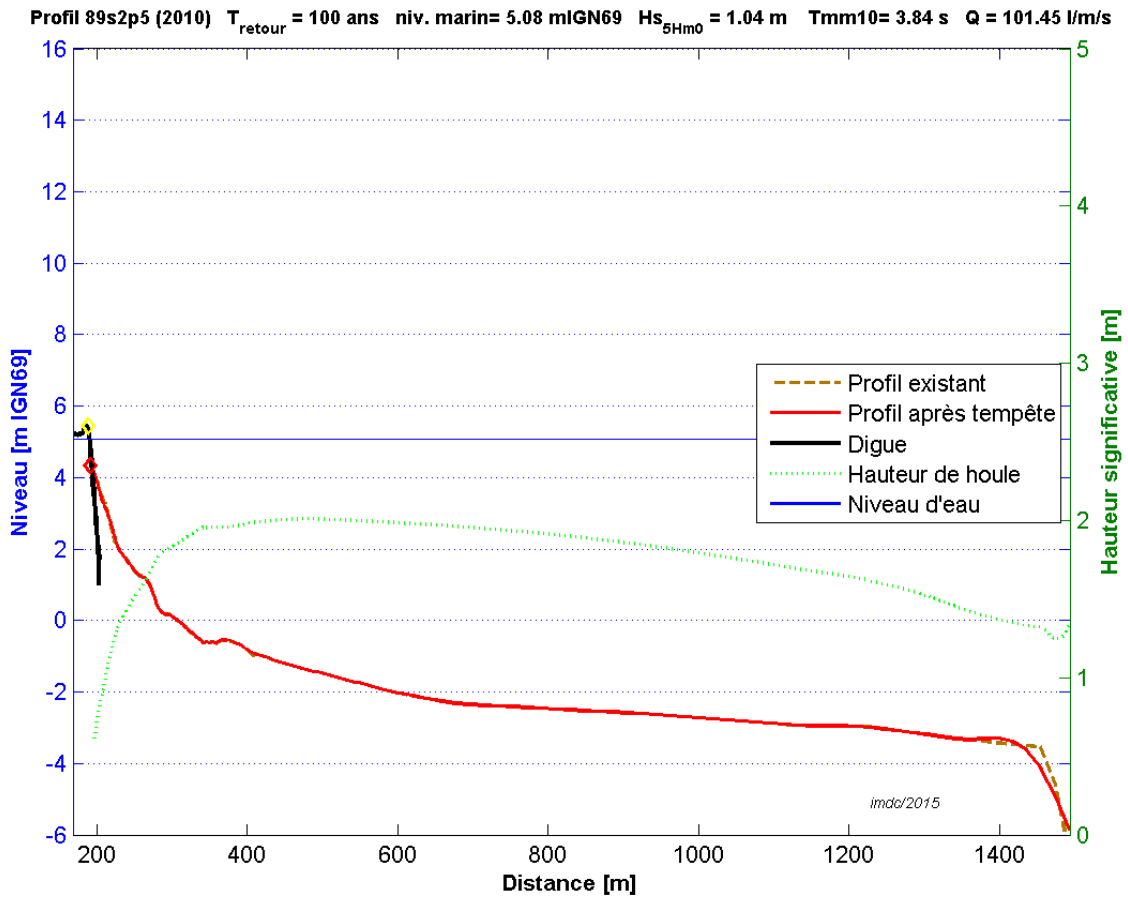


Figure V.22: Test de digue référence +60cm, profil s2p5

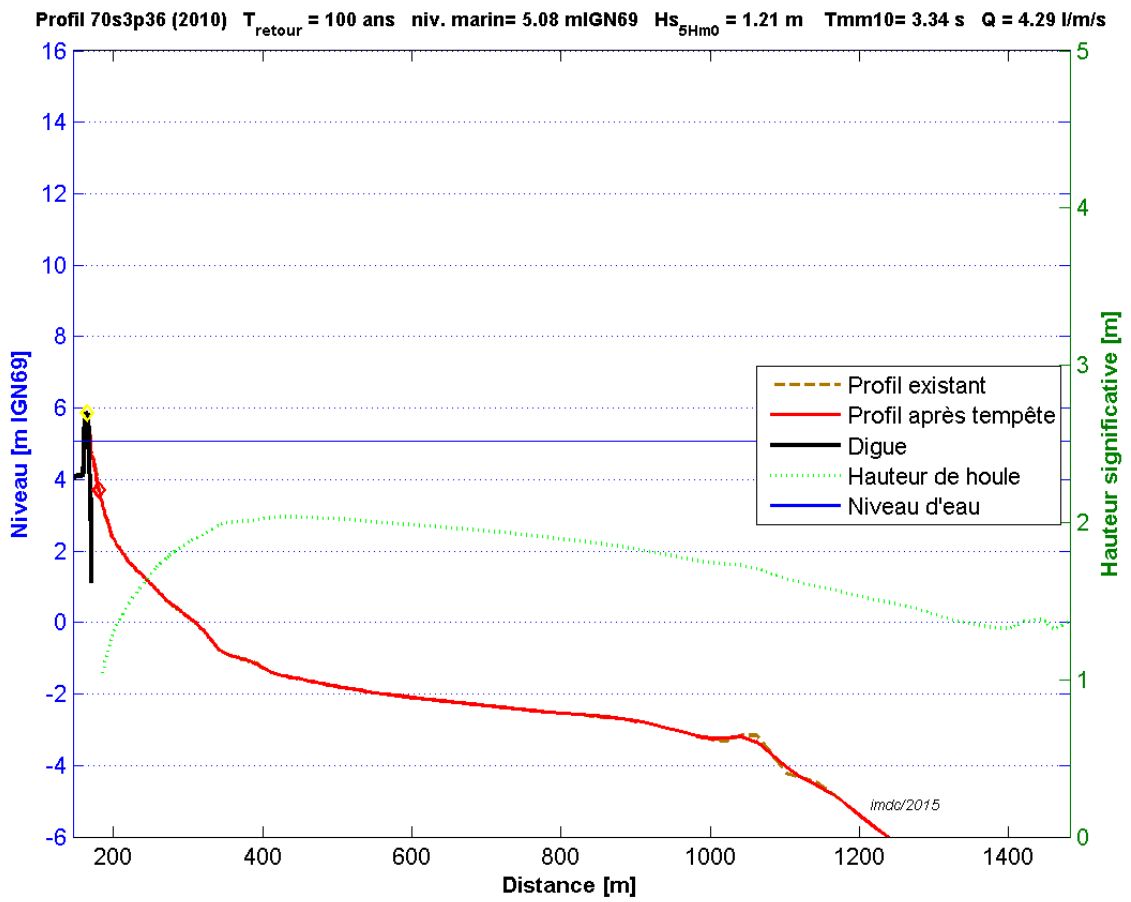


Figure V.23: Test de digue référence +60cm, profil s3p36

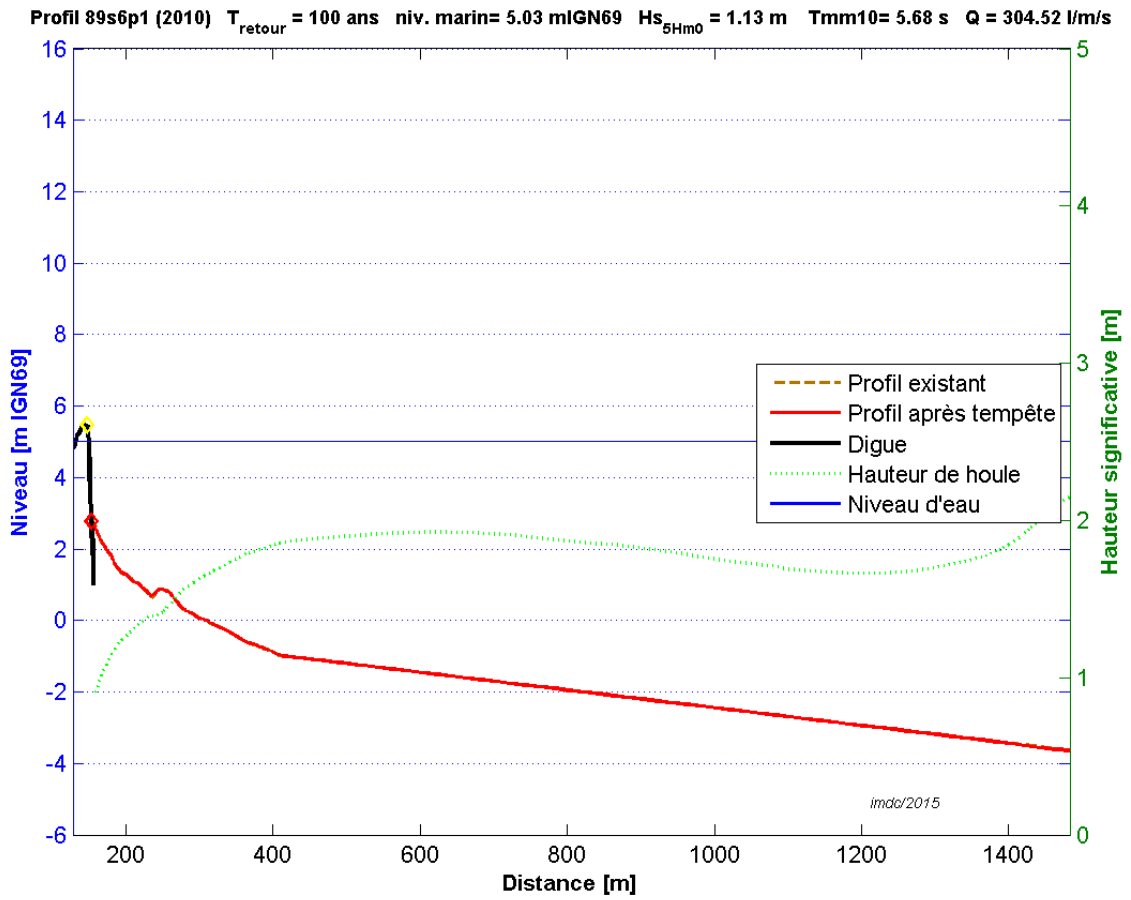


Figure V.24: Test de digue référence +60cm, profil s6p1

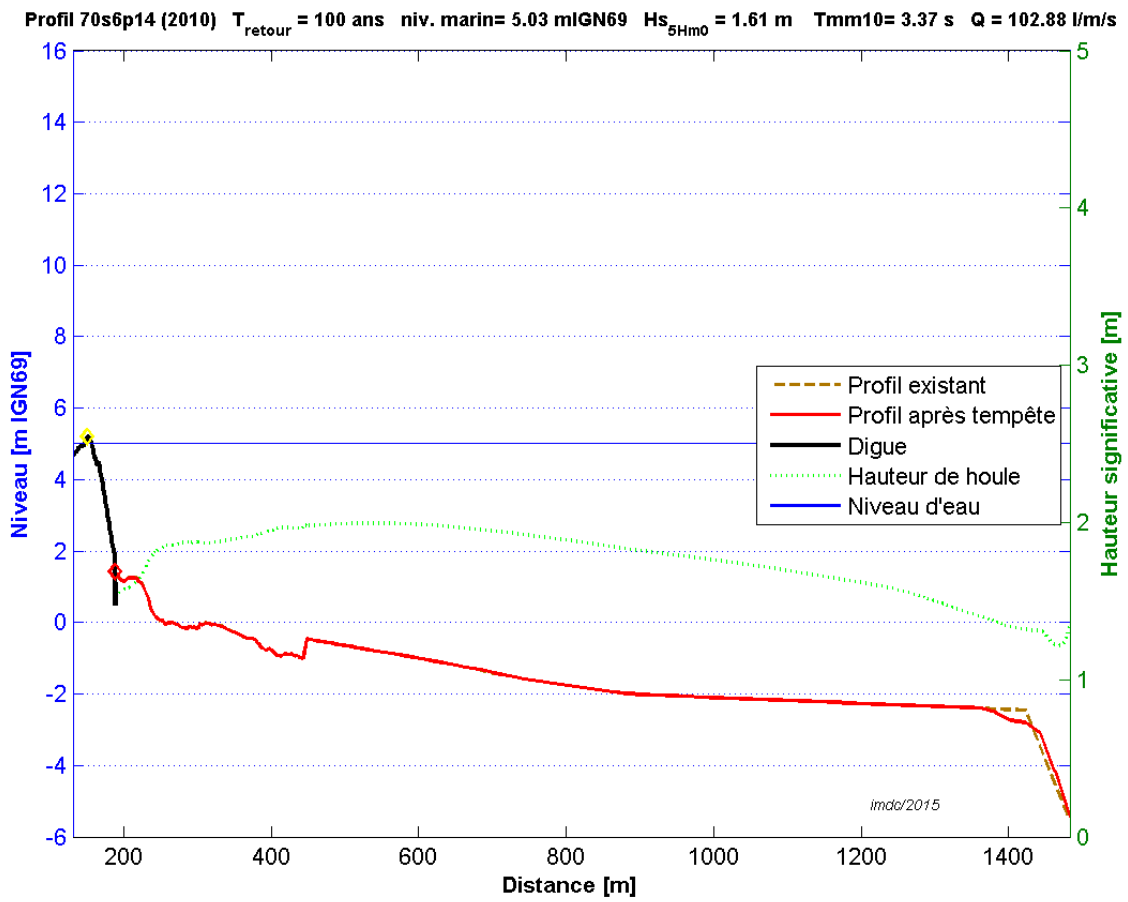


Figure V.25: Test de digue référence +60cm, profil s6p14

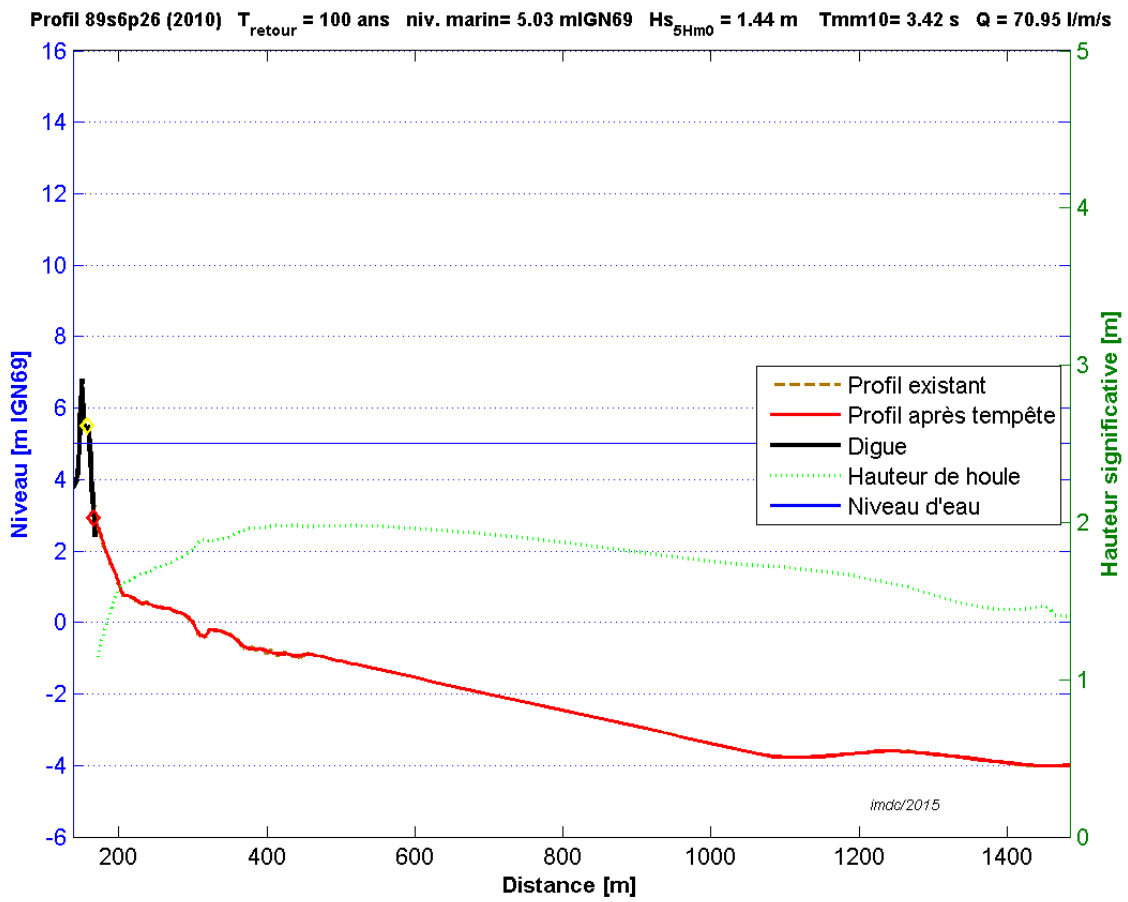


Figure V.26: Test de digue référence +60cm, profil s6p26

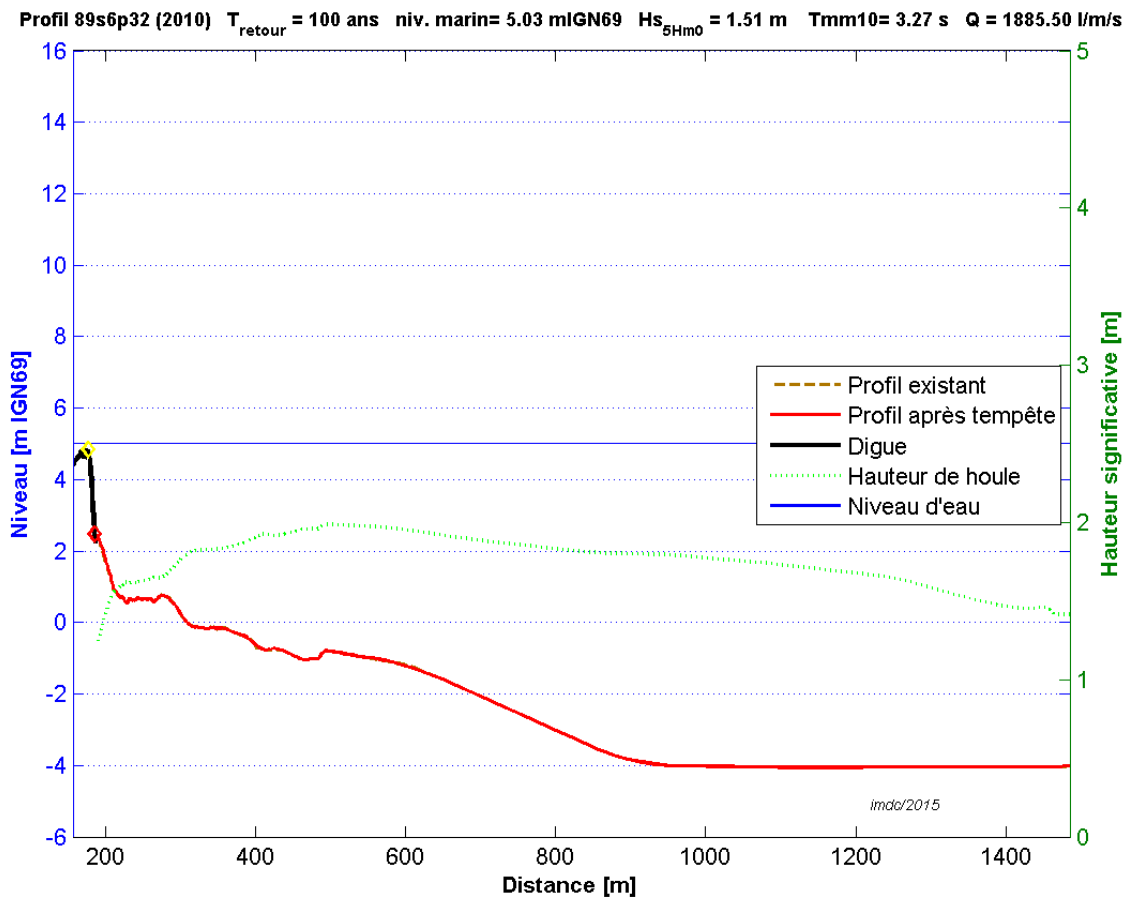


Figure V.27: Test de digue référence +60cm, profil s6p32

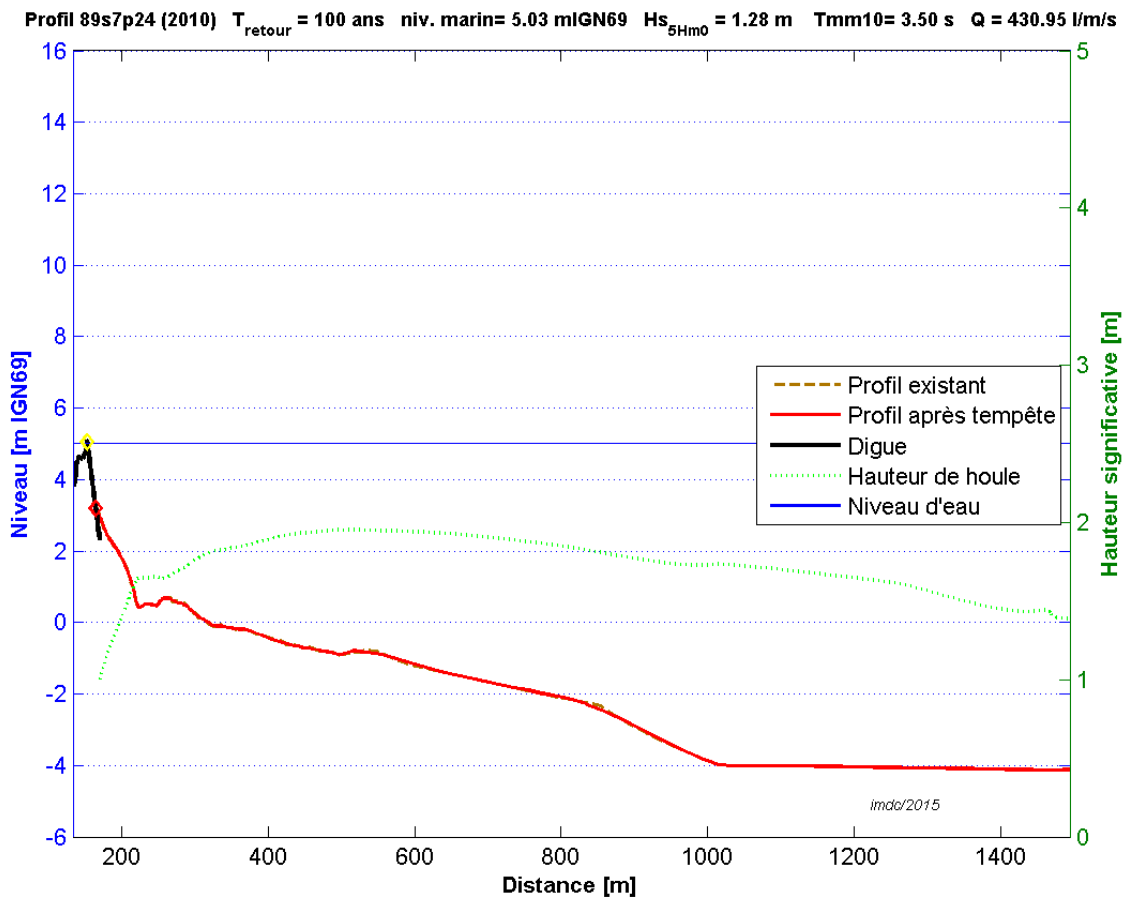


Figure V.28: Test de digue référence +60cm, profil s7p24

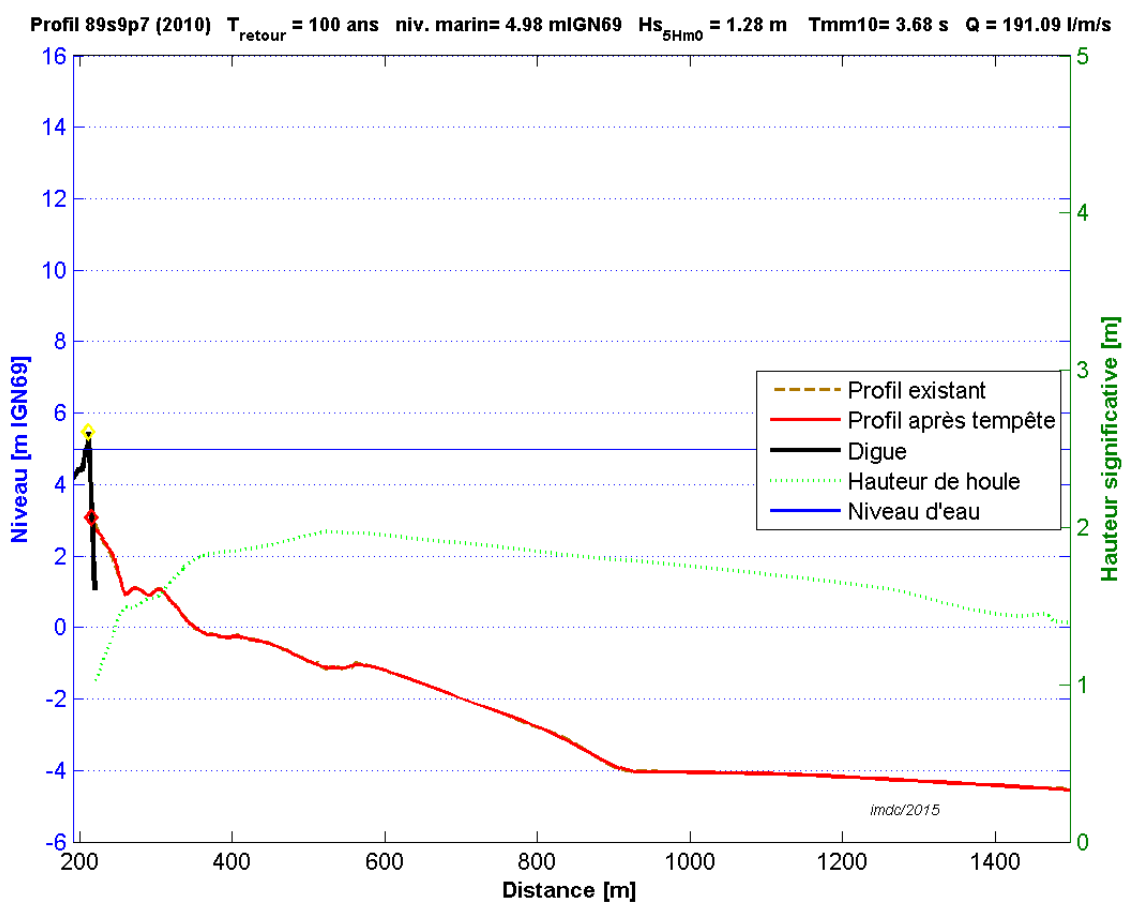


Figure V.29: Test de digue référence +60cm, profil s9p7

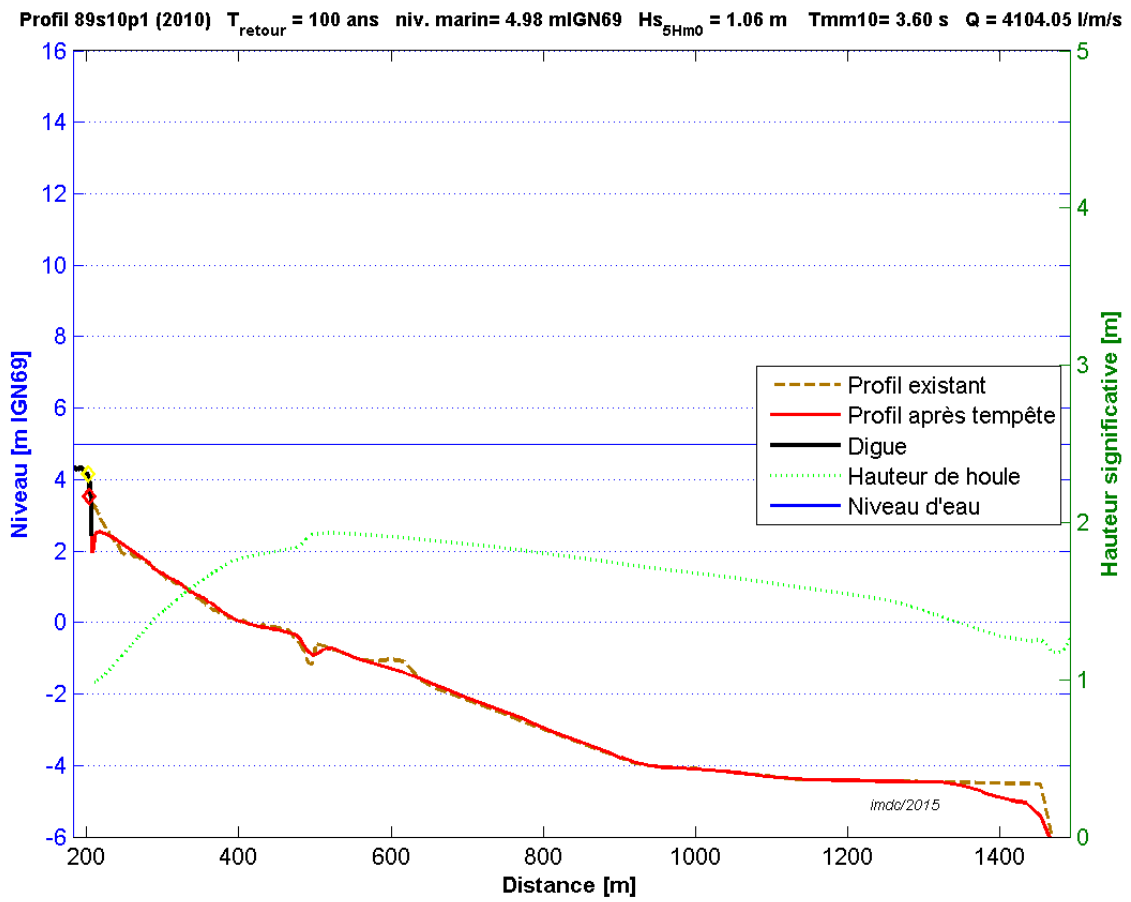


Figure V.30: Test de digue référence +60cm, profil s10p1

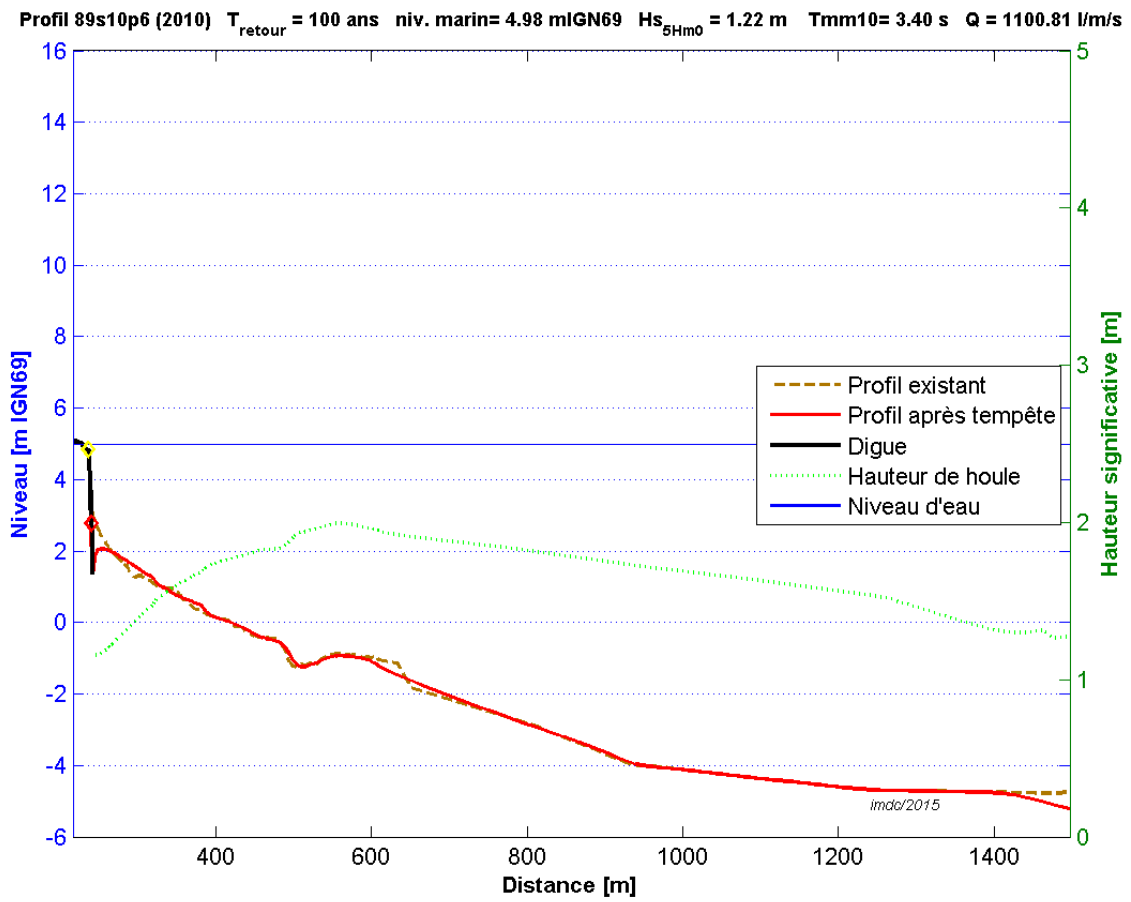


Figure V.31: Test de digue référence +60cm, profil s10p6

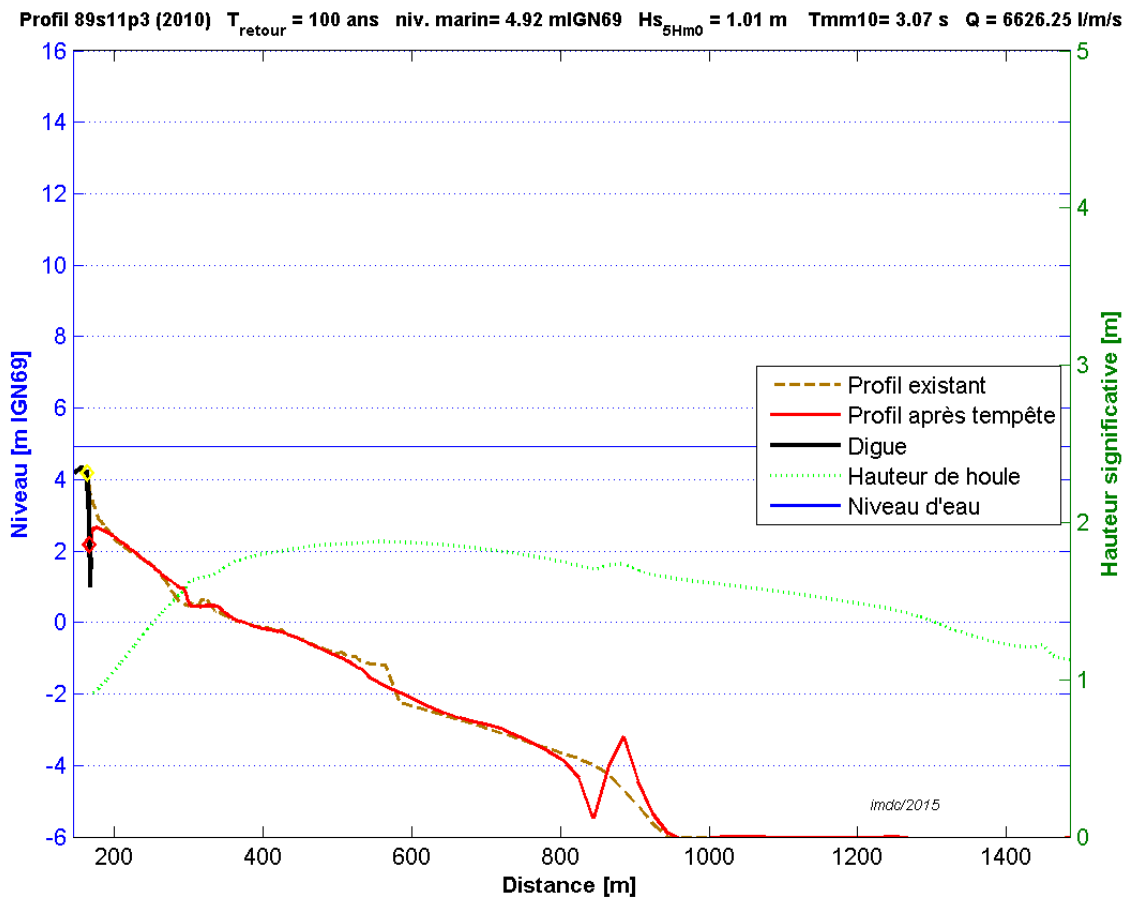


Figure V.32: Test de digue référence +60cm, profil s11p3

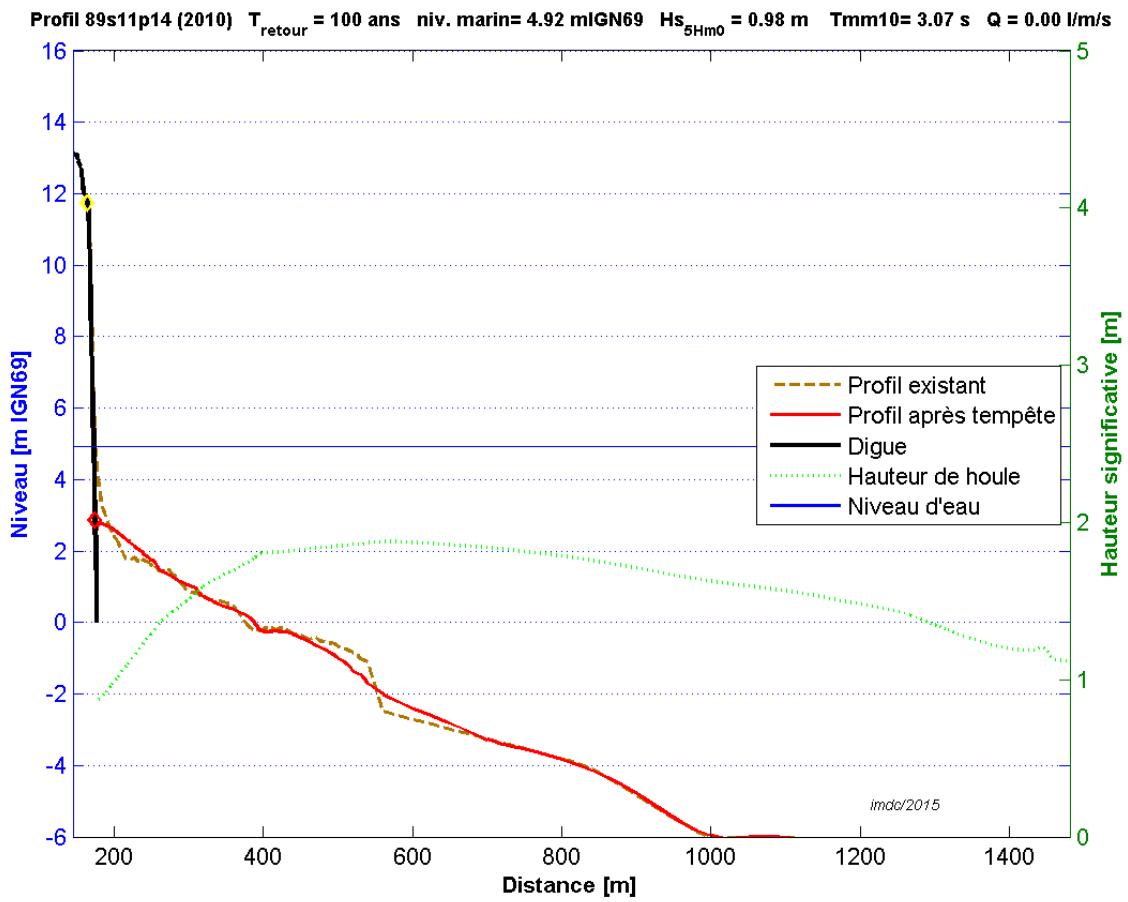


Figure V.33: Test de digue référence +60cm, profil s11p14

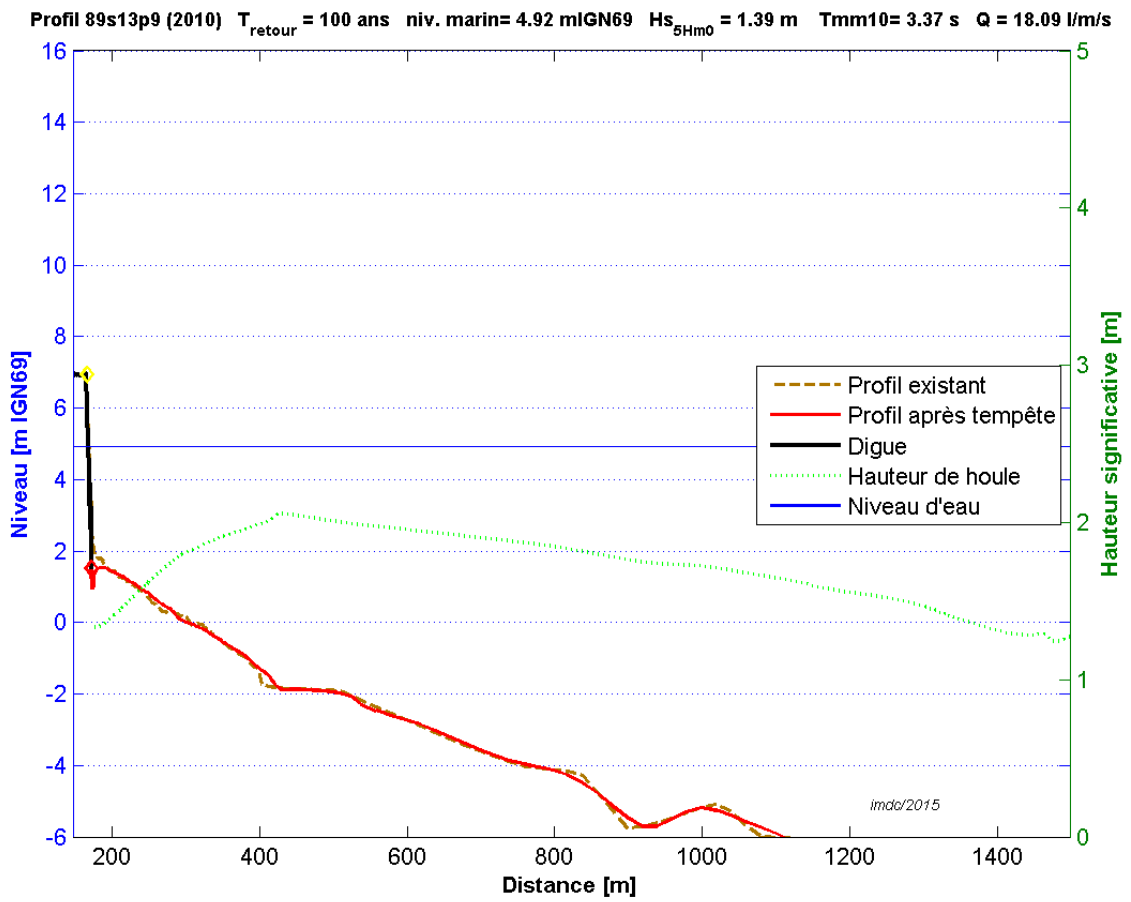


Figure V.34: Test de digue référence +60cm, profil s13p9

C.3 Scénario fréquent (T10)

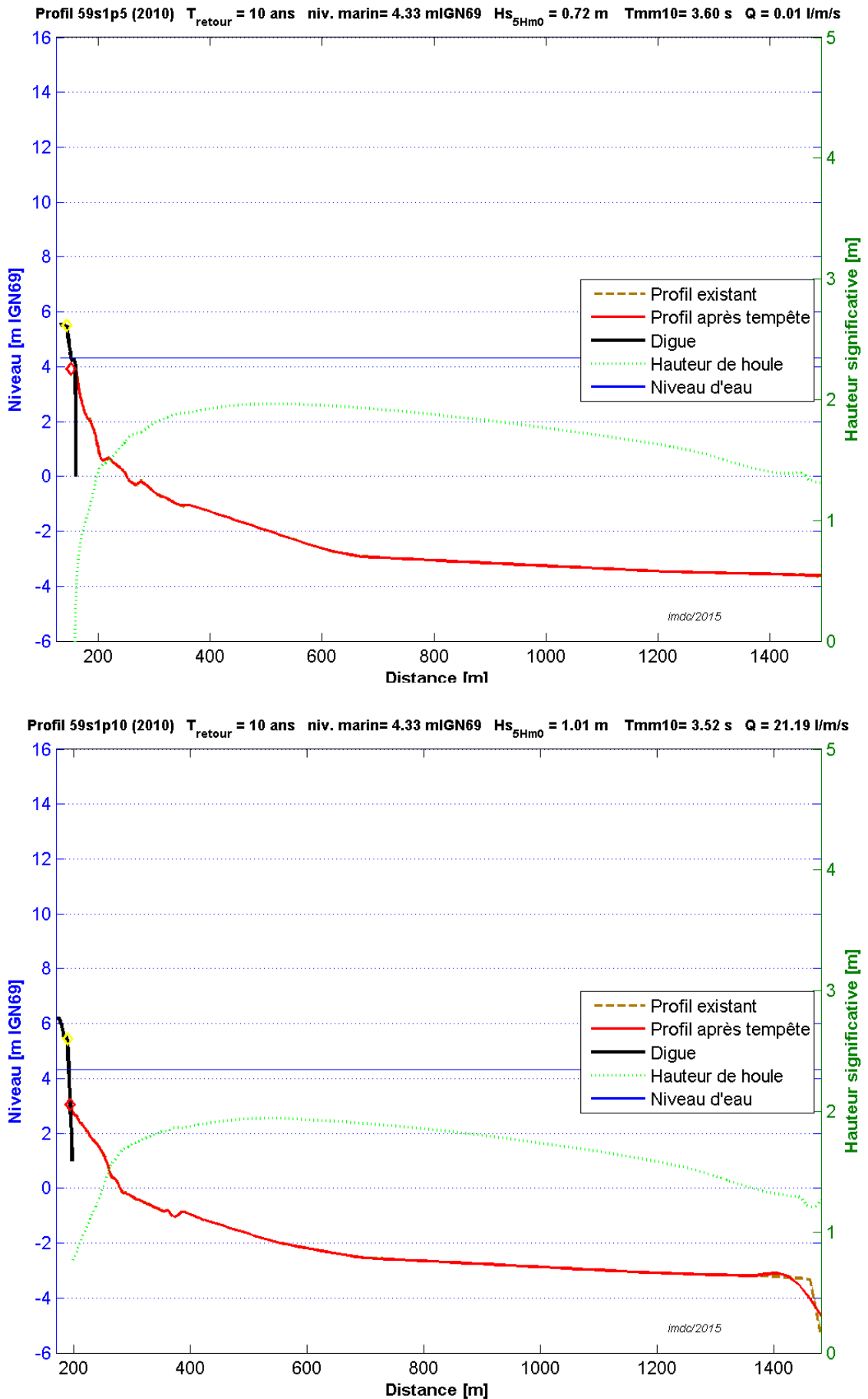


Figure V.36: Test de digue condition T10, profil s1p10

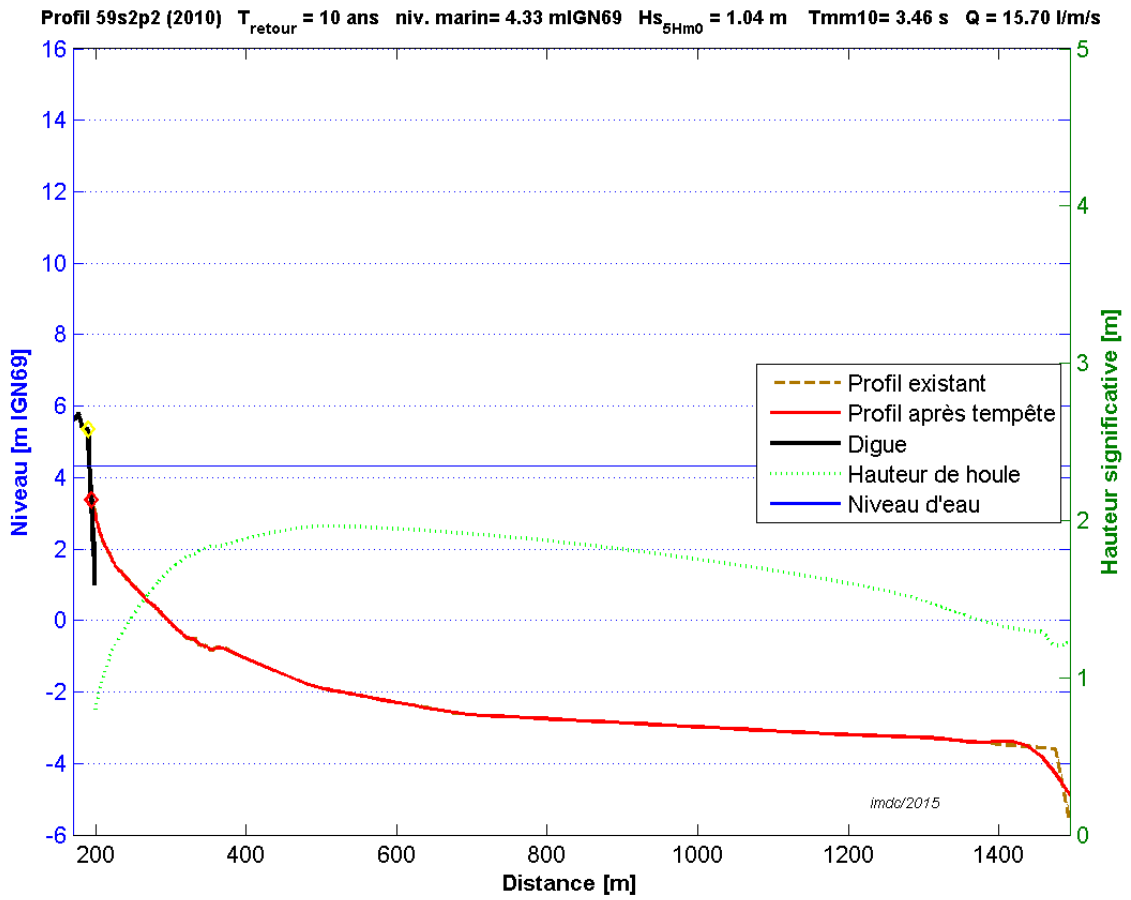


Figure V.37: Test de digue condition T10, profil s2p2

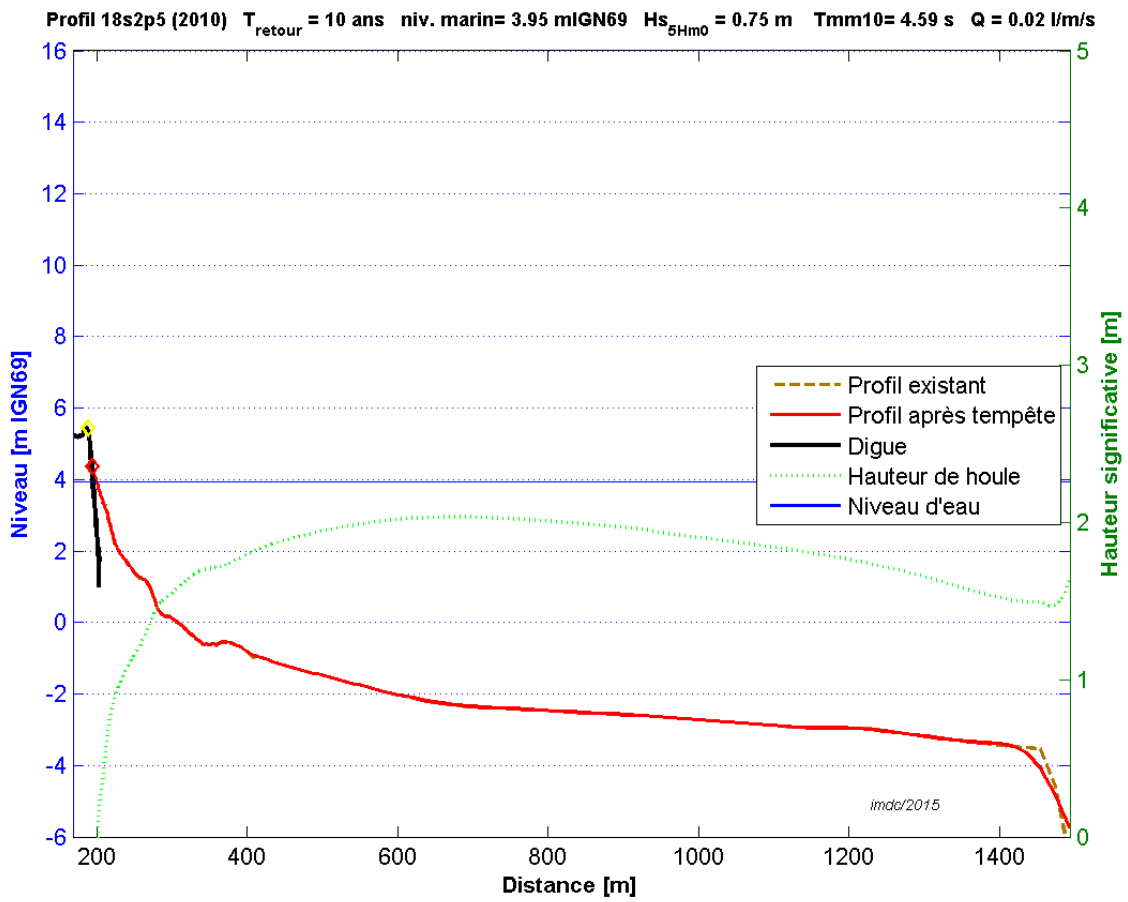


Figure V.38: Test de digue condition T10, profil s2p5

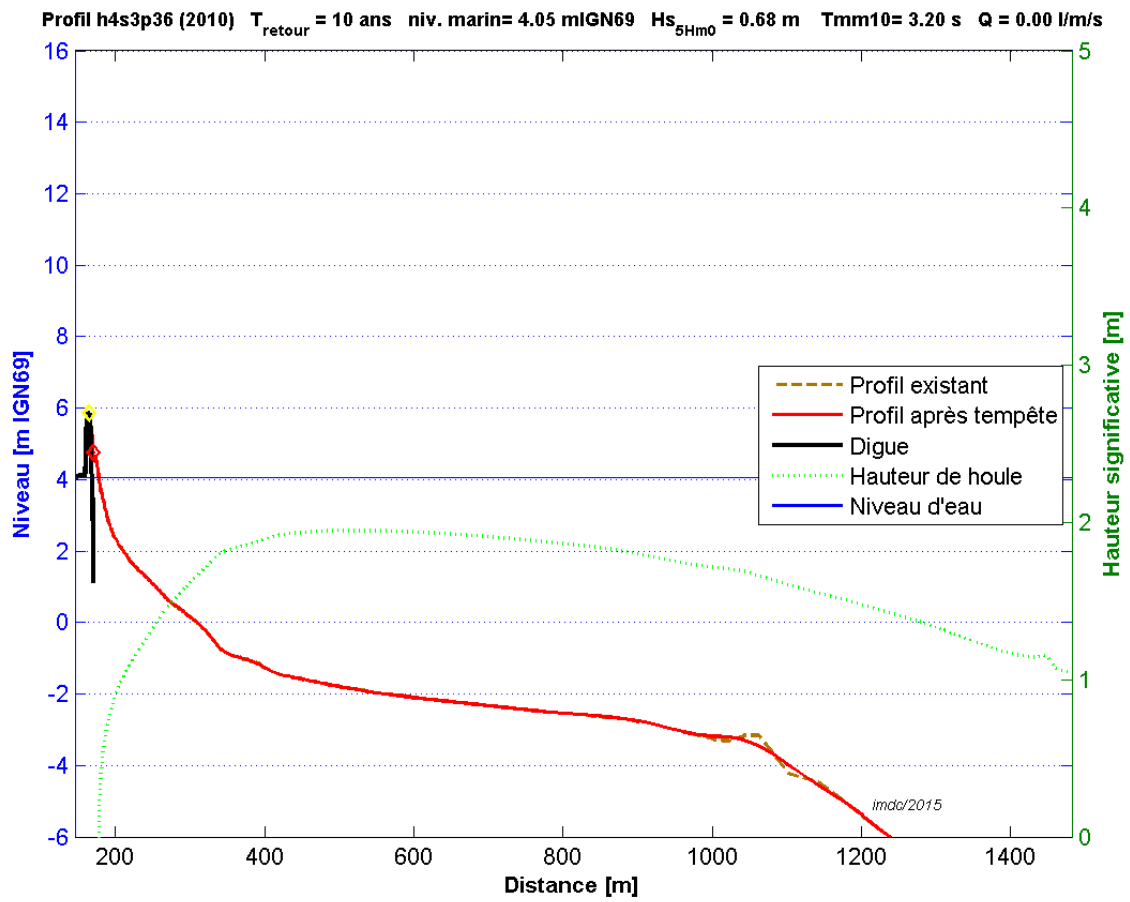


Figure V.39: Test de digue condition T10, profil s3p36

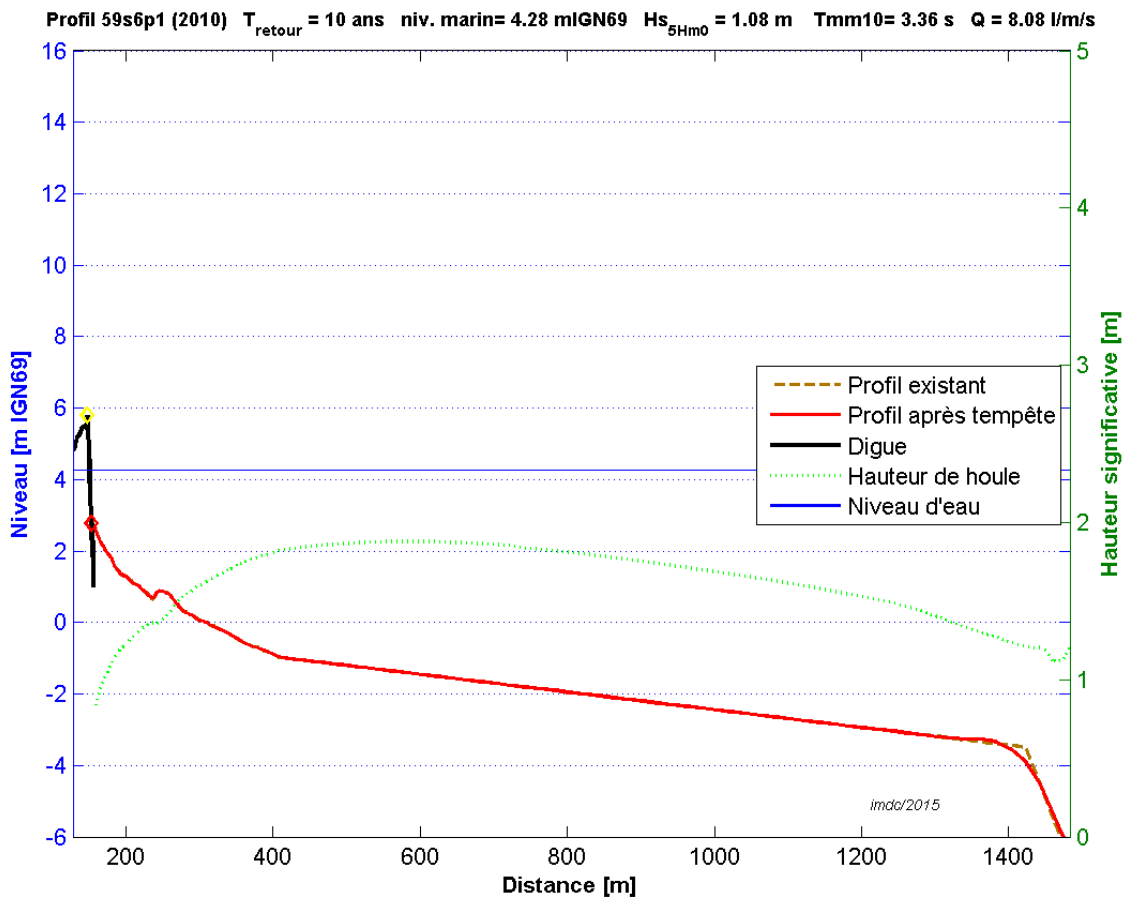


Figure V.40: Test de digue condition T10, profil s6p1

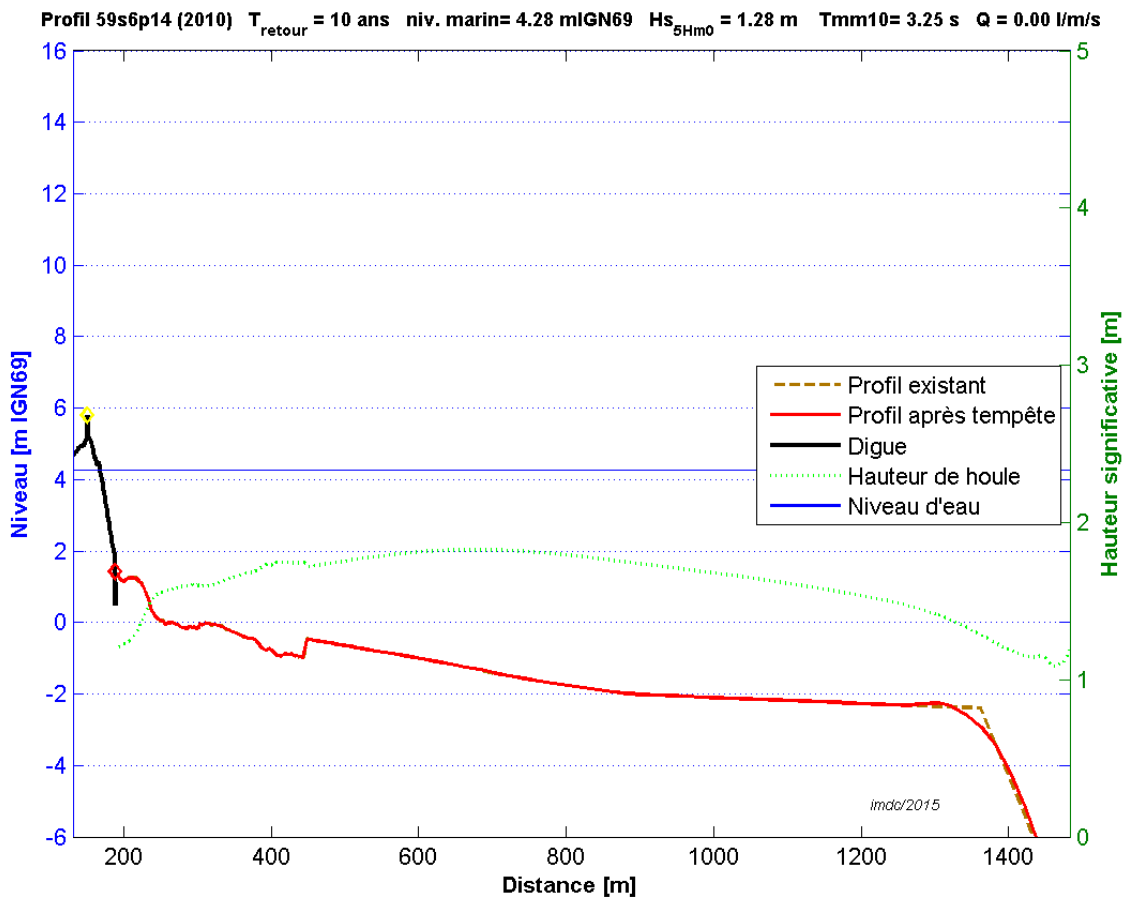


Figure V.41: Test de digue condition T10, profil s6p14

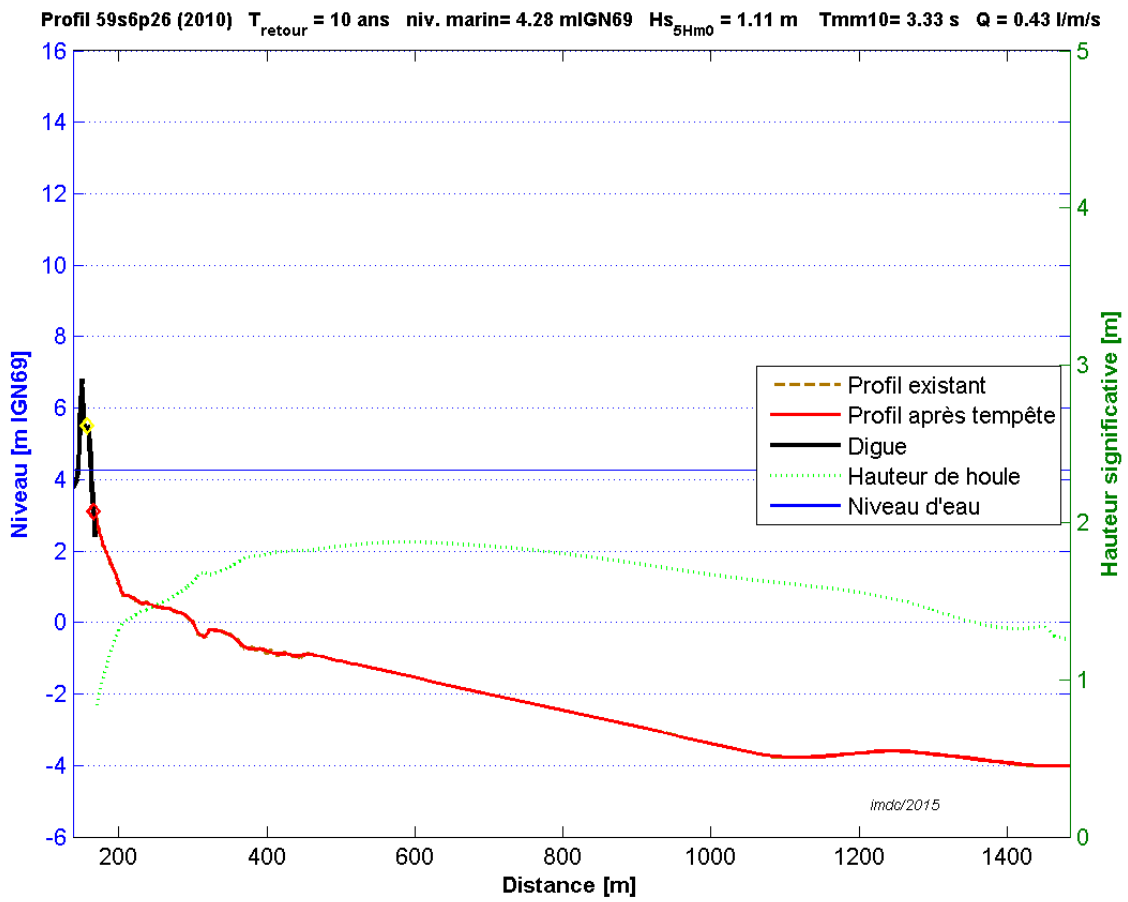


Figure V.42: Test de digue condition T10, profil s6p26

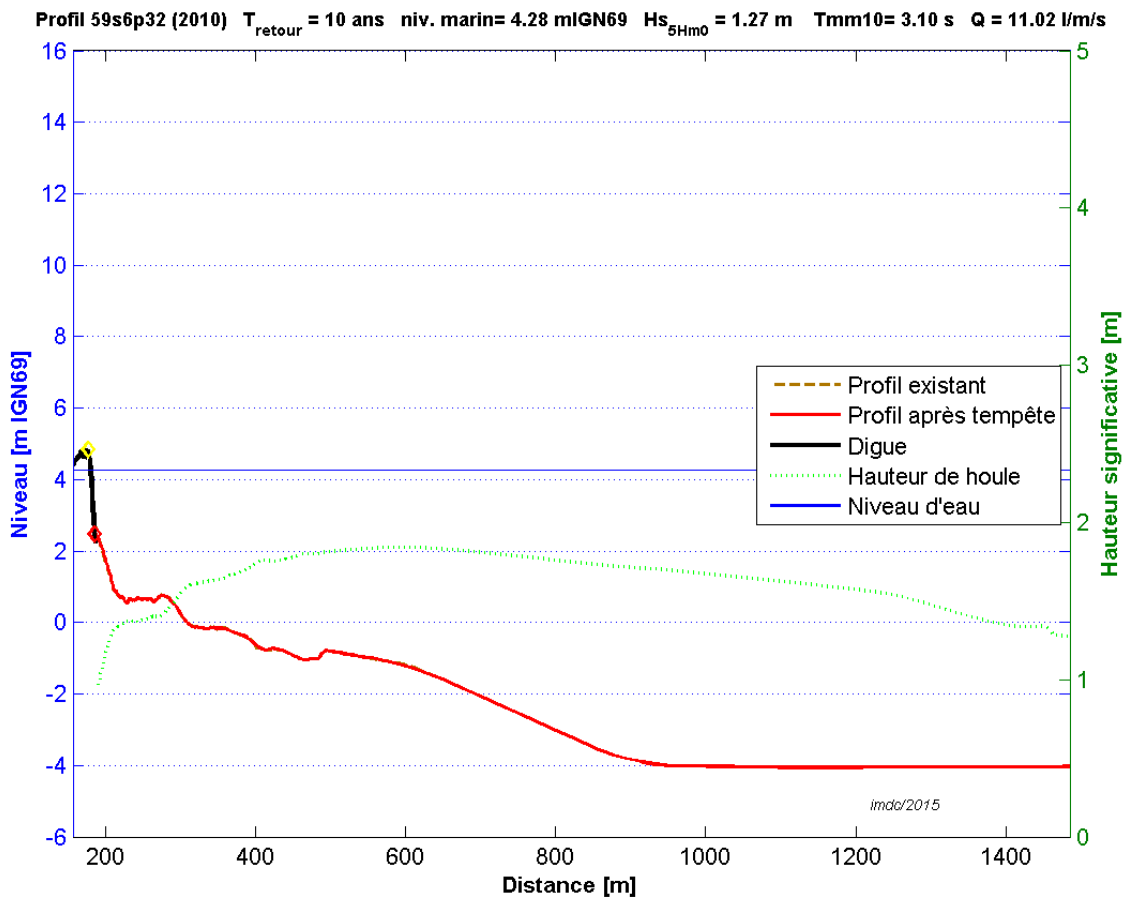


Figure V.43: Test de digue condition T10, profil s6p32

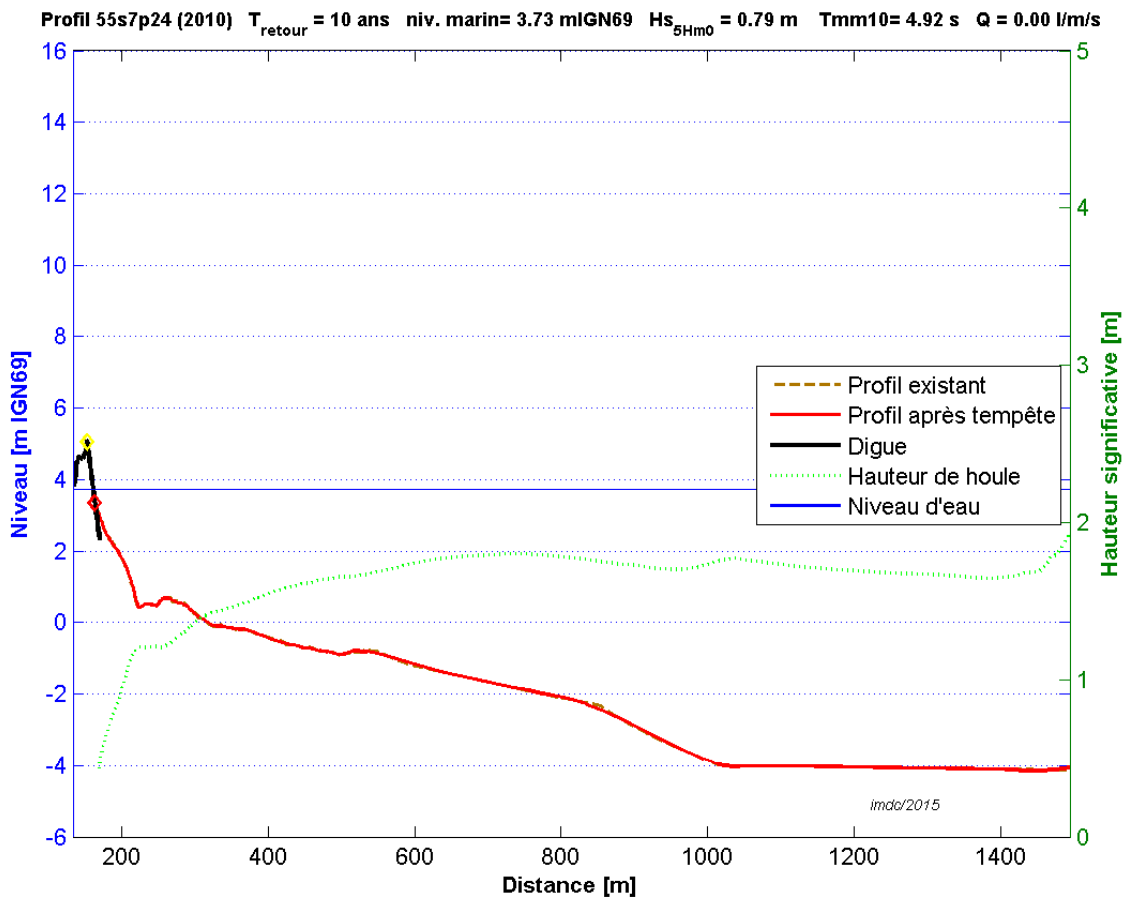


Figure V.44: Test de digue condition T10, profil s7p24

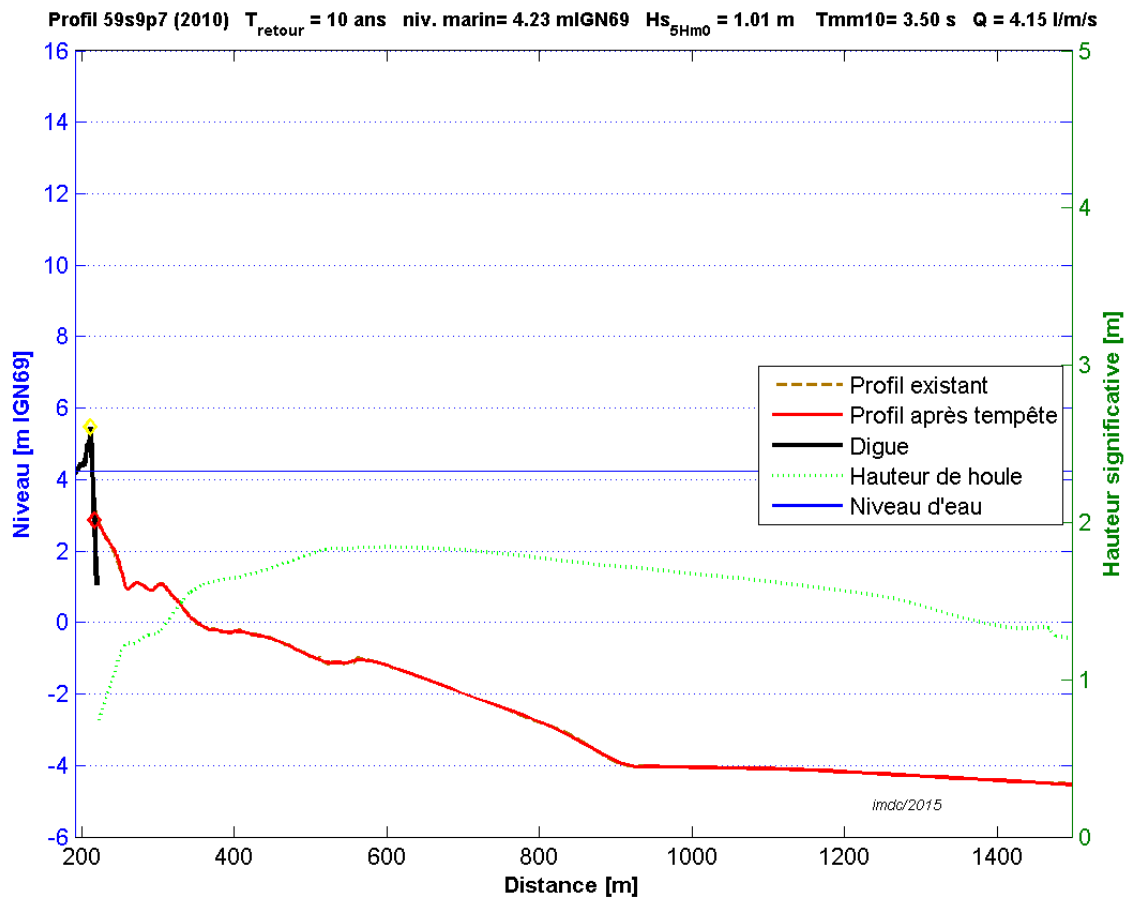


Figure V.45: Test de digue condition T10, profil s9p7

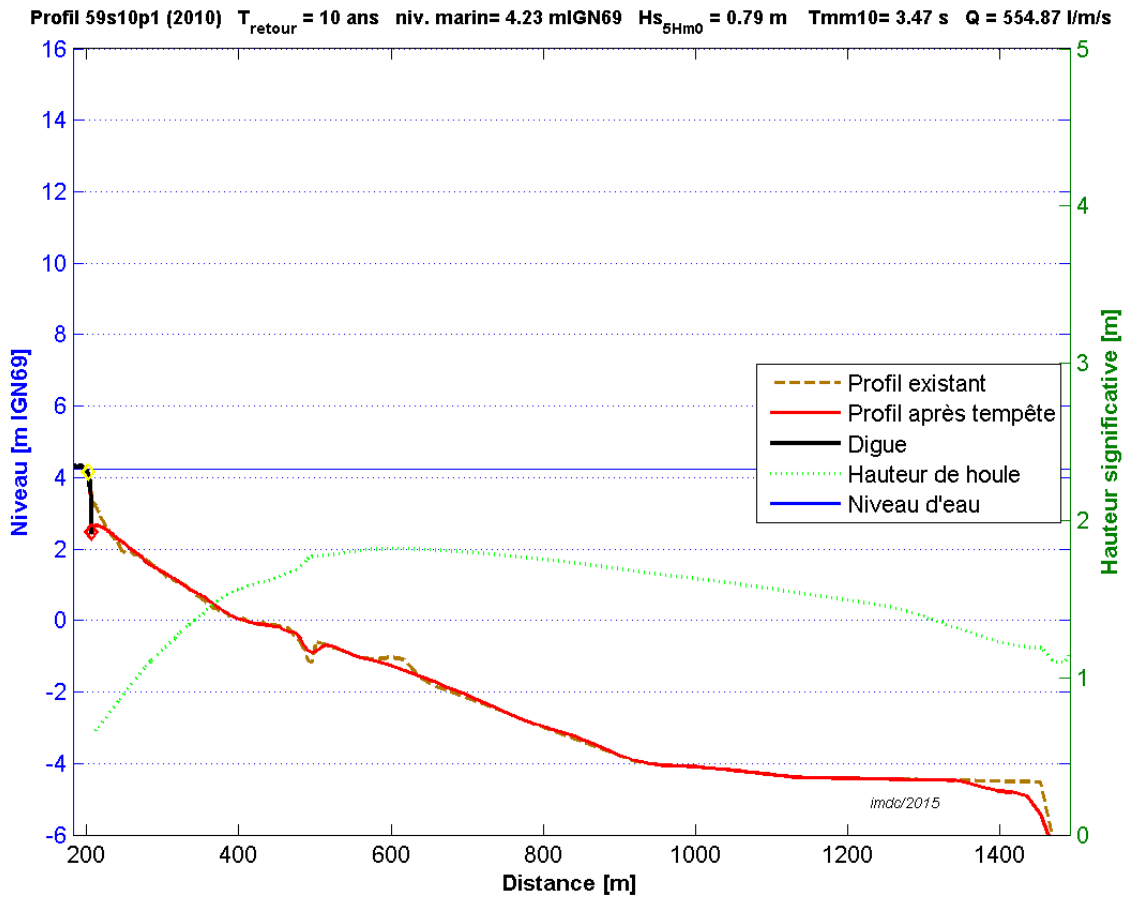


Figure V.46: Test de digue condition T10, profil s10p1

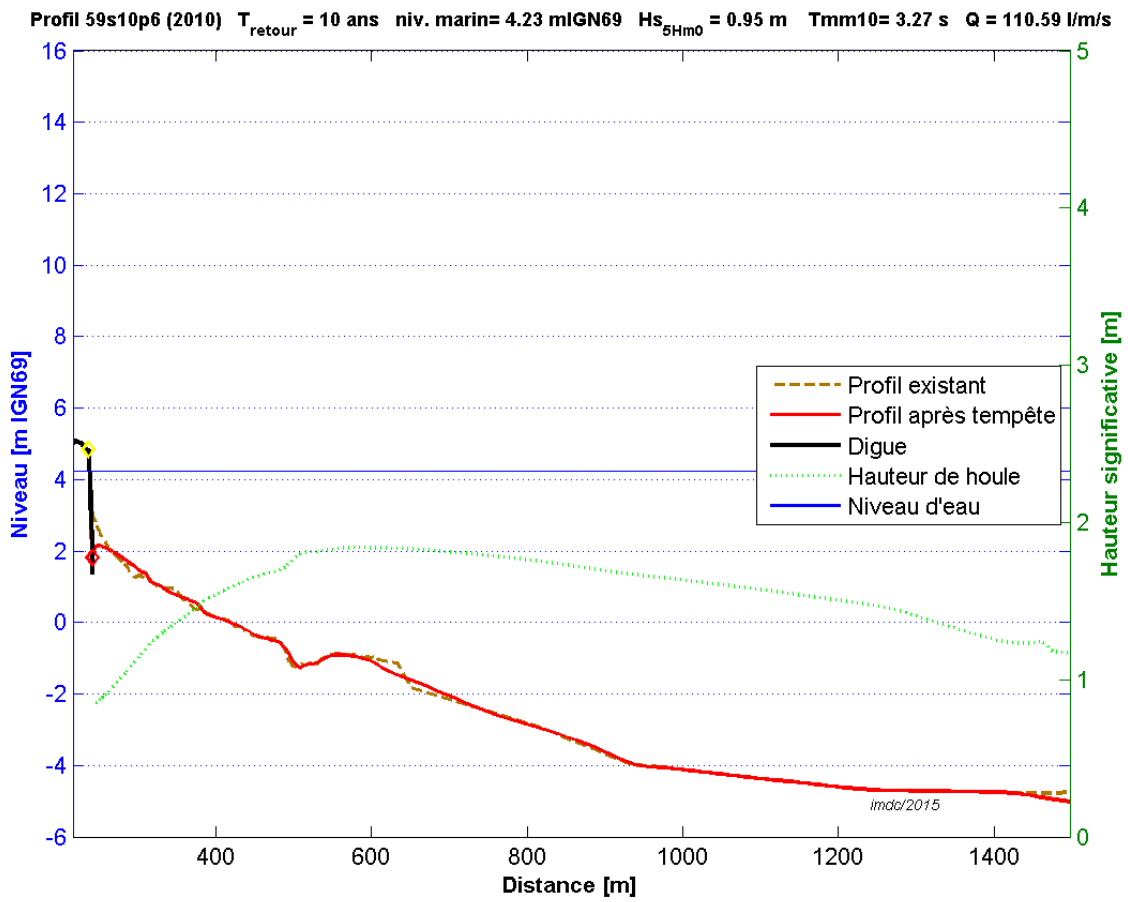


Figure V.47: Test de digue condition T10, profil s10p6

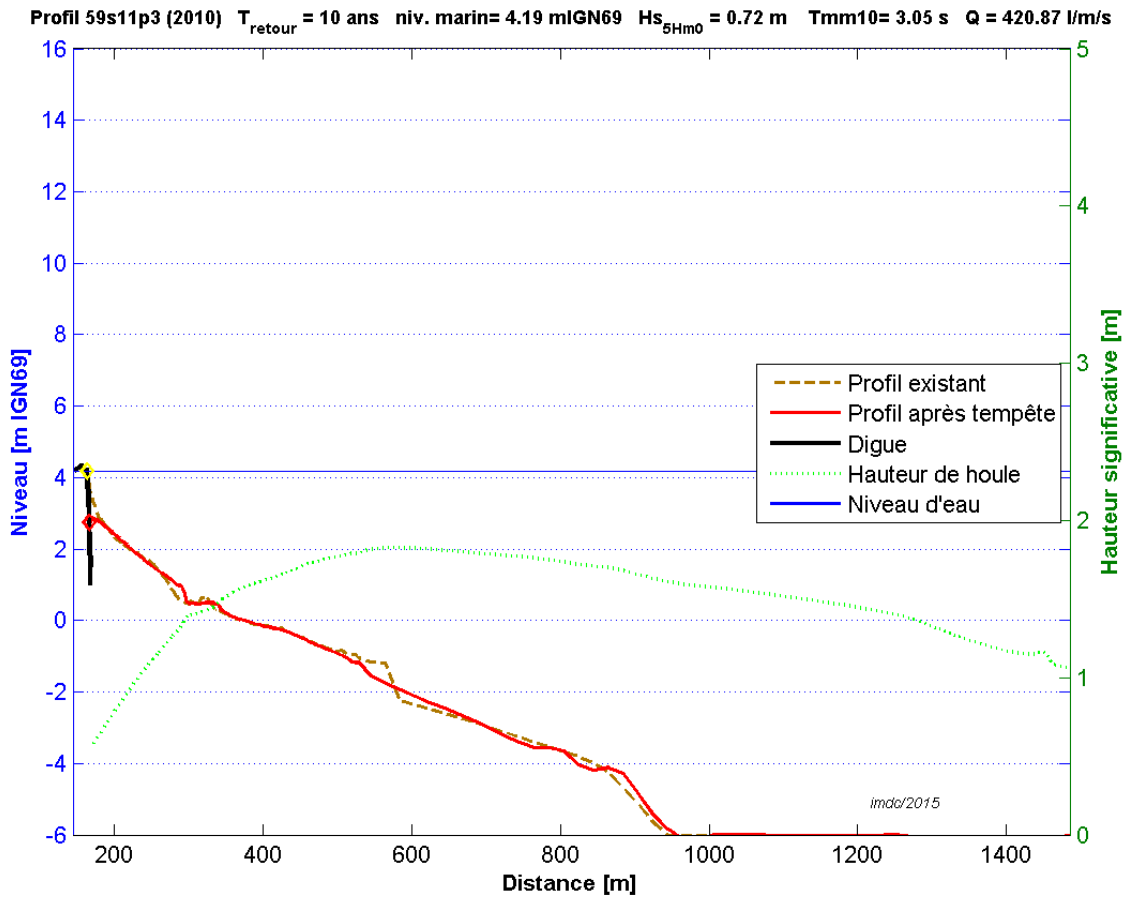


Figure V.48: Test de digue condition T10, profil s11p3

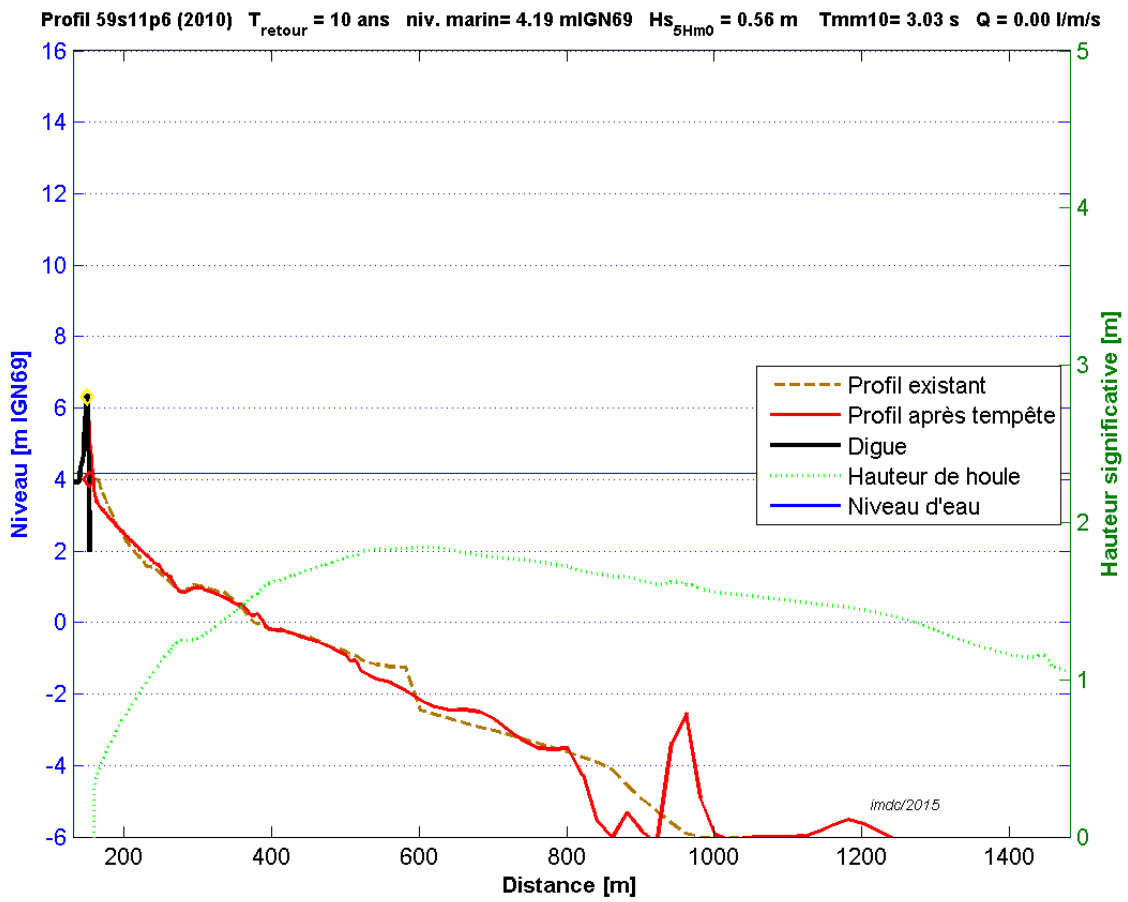


Figure V.49: Test de digue condition T10, profil s11p6

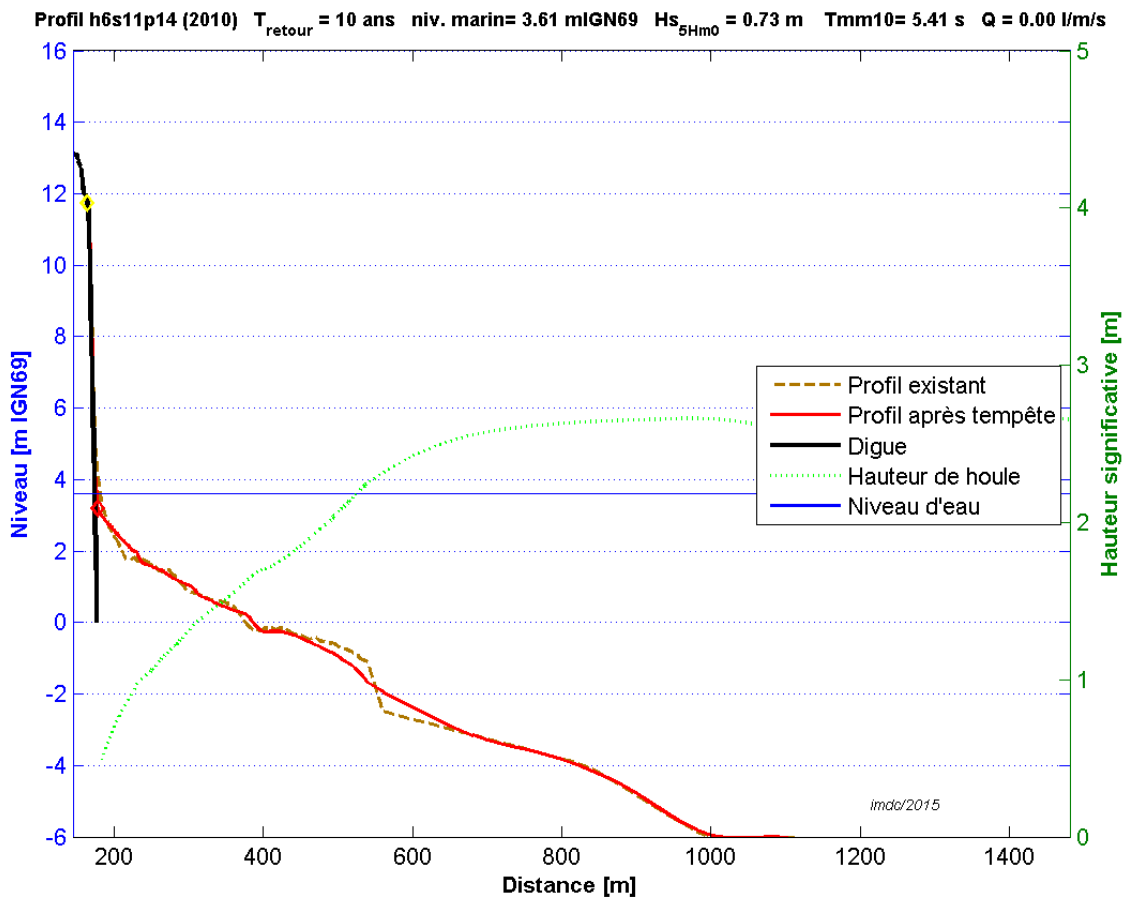


Figure V.50: Test de digue condition T10, profil s11p14

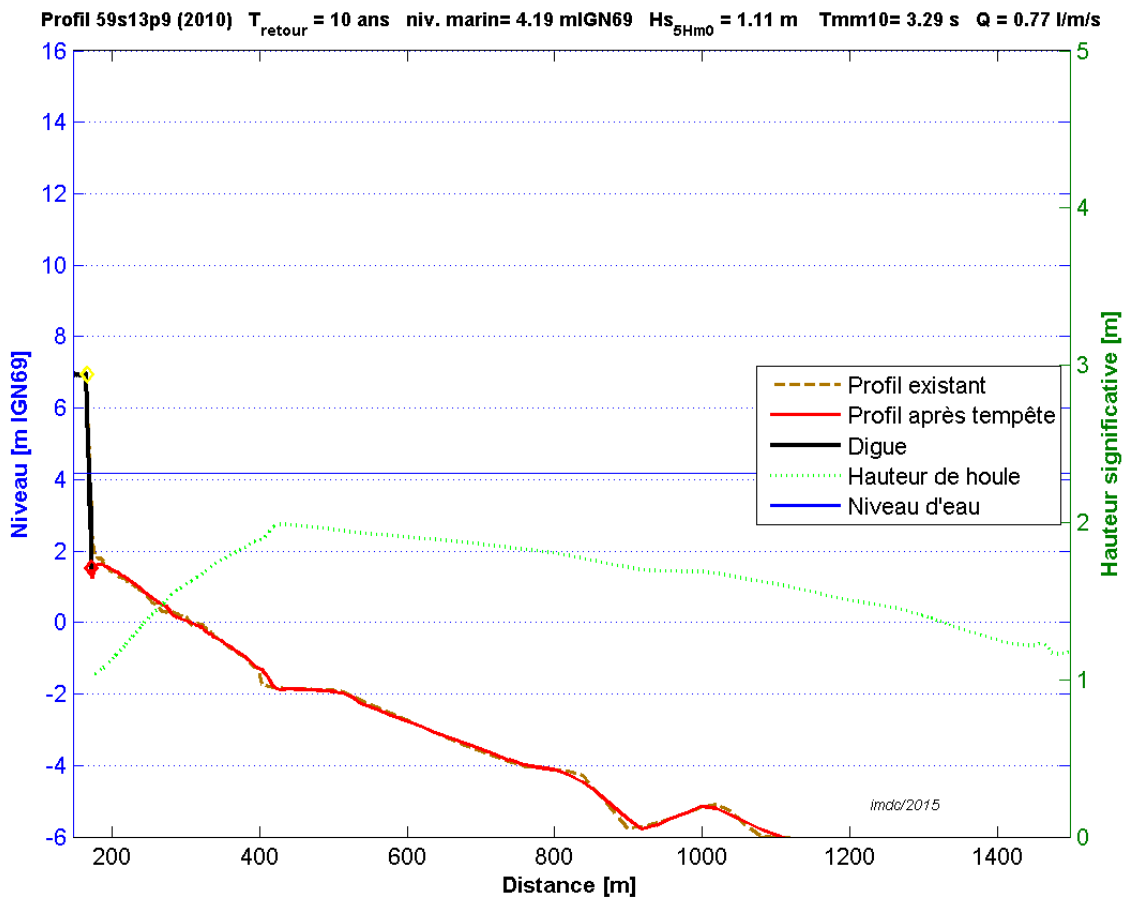


Figure V.51: Test de digue condition T10, profil s13p9

C.4 Scénario extrême (T1000)

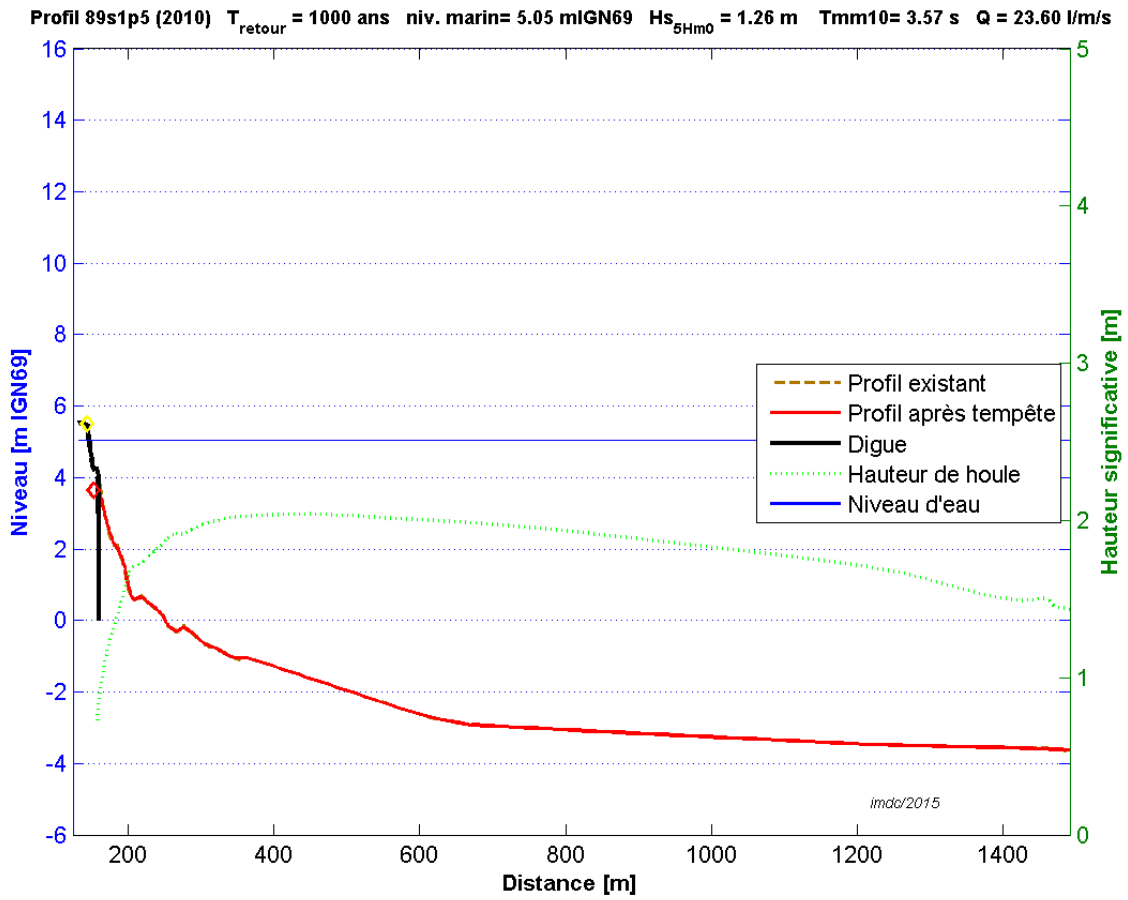


Figure V.52: Test de digue condition T1000, profil s1p5

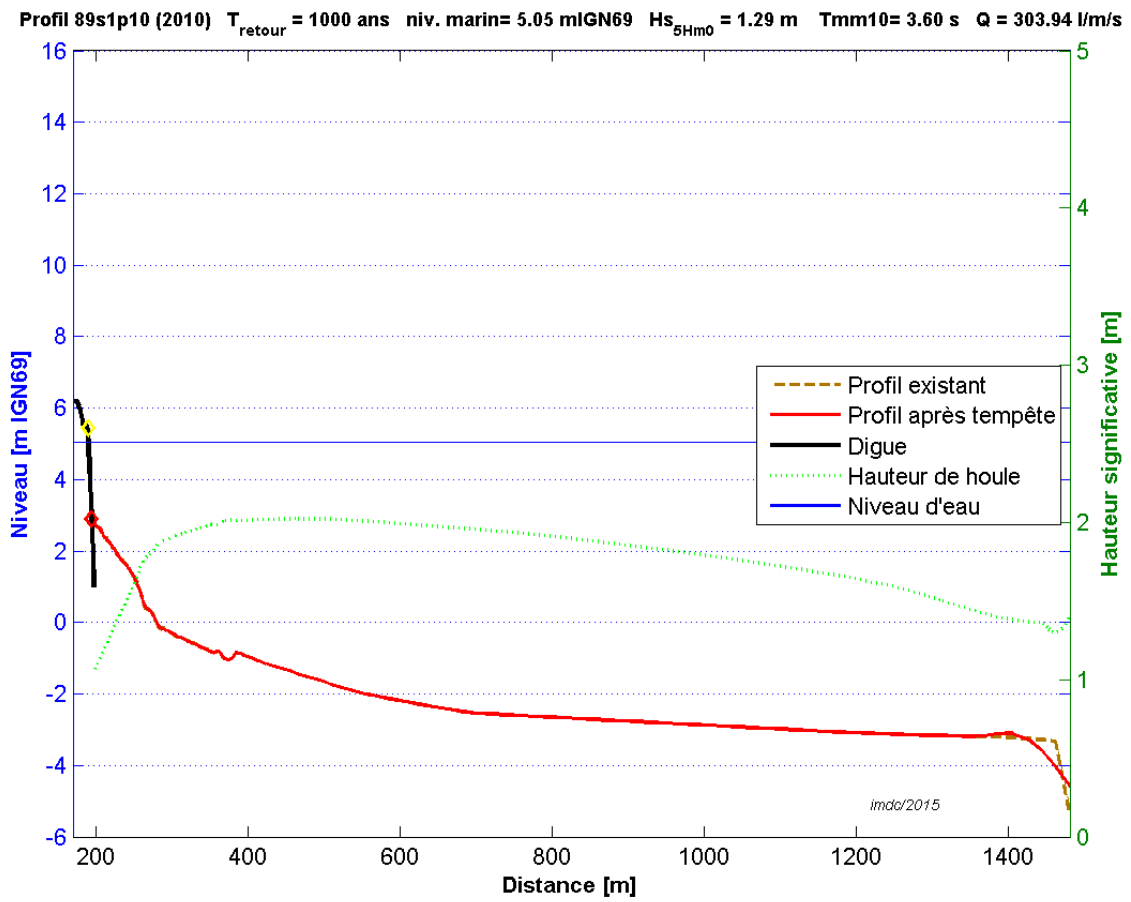


Figure V.53: Test de digue condition T1000, profil s1p10

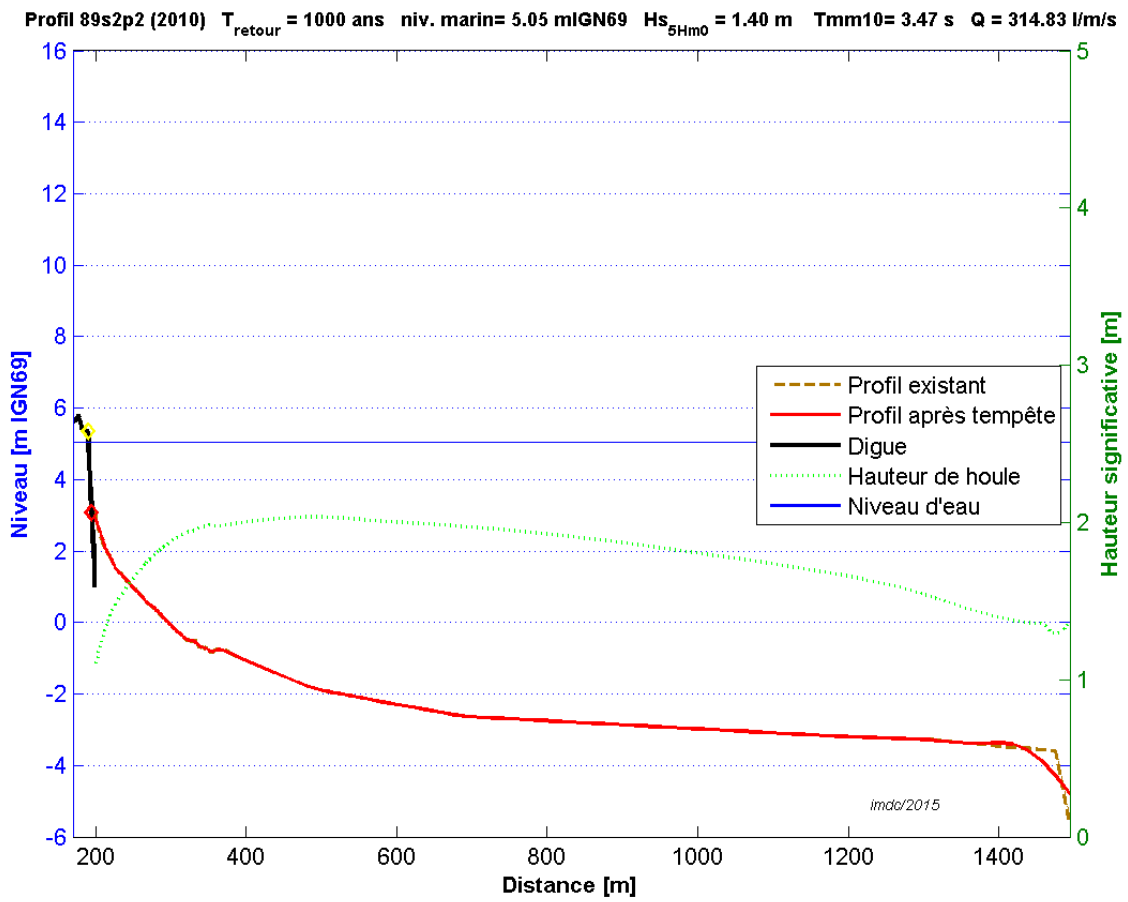


Figure V.54: Test de digue condition T1000, profil s2p2

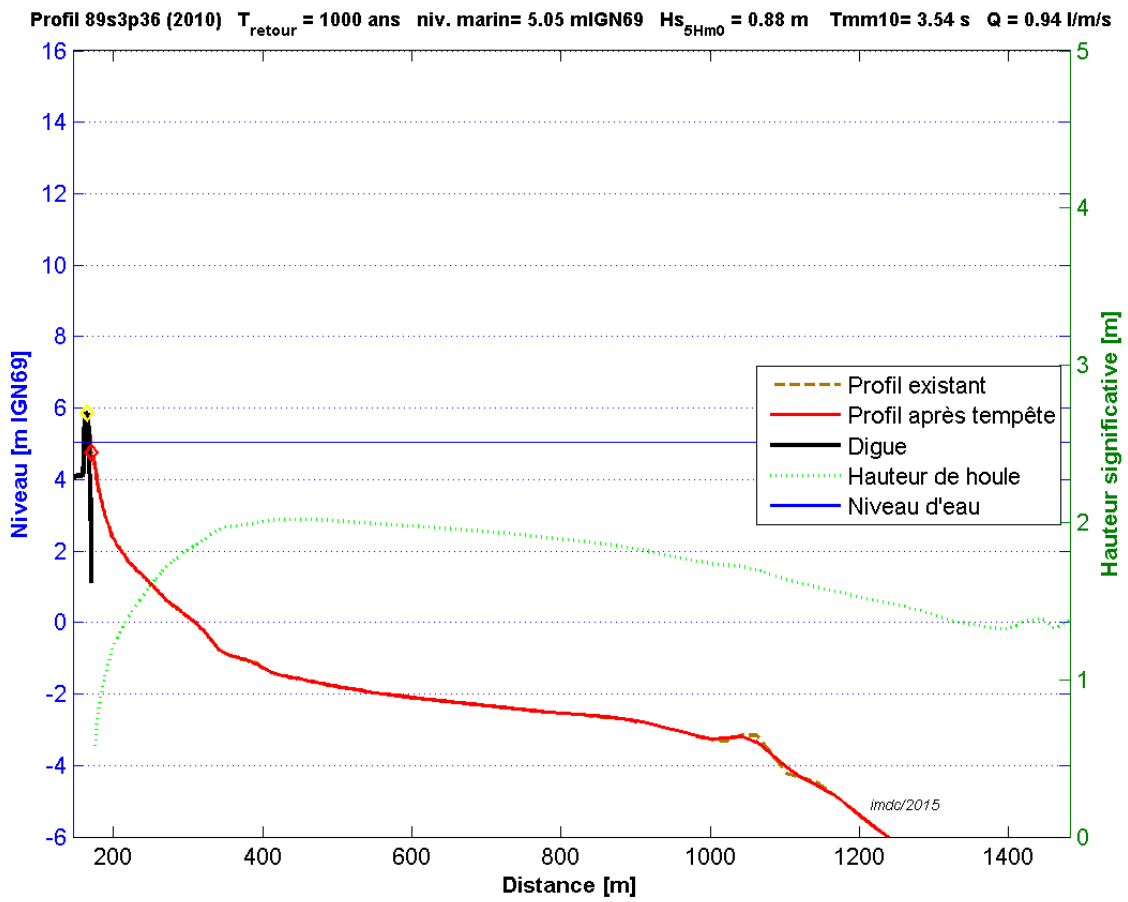


Figure V.55: Test de digue condition T1000, profil s3p36

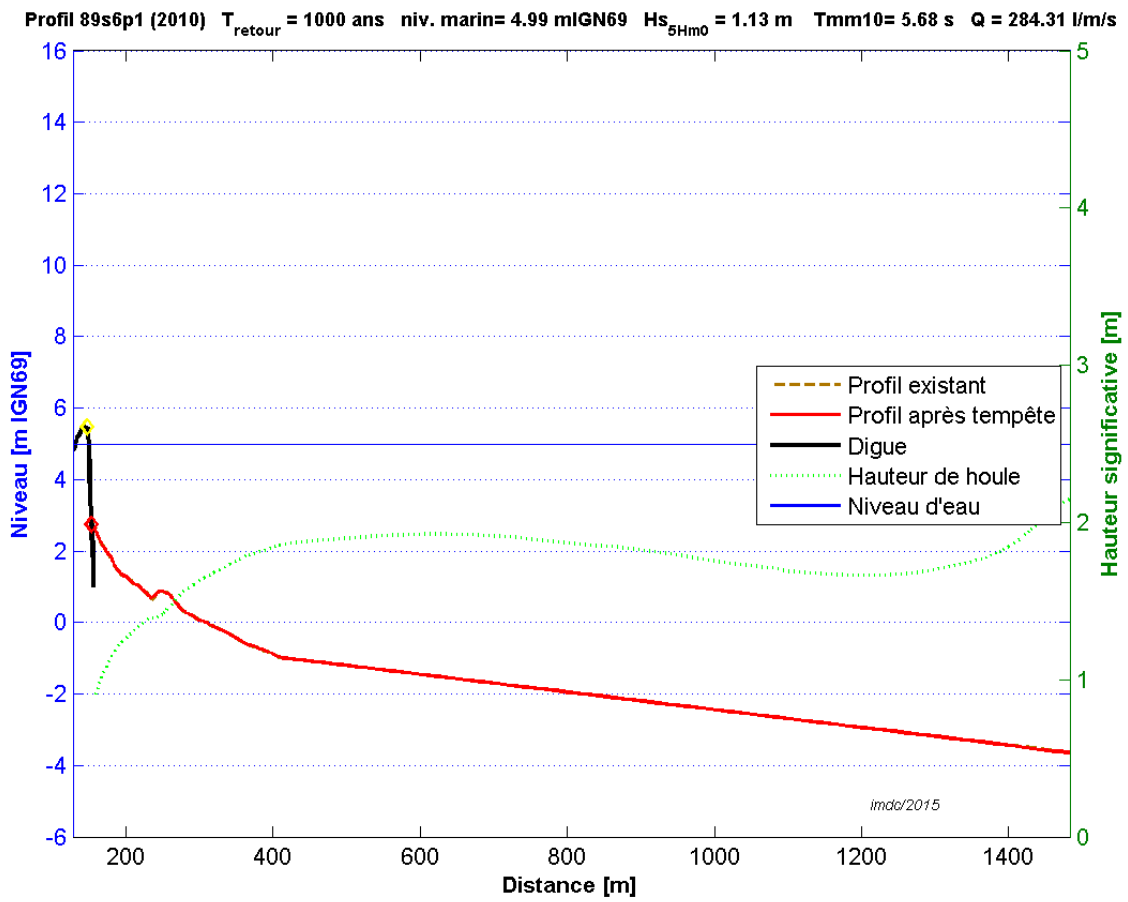


Figure V.56: Test de digue condition T1000, profil s6p1

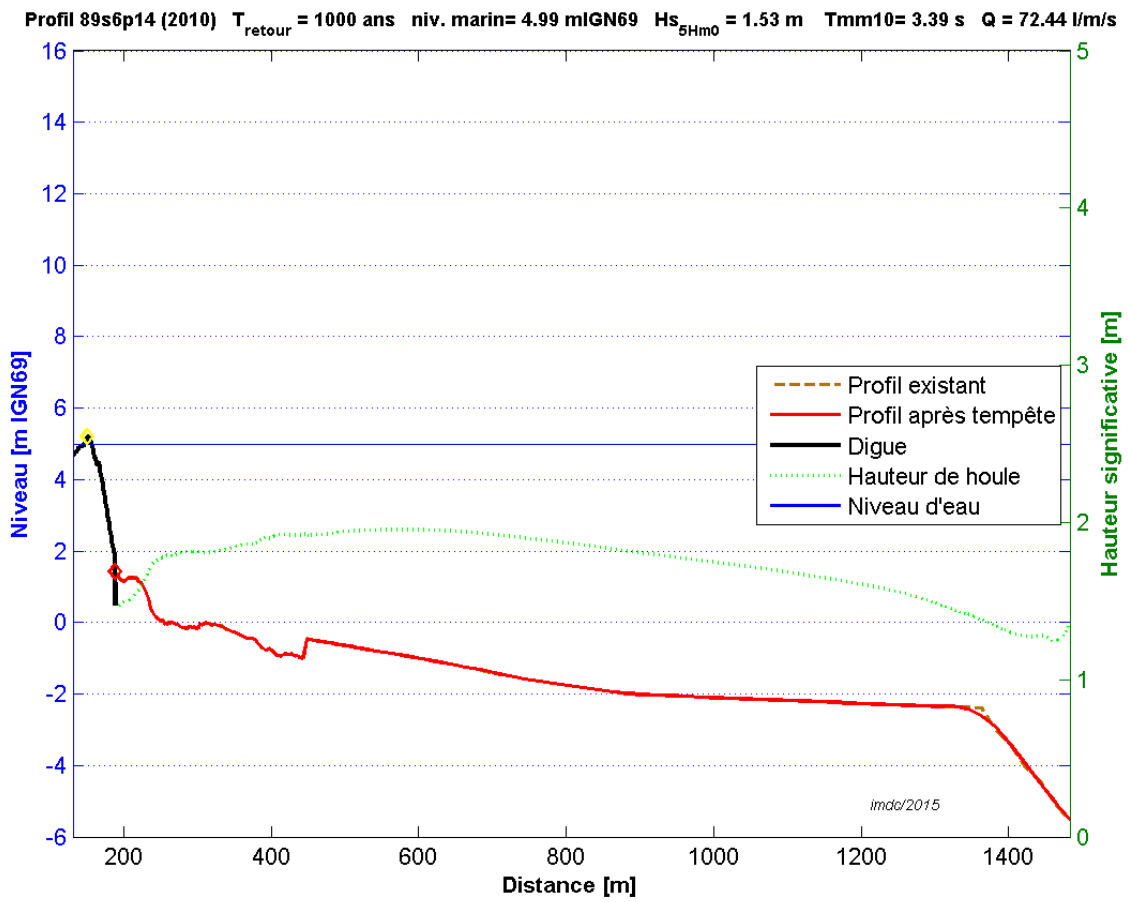


Figure V.57: Test de digue condition T1000, profil s6p14

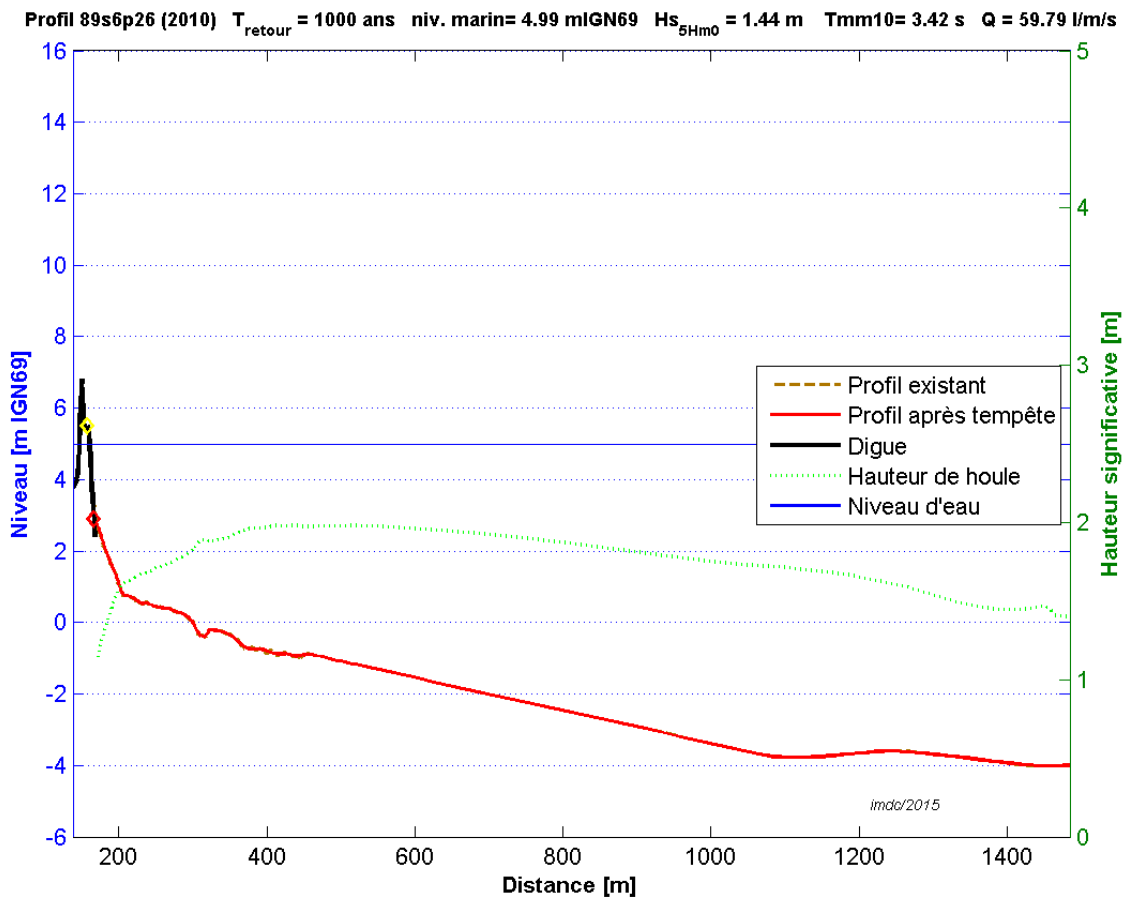


Figure V.58: Test de digue condition T1000, profil s6p26

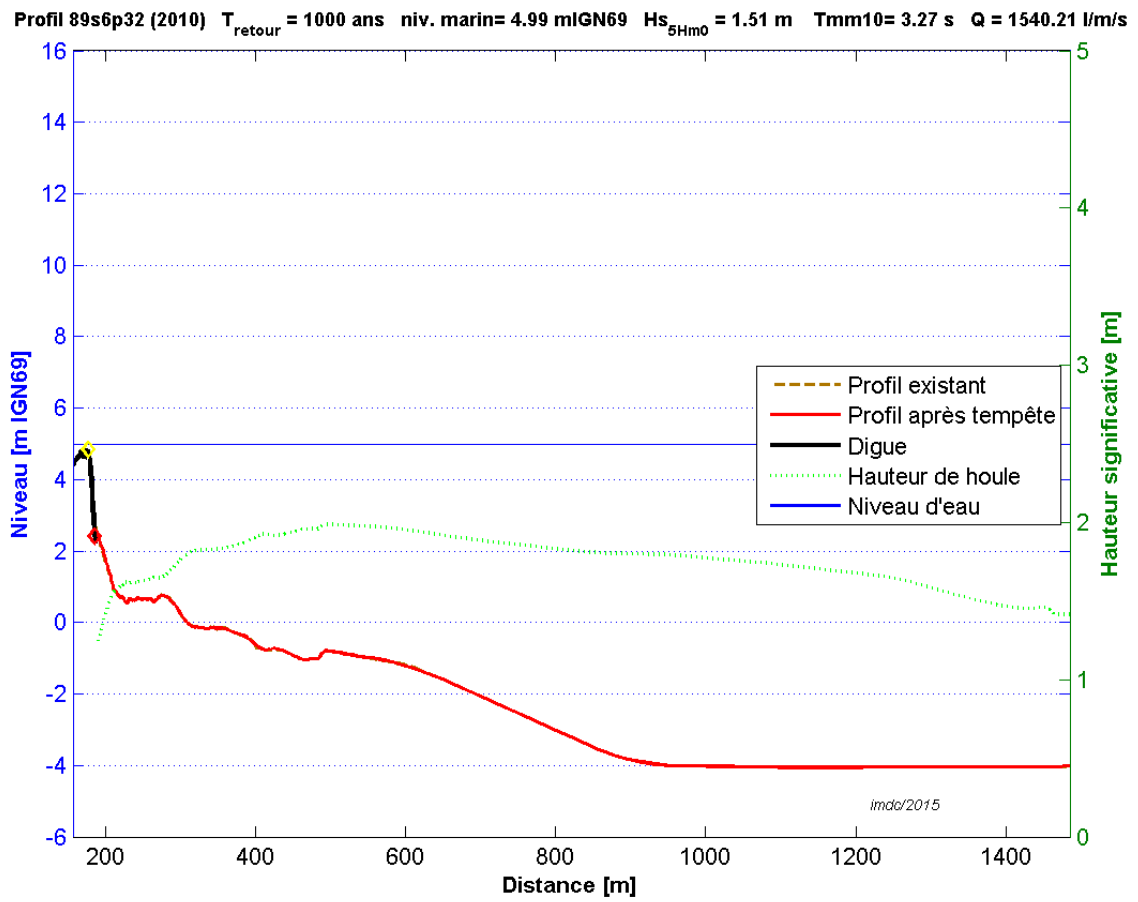


Figure V.59: Test de digue condition T1000, profil s6p32

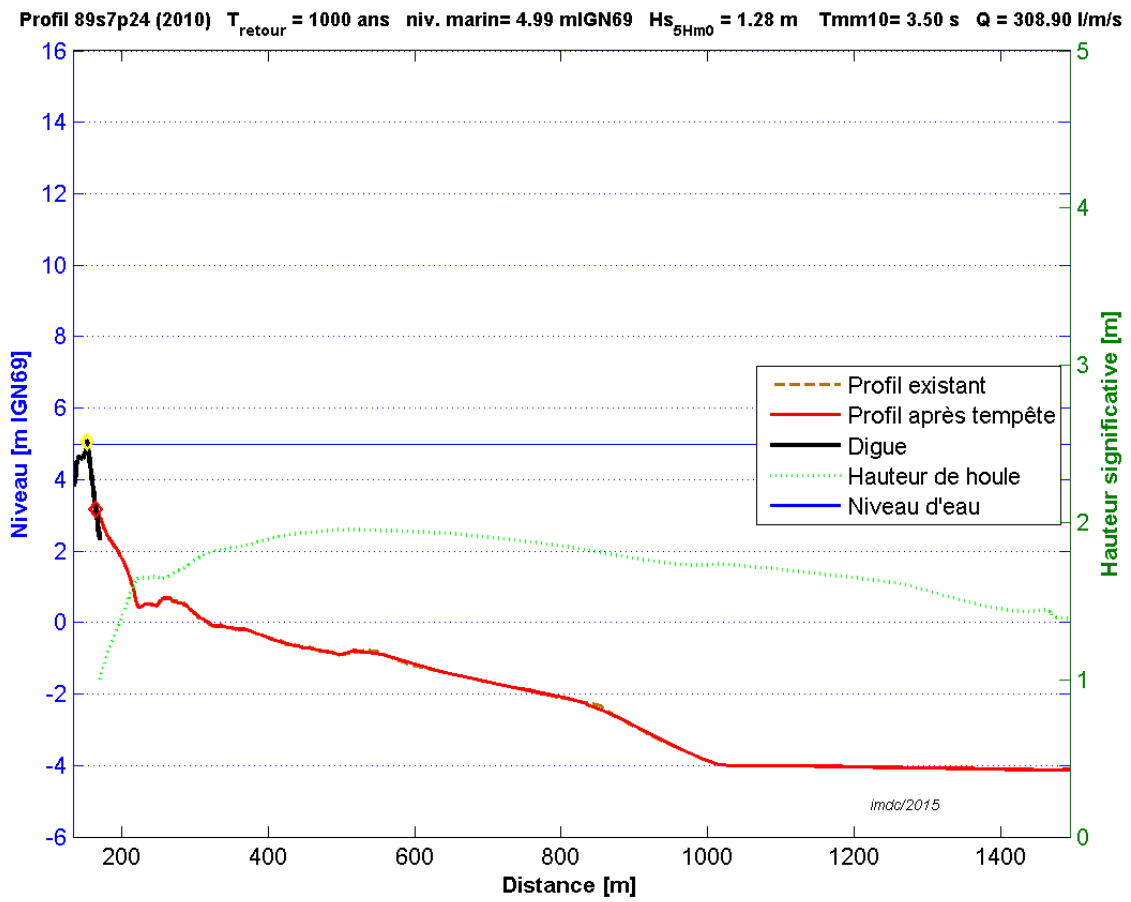


Figure V.60: Test de digue condition T1000, profil s7p24

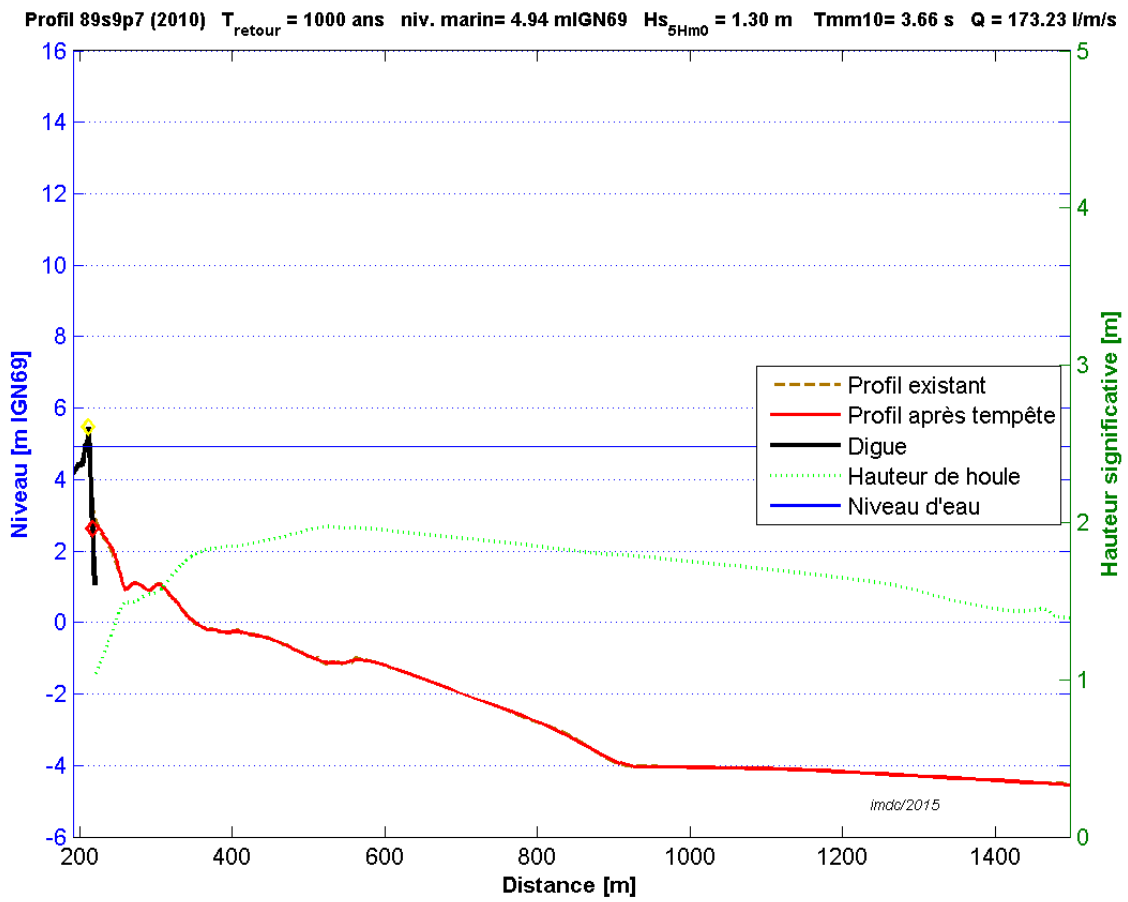


Figure V.61: Test de digue condition T1000, profil s9p7

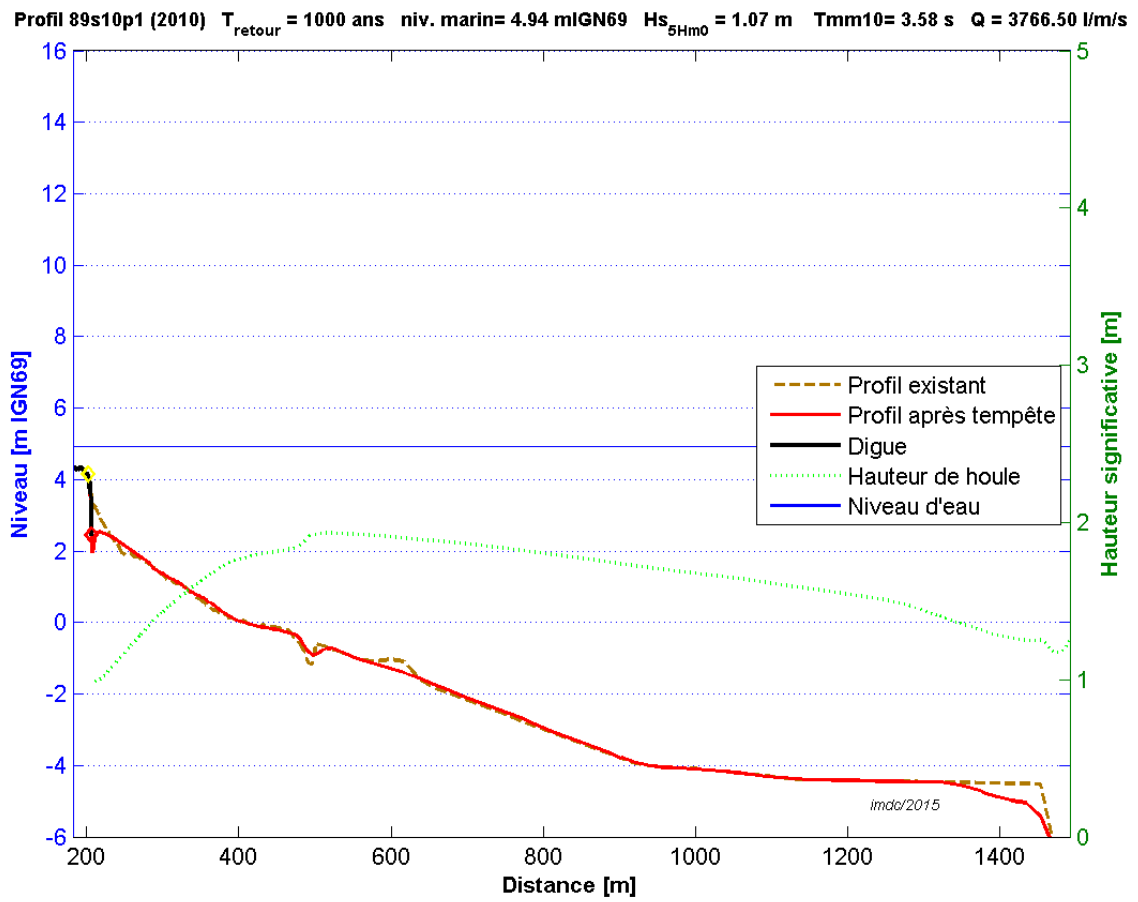


Figure V.62: Test de digue condition T1000, profil s10p1

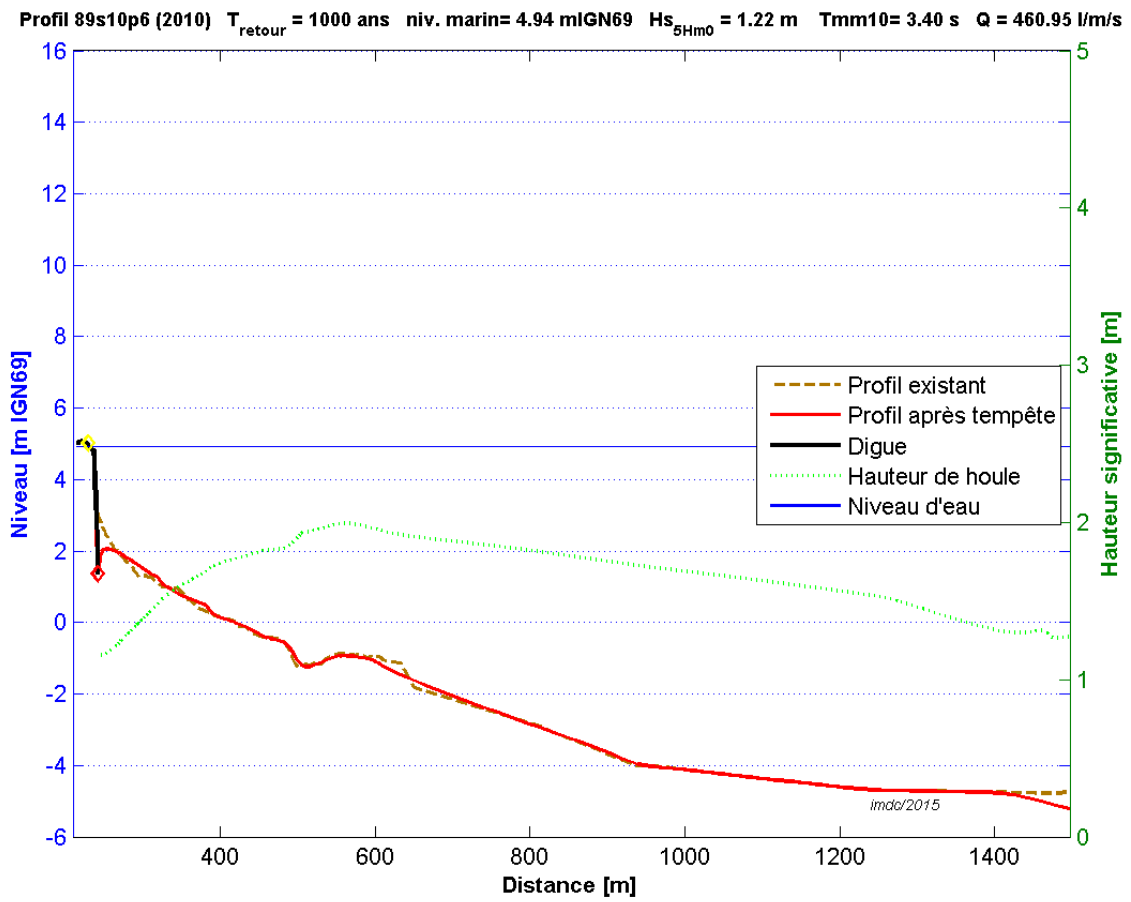


Figure V.63: Test de digue condition T1000, profil s10p6

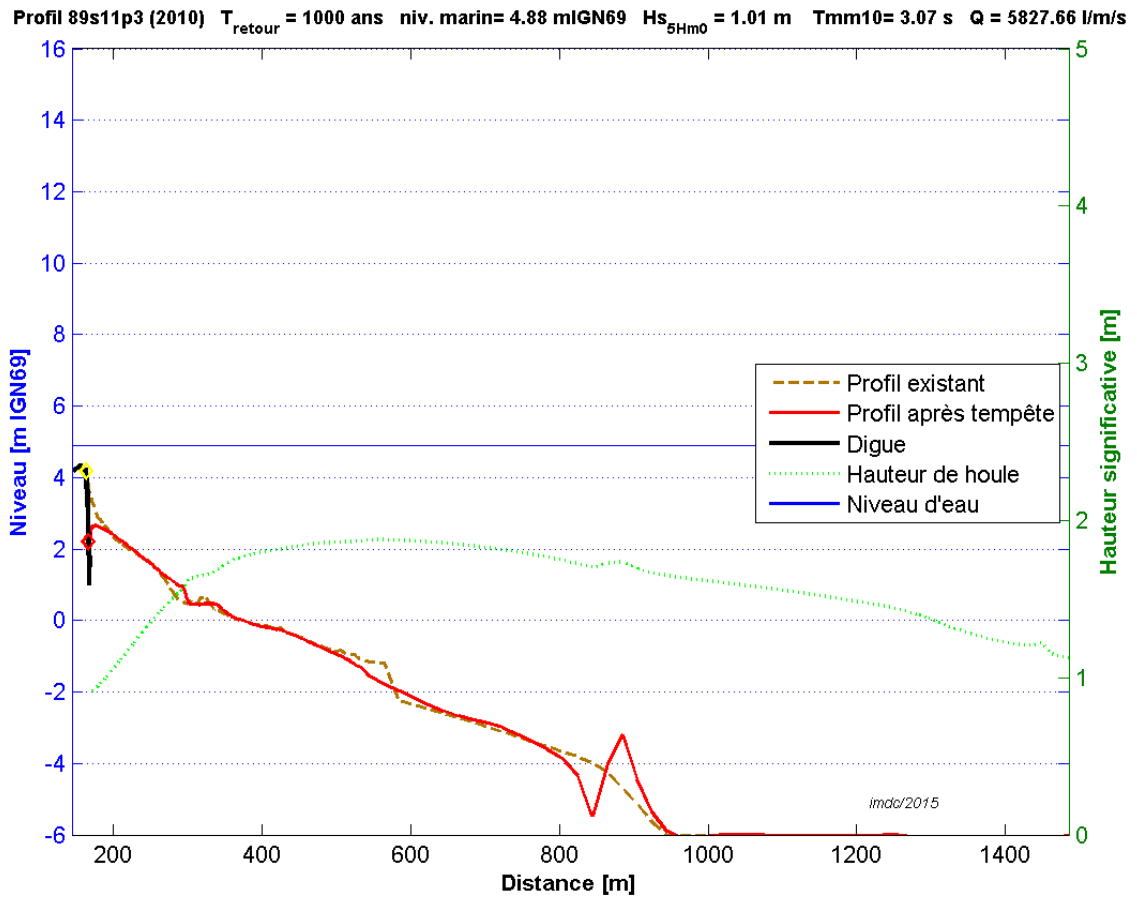


Figure V.64: Test de digue condition T1000, profil s11p3

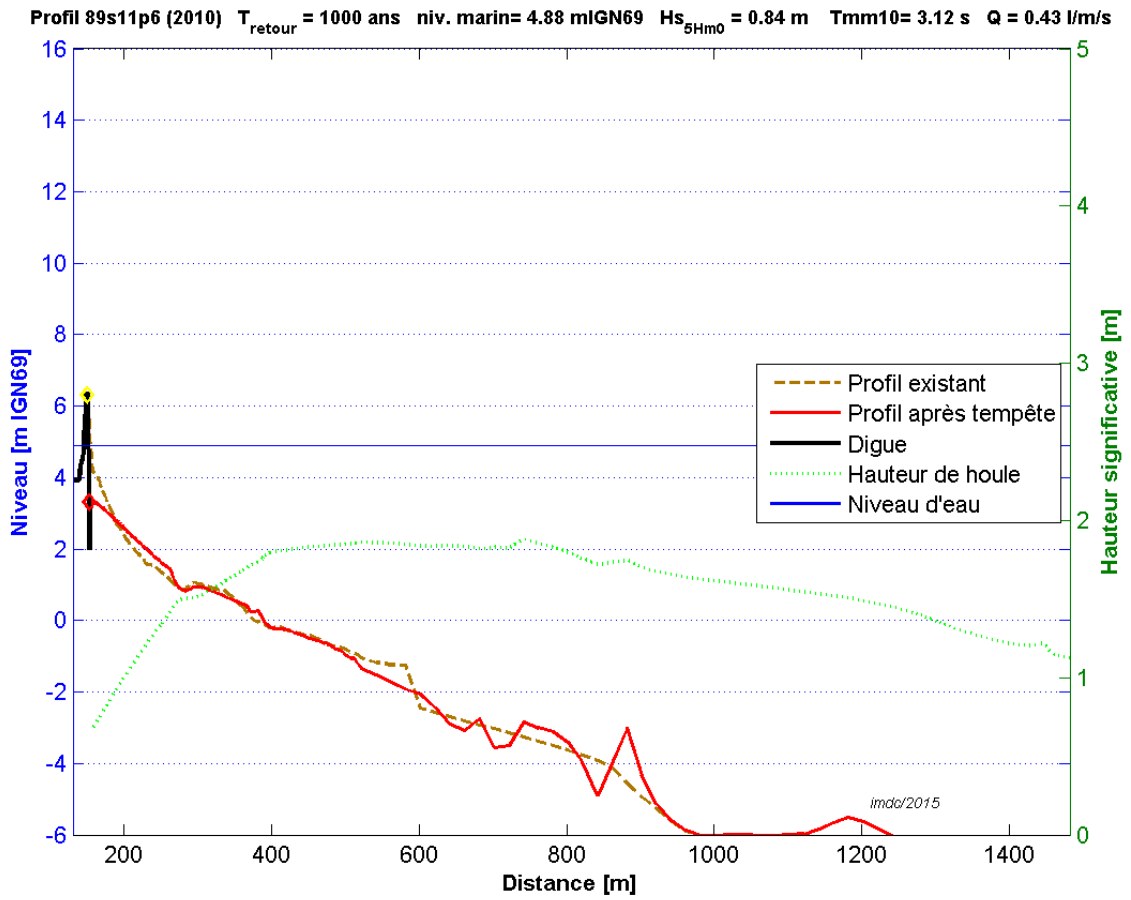


Figure V.65: Test de digue condition T1000, profil s11p6

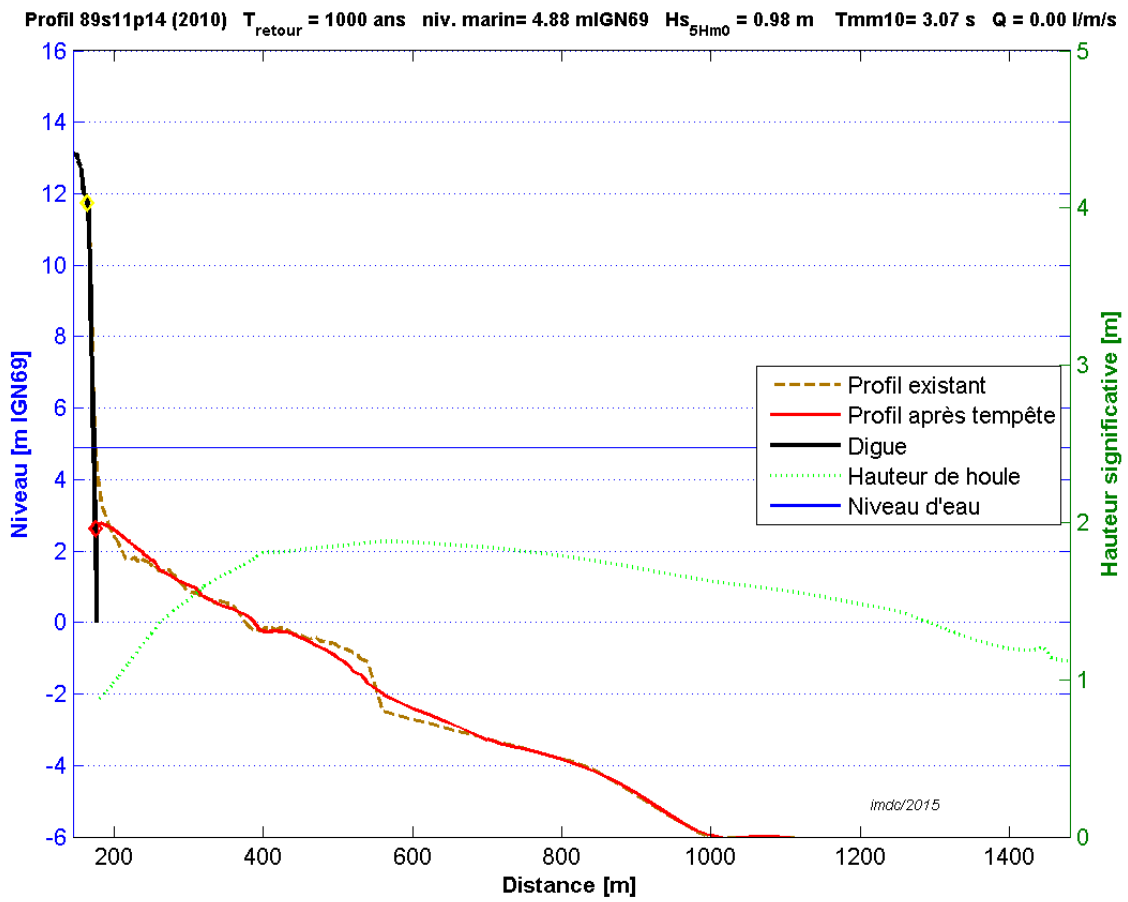


Figure V.66: Test de digue condition T1000, profil s11p14

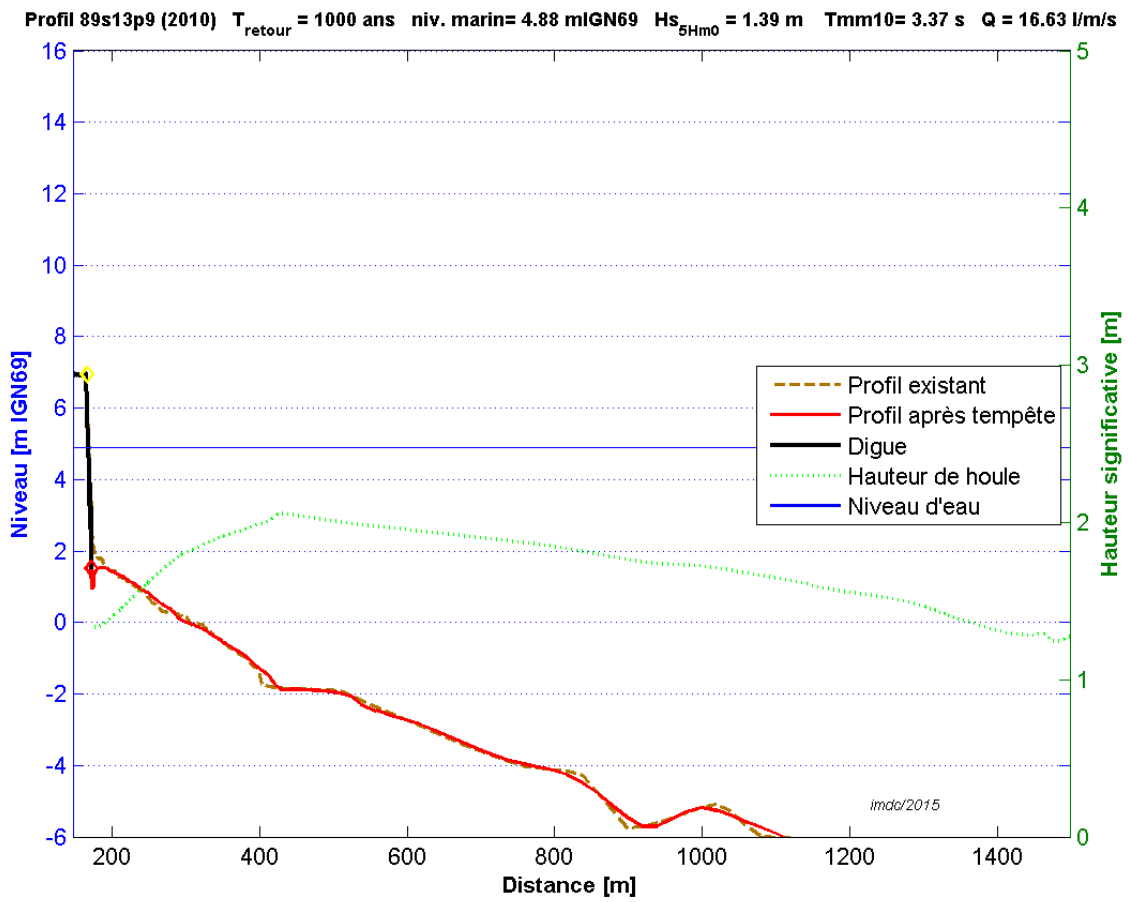


Figure V.67: Test de digue condition T1000, profil s13p9

Annexe D : Résultats test de digue Secteur Dives-Orne

D.1 Scénario de référence +0,20m

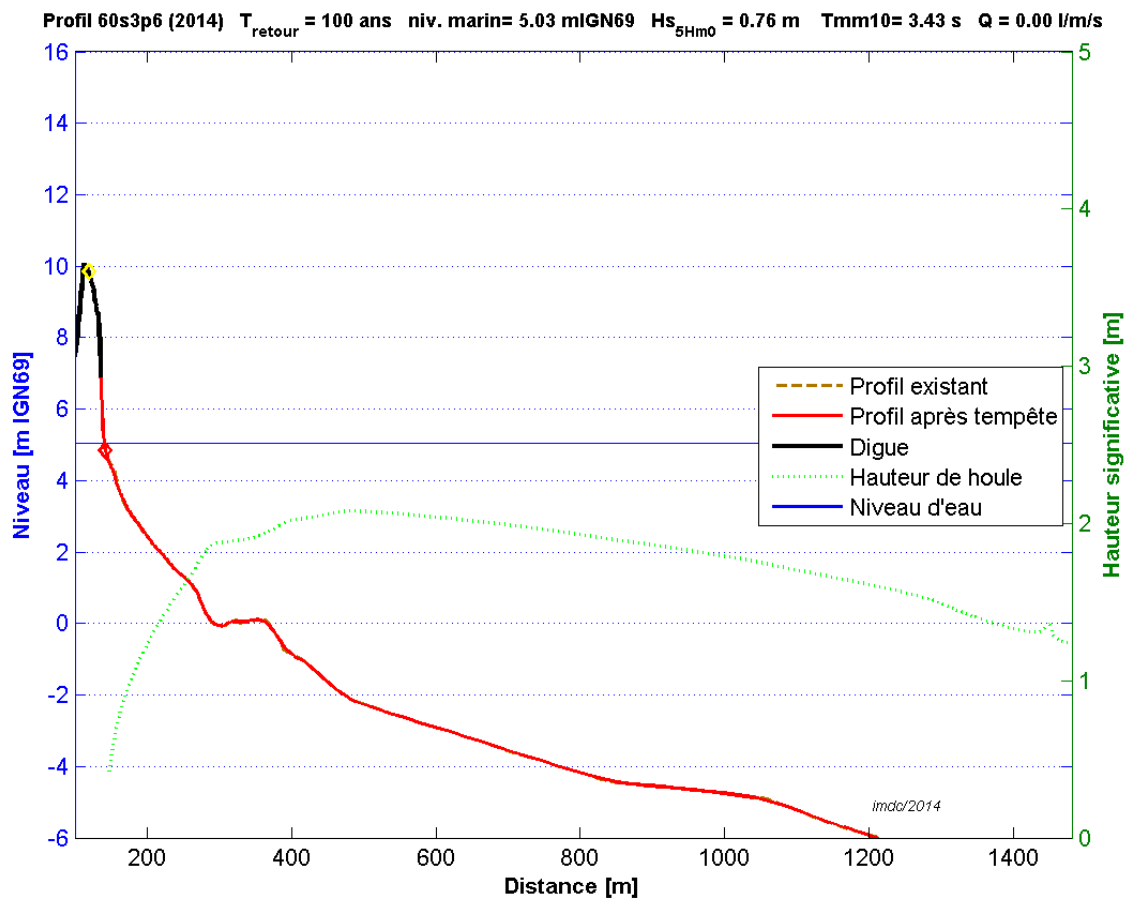


Figure V.68: Test de digue référence+20cm, profil s3p6

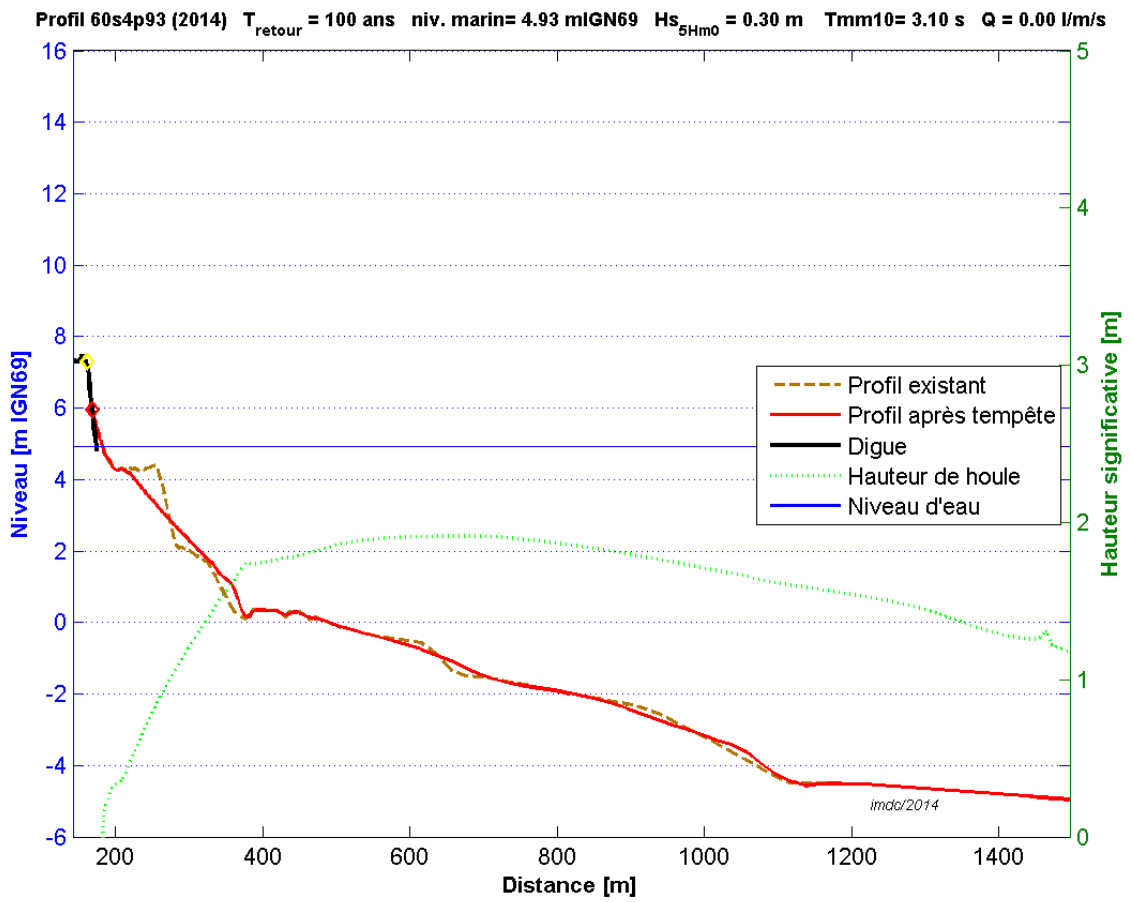


Figure V.69: Test de digue référence+20cm, profil s4p93

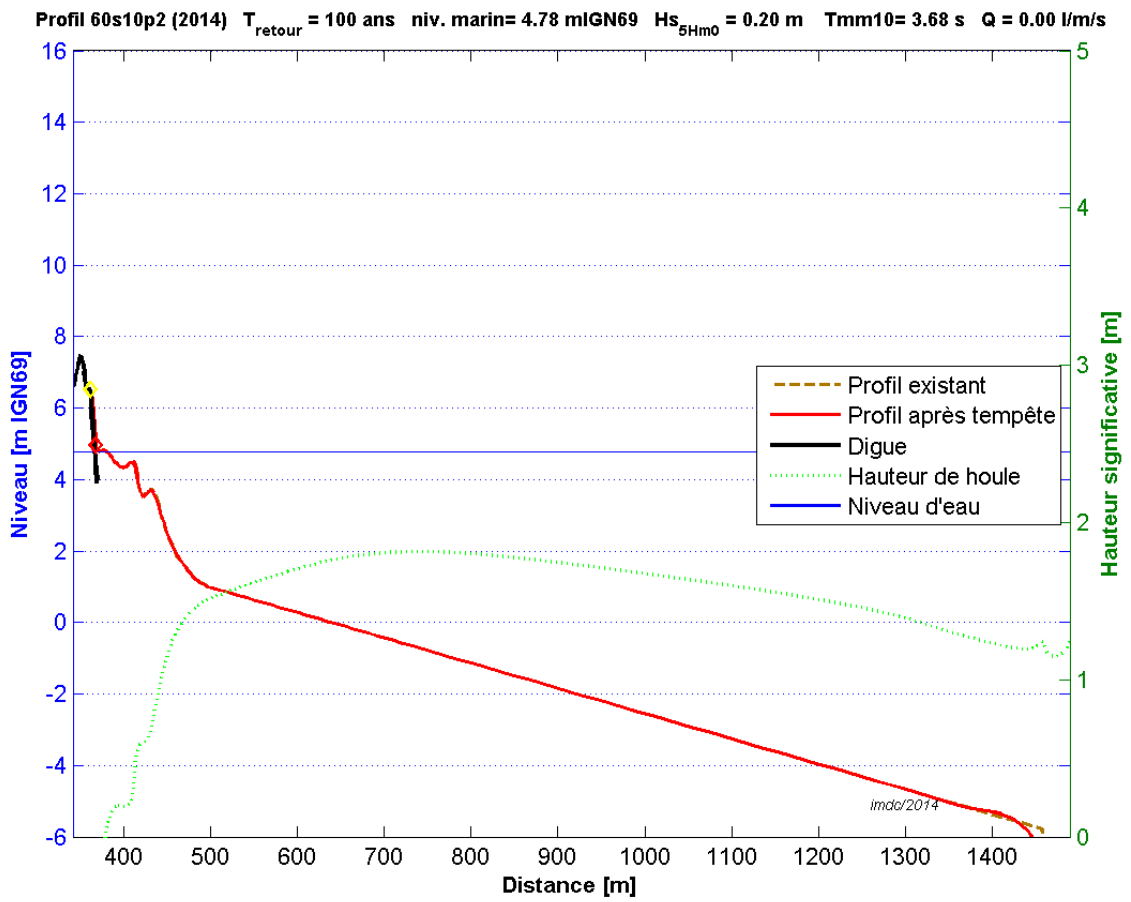


Figure V.70: Test de digue référence+20cm, profil s10p2

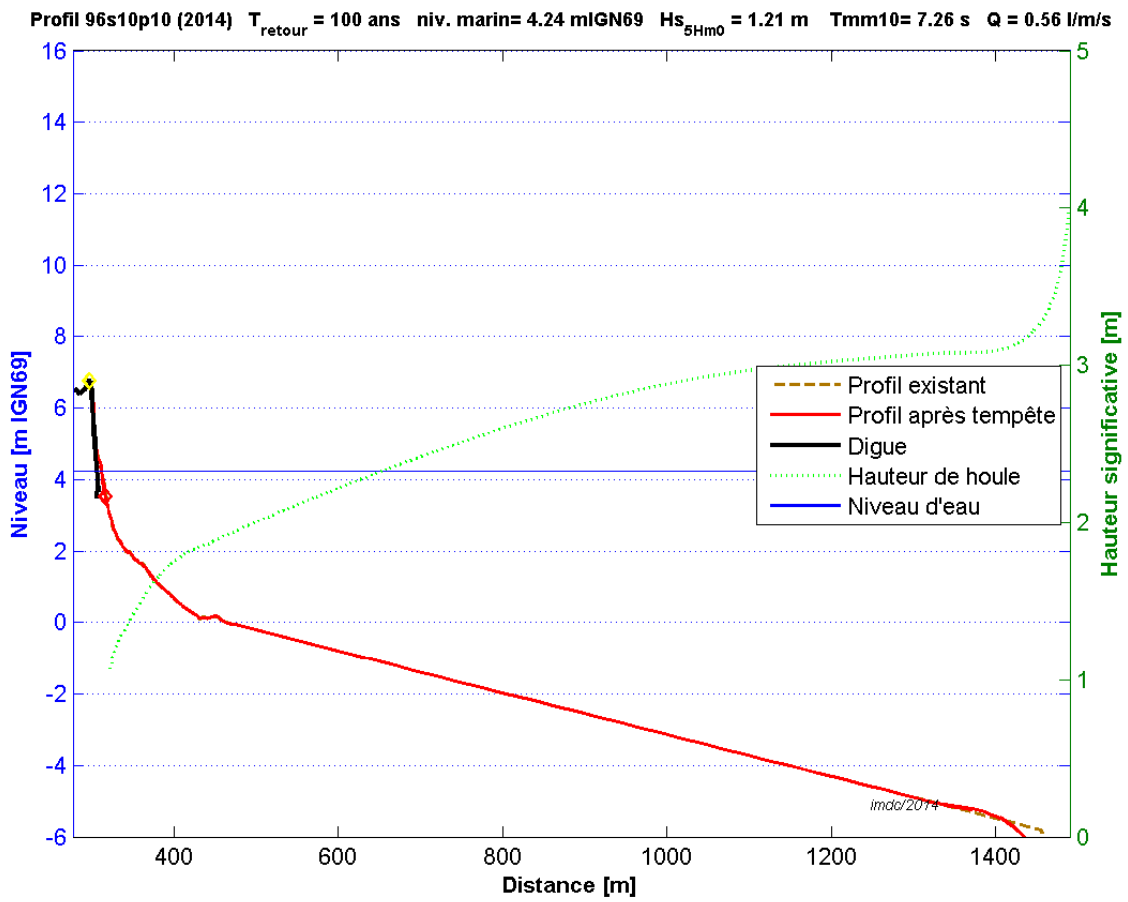


Figure V.71: Test de digue référence+20cm, profil s10p10

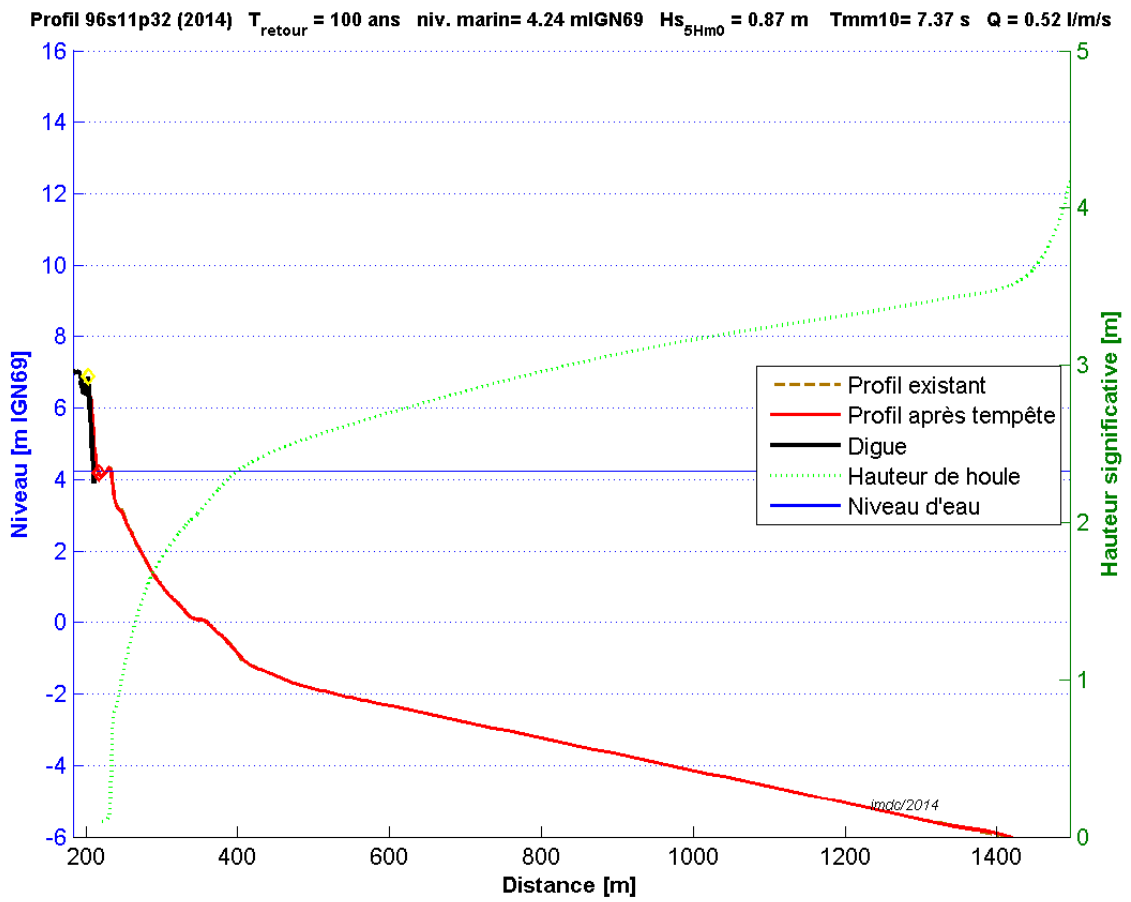


Figure V.72: Test de digue référence+20cm, profil s11p32

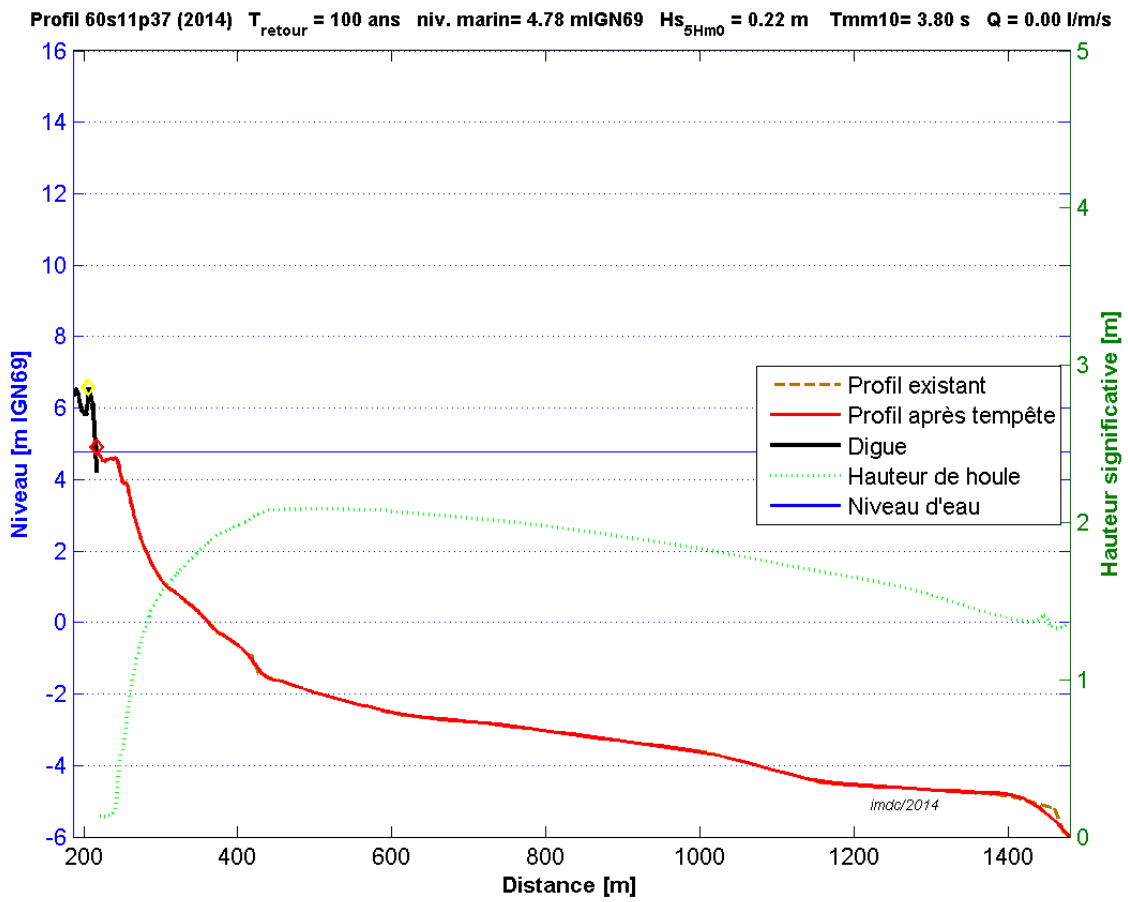


Figure V.73: Test de digue référence+20cm, profil s11p37

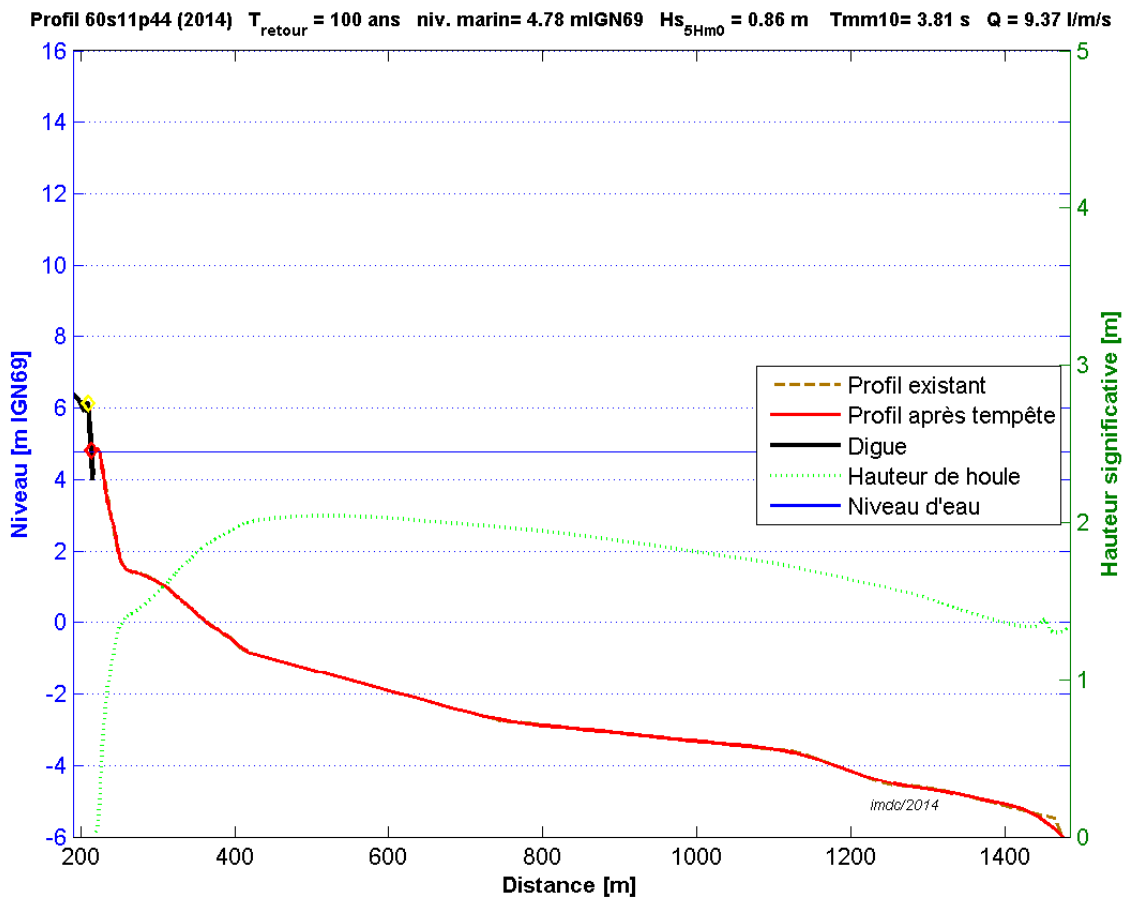


Figure V.74: Test de digue référence+20cm, profil s11p44

D.2 Scénario de référence +0,60m

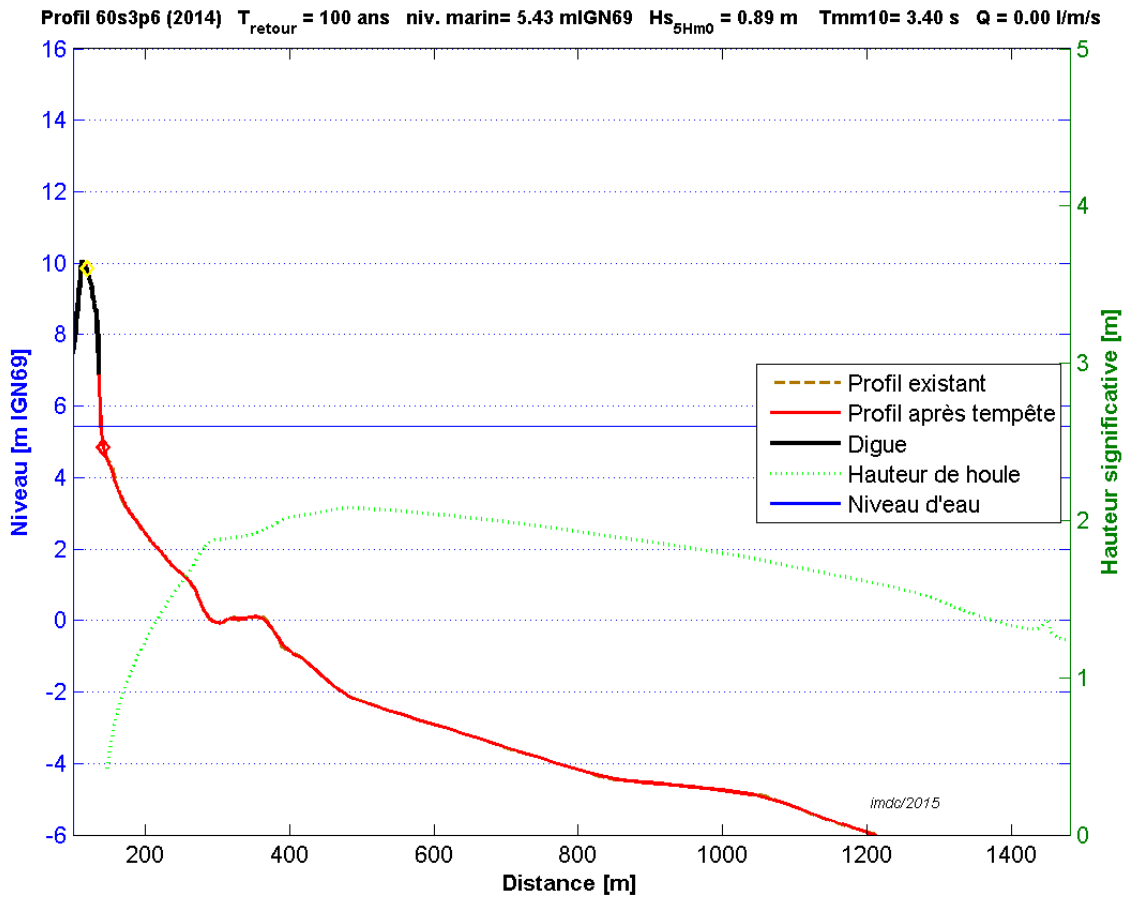


Figure V.75: Test de digue référence+60cm, profil s3p6

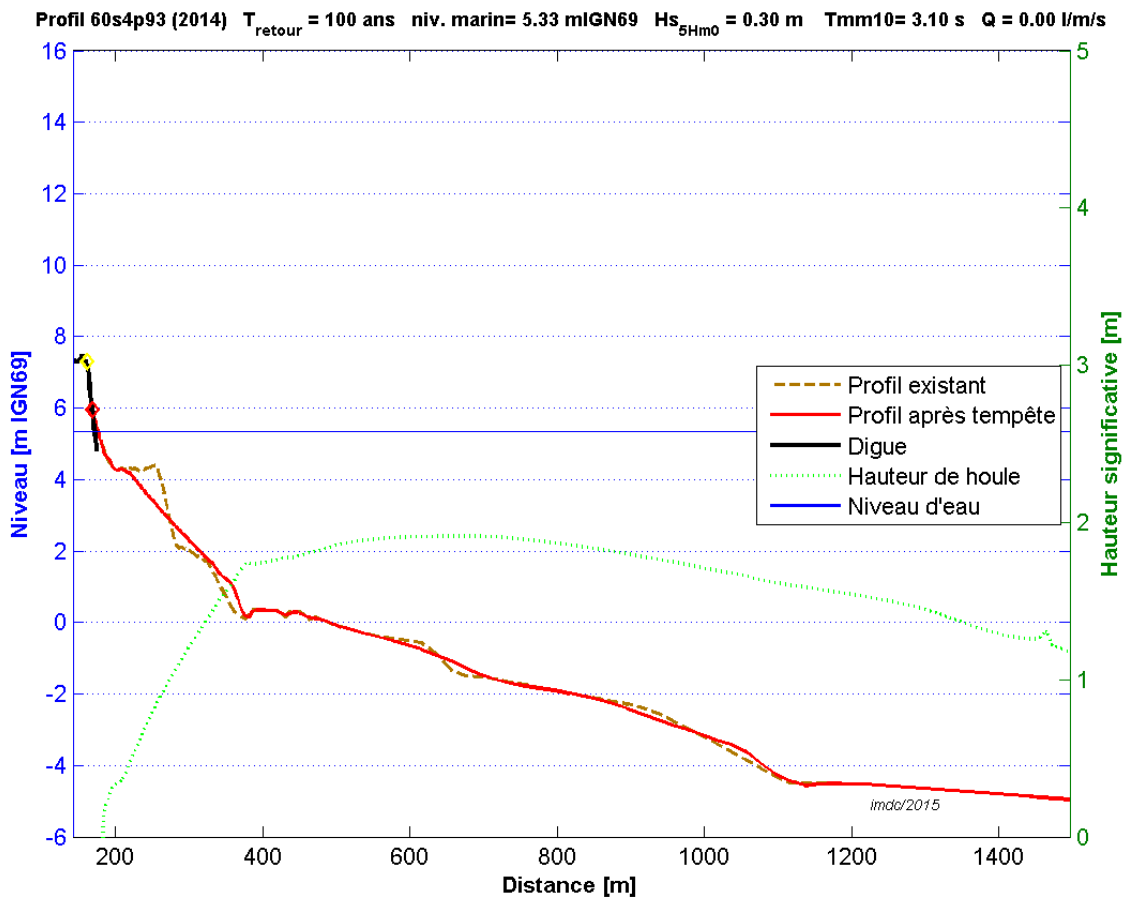


Figure V.76: Test de digue référence+60cm, profil s4p93

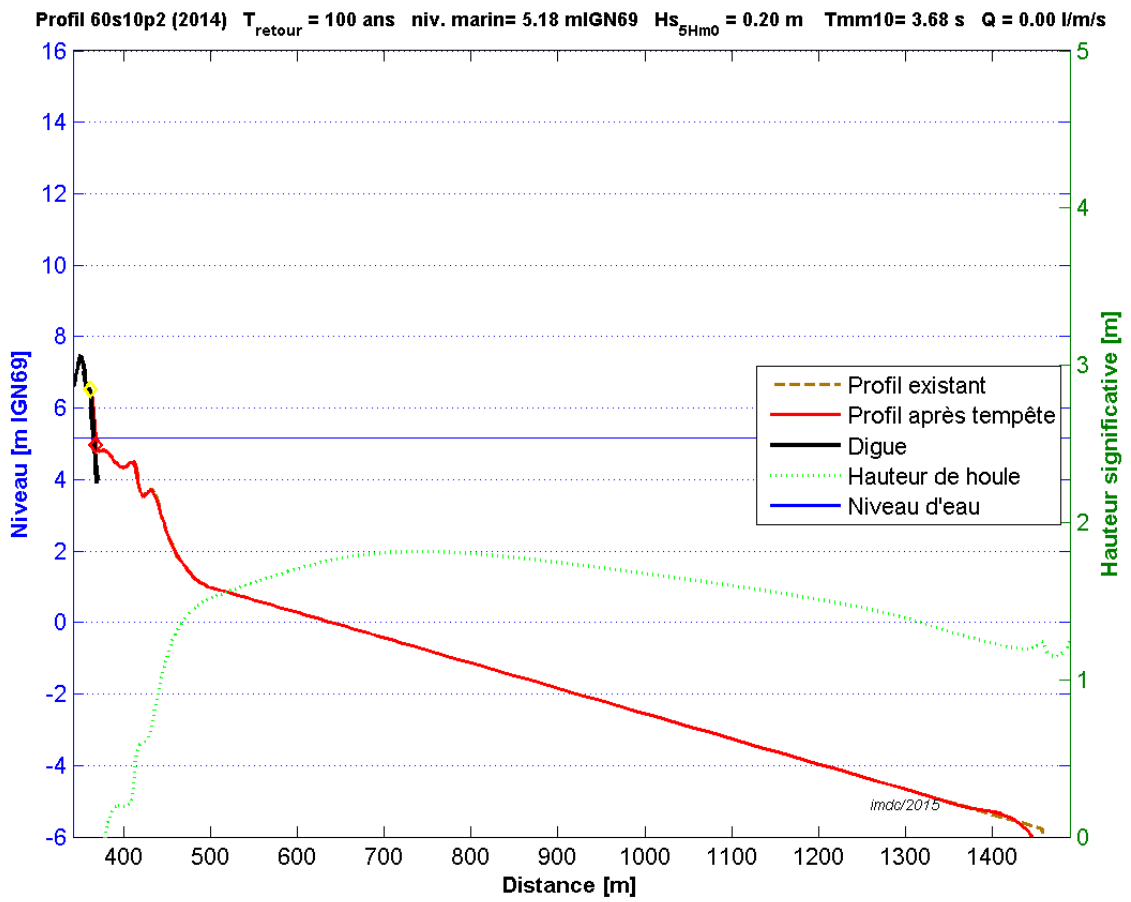


Figure V.77: Test de digue référence+60cm, profil s10p2

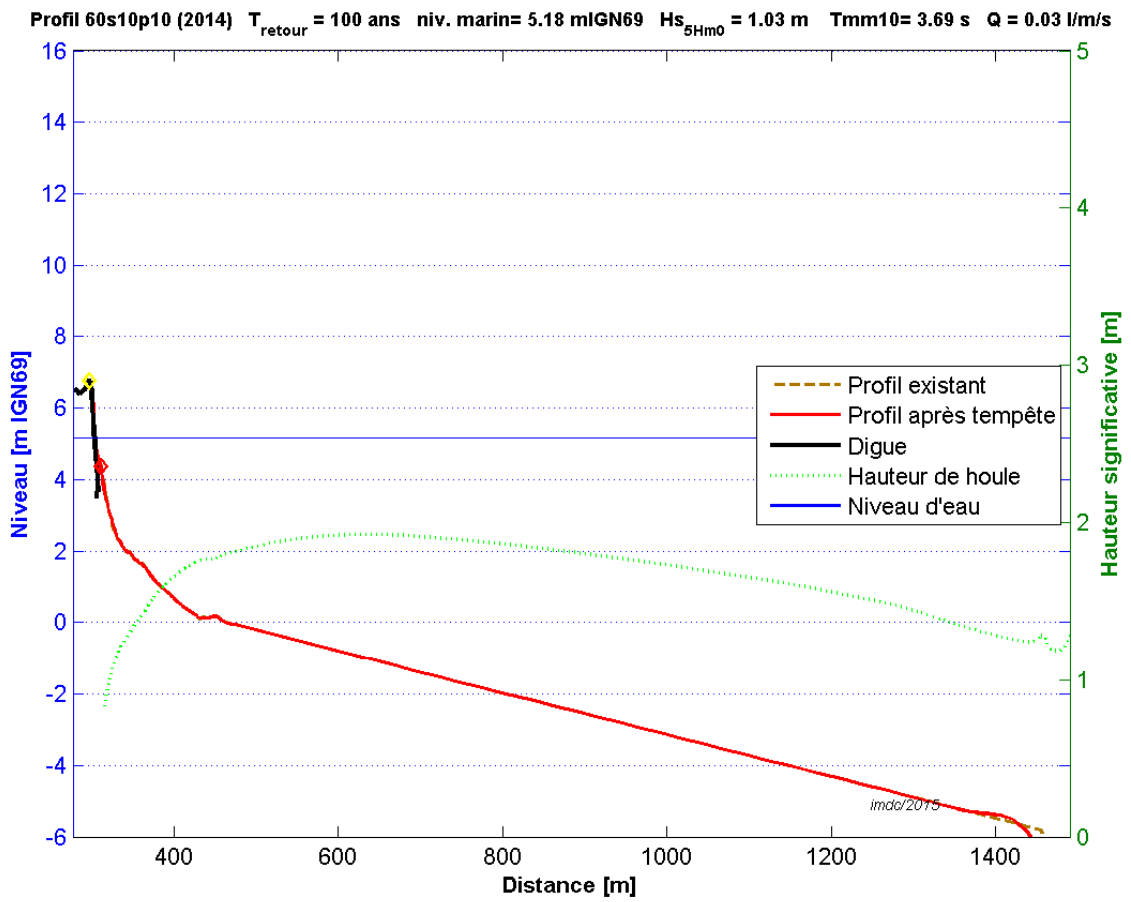


Figure V.78: Test de digue référence+60cm, profil s10p10

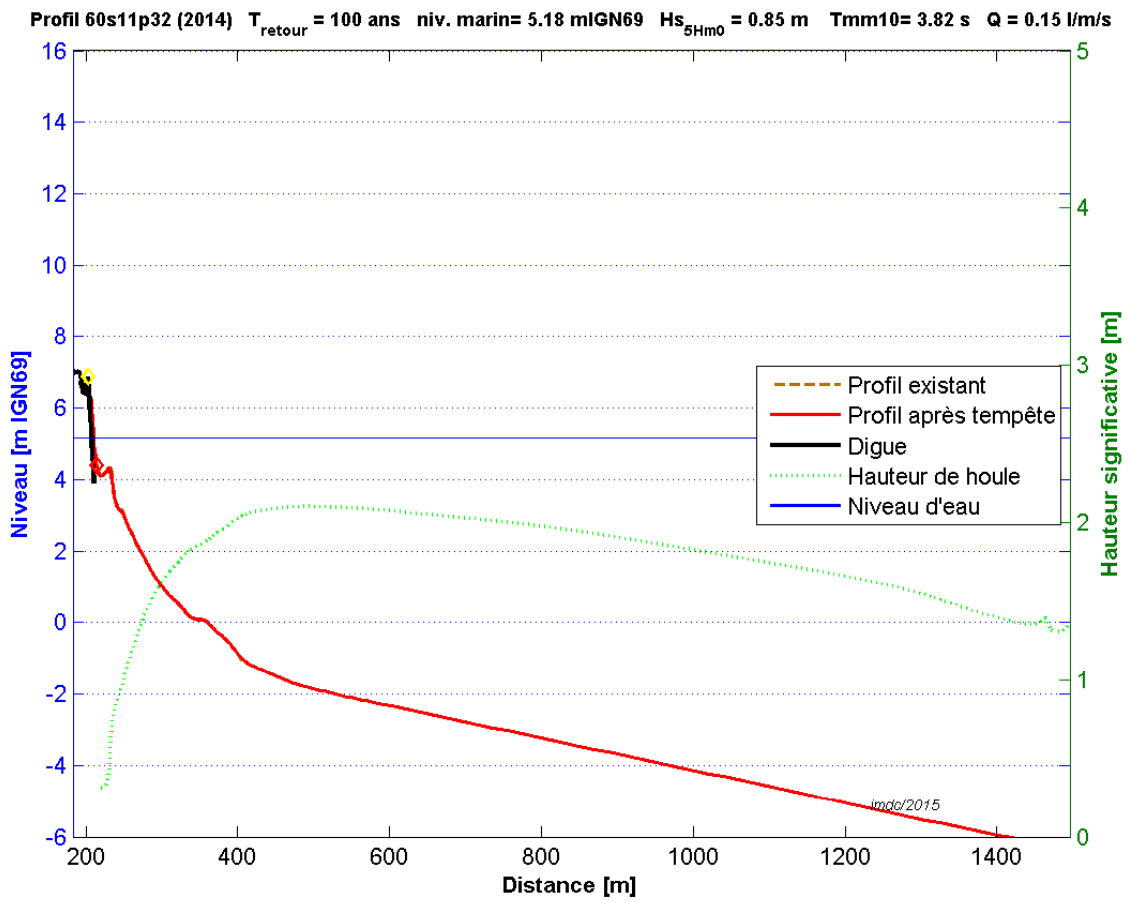


Figure V.79: Test de digue référence+60cm, profil s11p32

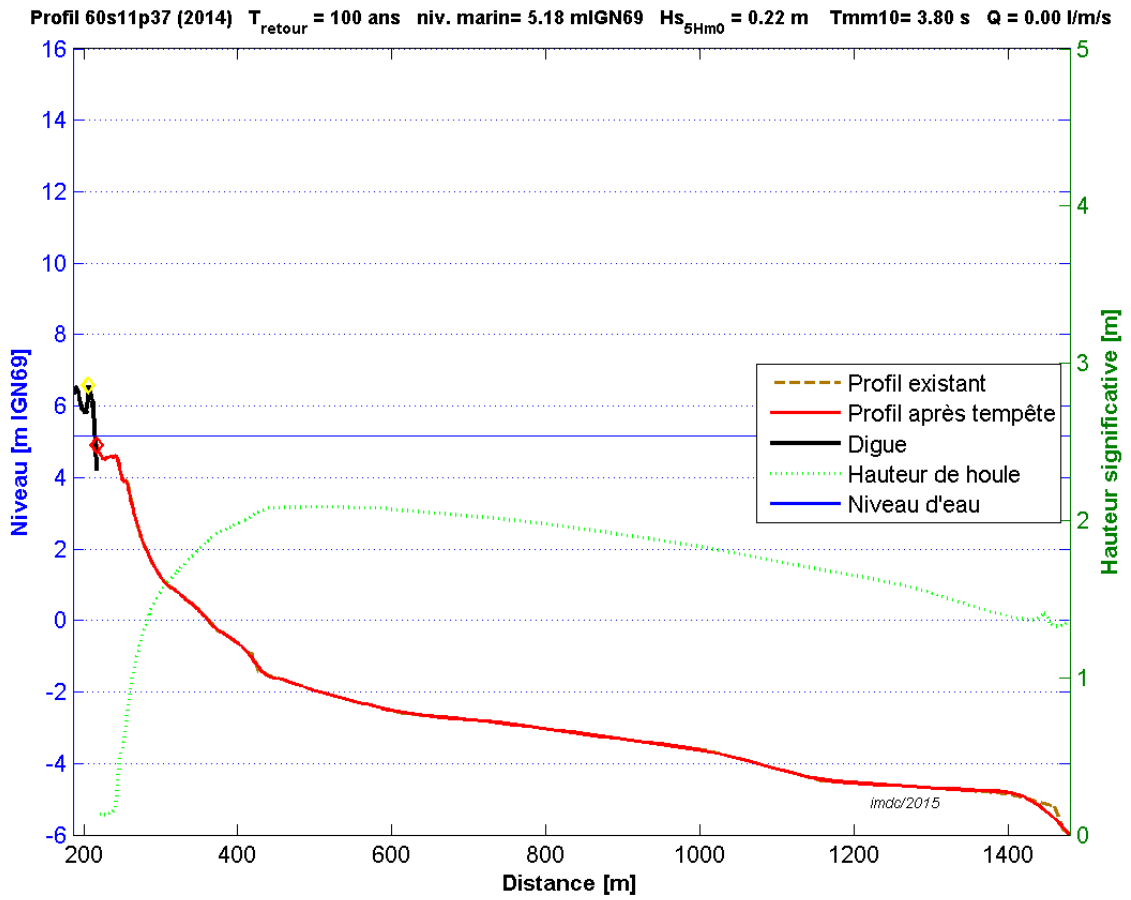


Figure V.80: Test de digue référence+60cm, profil s11p37

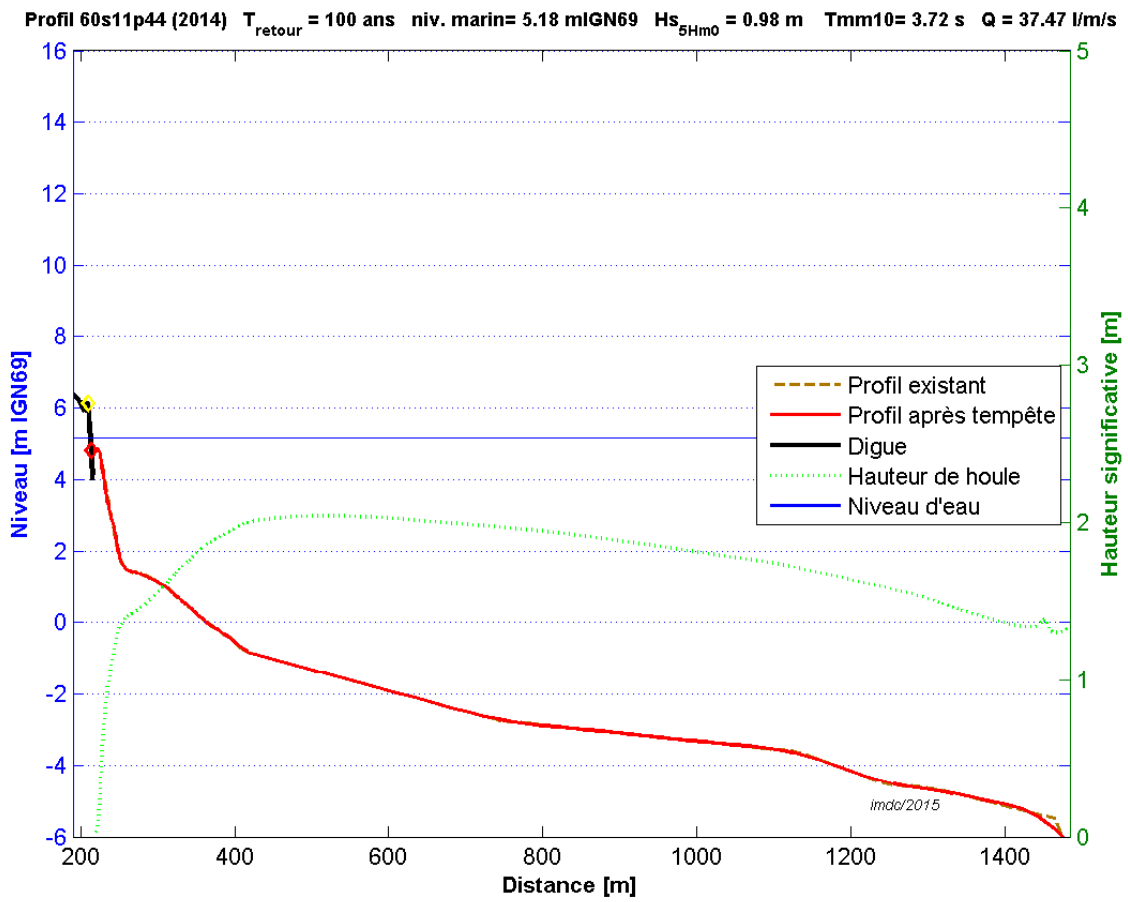


Figure V.81: Test de digue référence+60cm, profil s11p44

D.3 Scénario fréquent (T10)

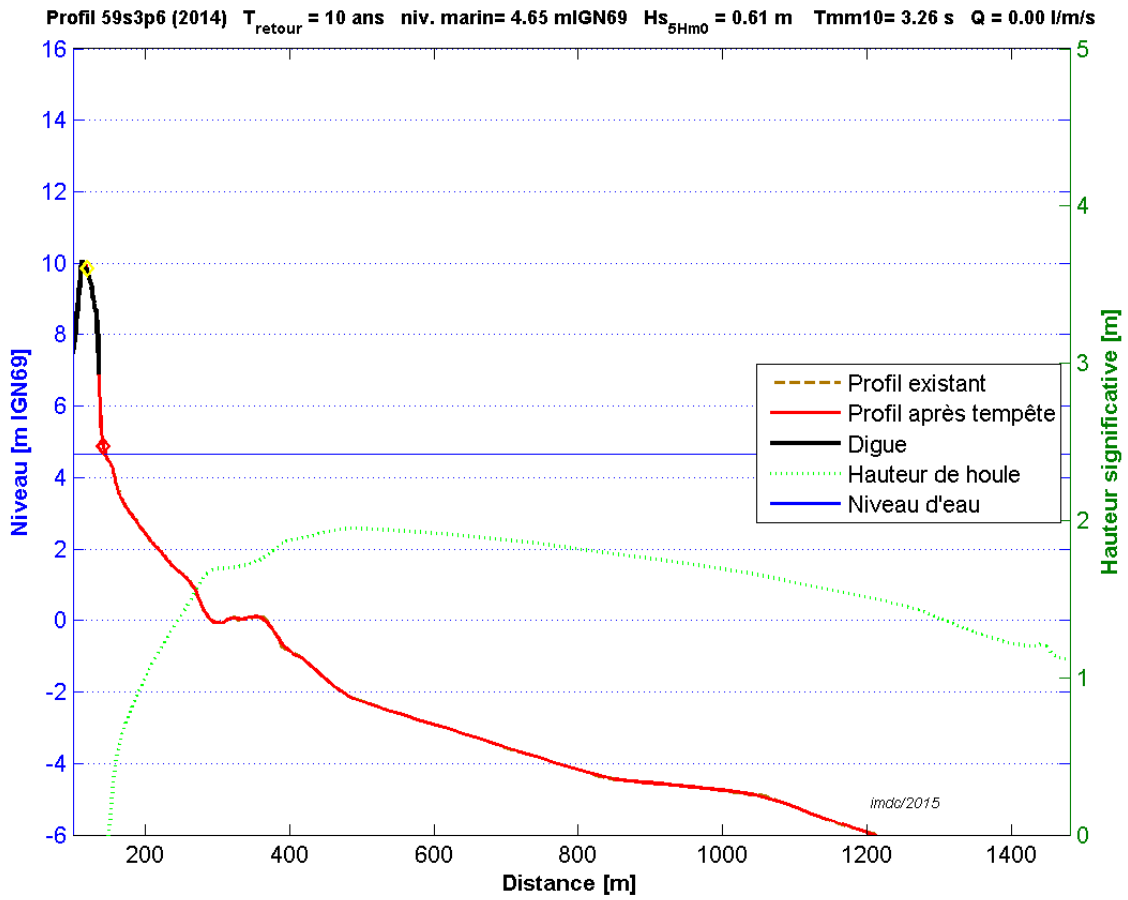


Figure V.82: Test de digue condition fréquente (T10), profil s3p6

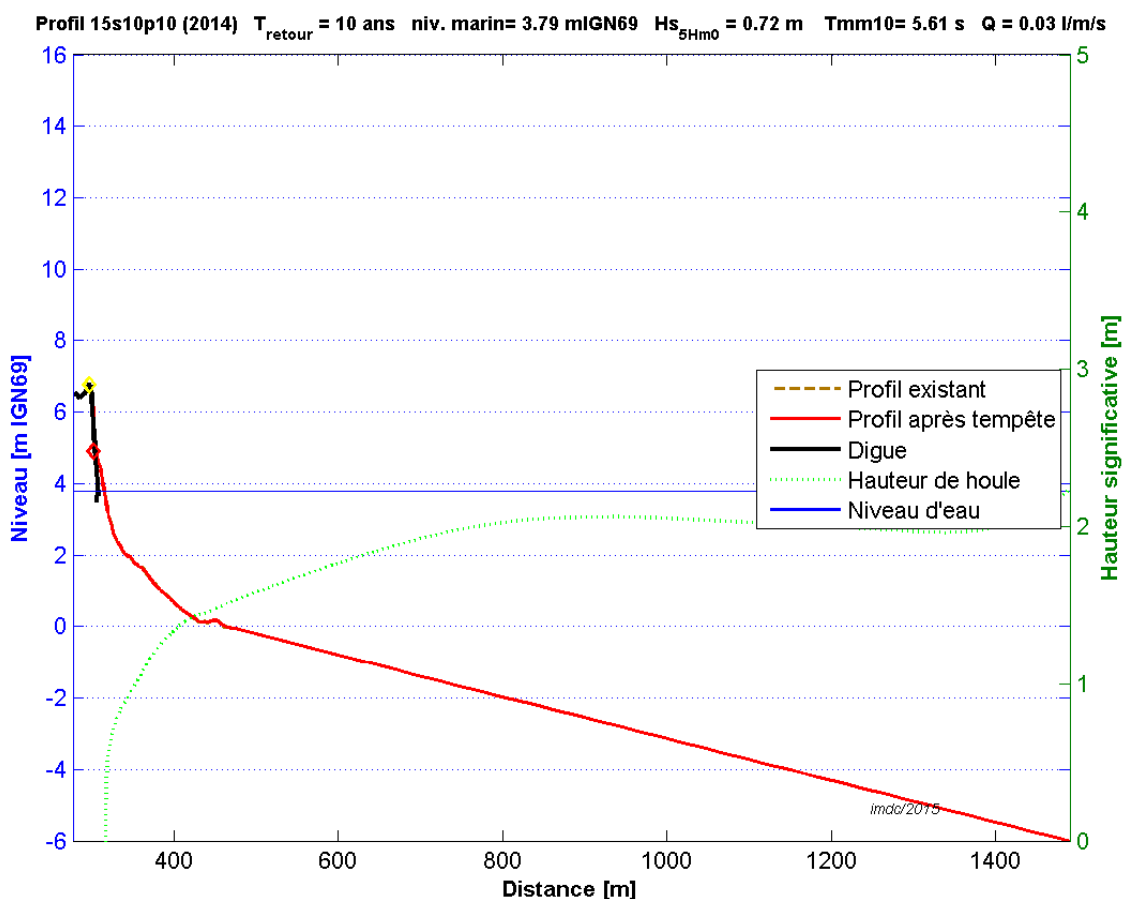
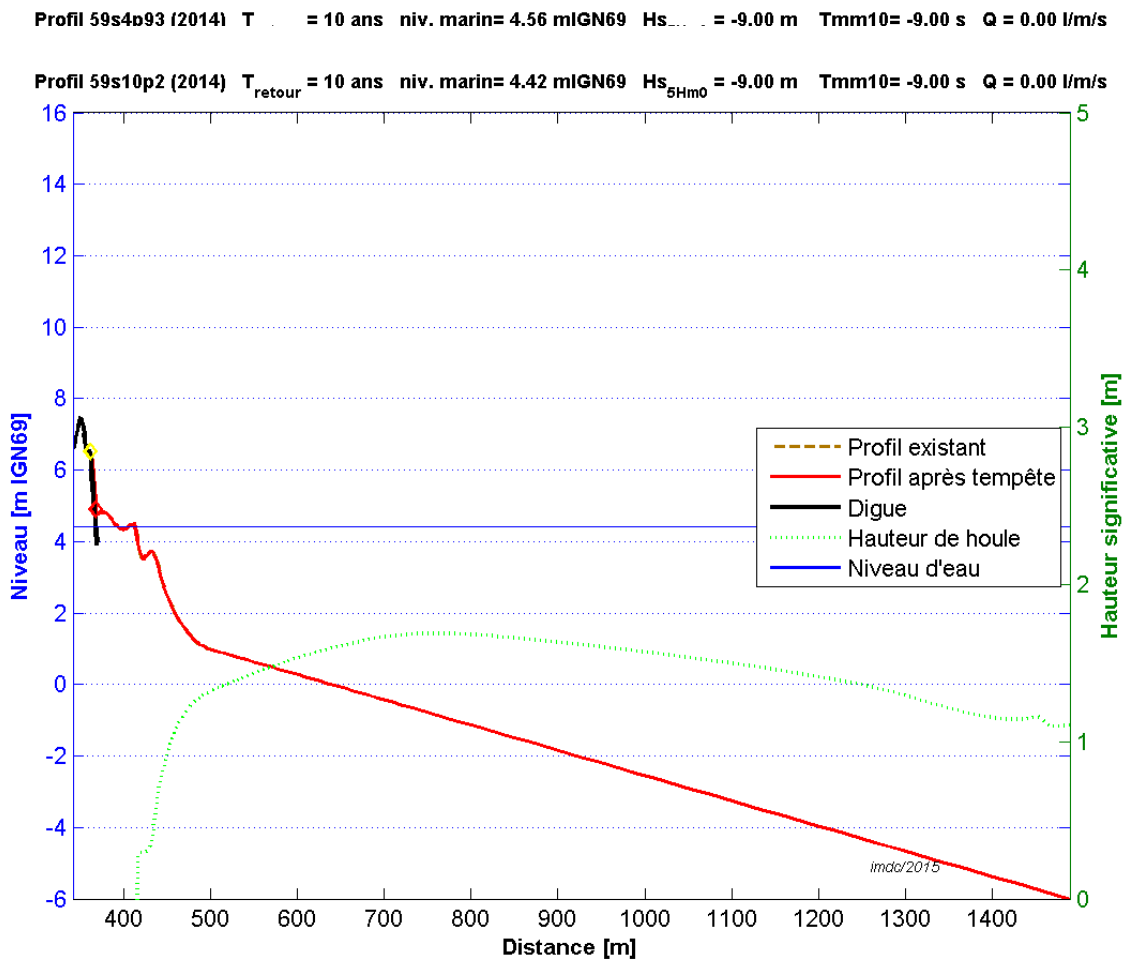


Figure V.85: Test de digue condition fréquente (T10), profil s10p10

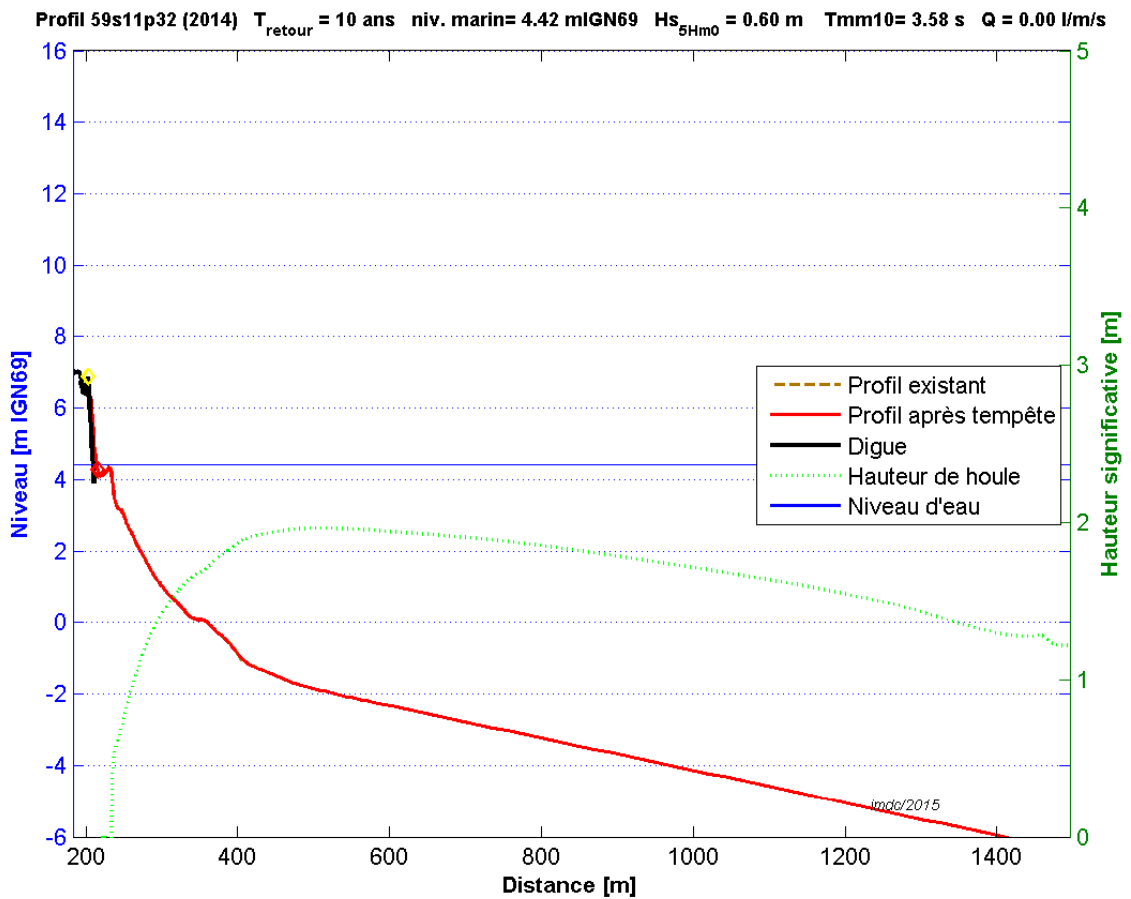


Figure V.86: Test de digue condition fréquente (T10), profil s11p32

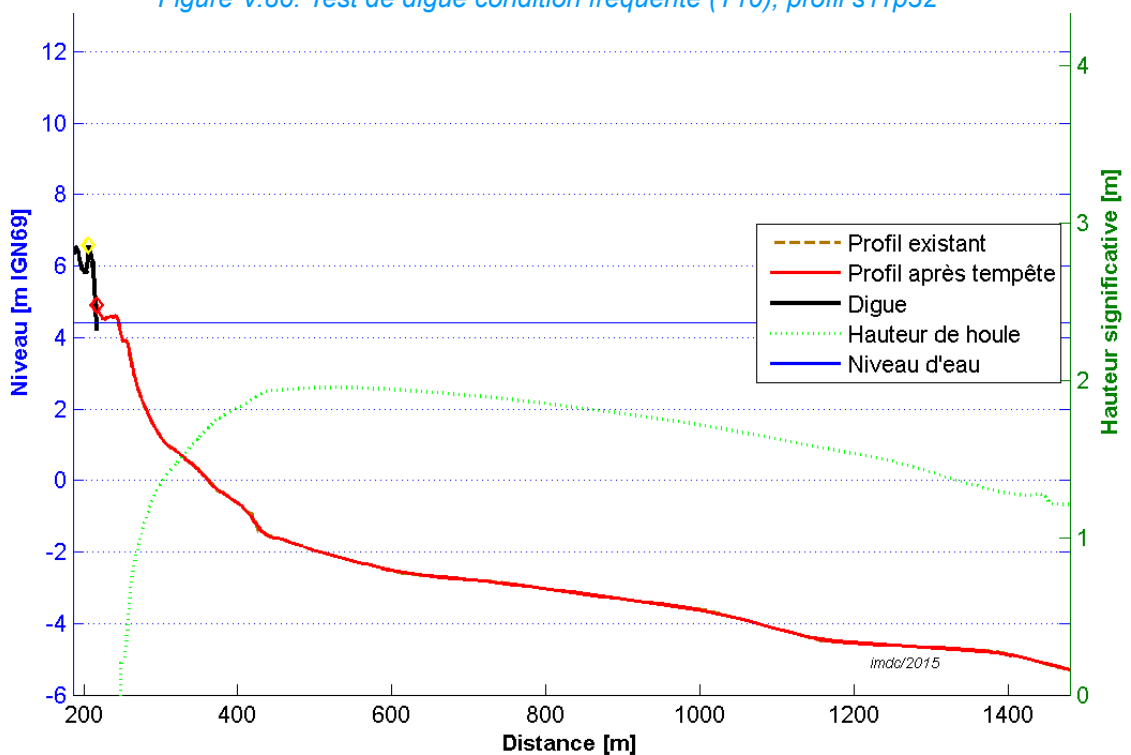


Figure V.87: Test de digue condition fréquente (T10), profil s11p37

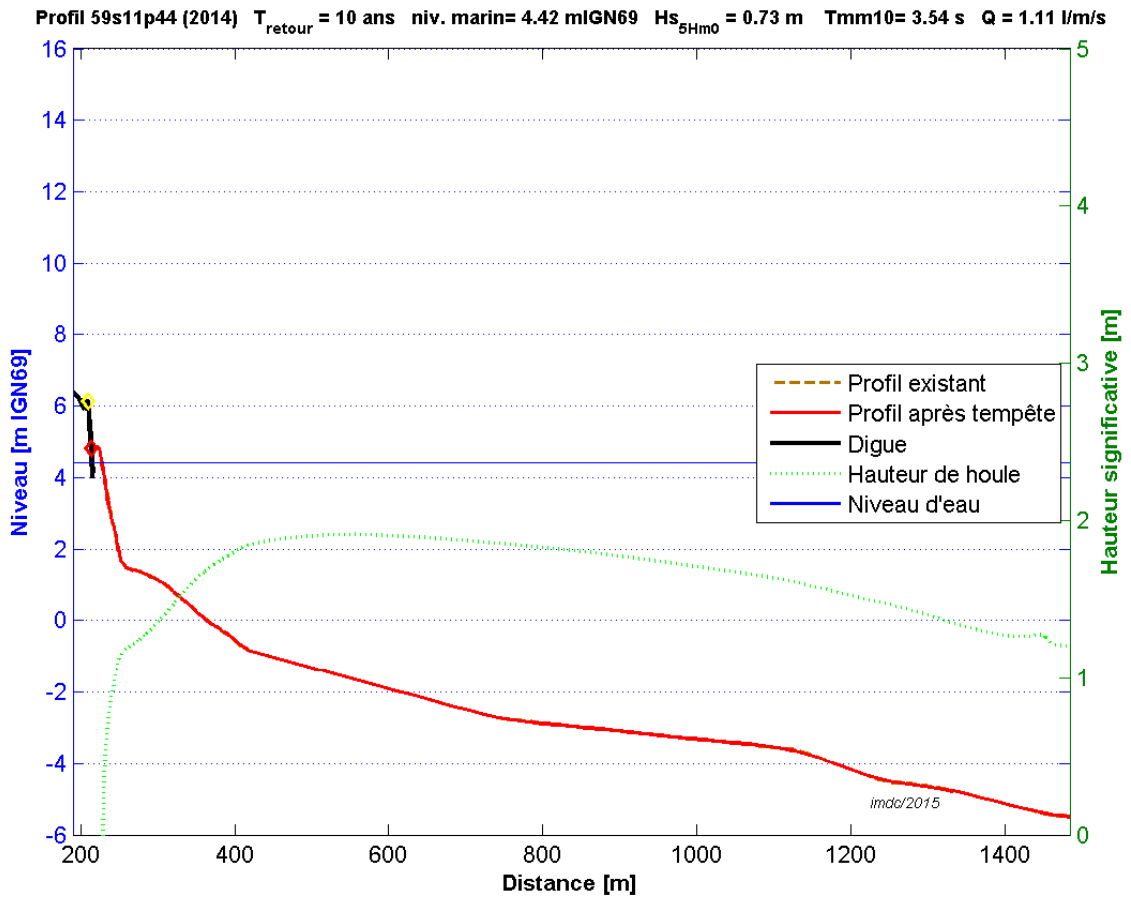


Figure V.88: Test de digue condition fréquente (T10), profil s11p44

D.4 Scénario extrême (T1000)

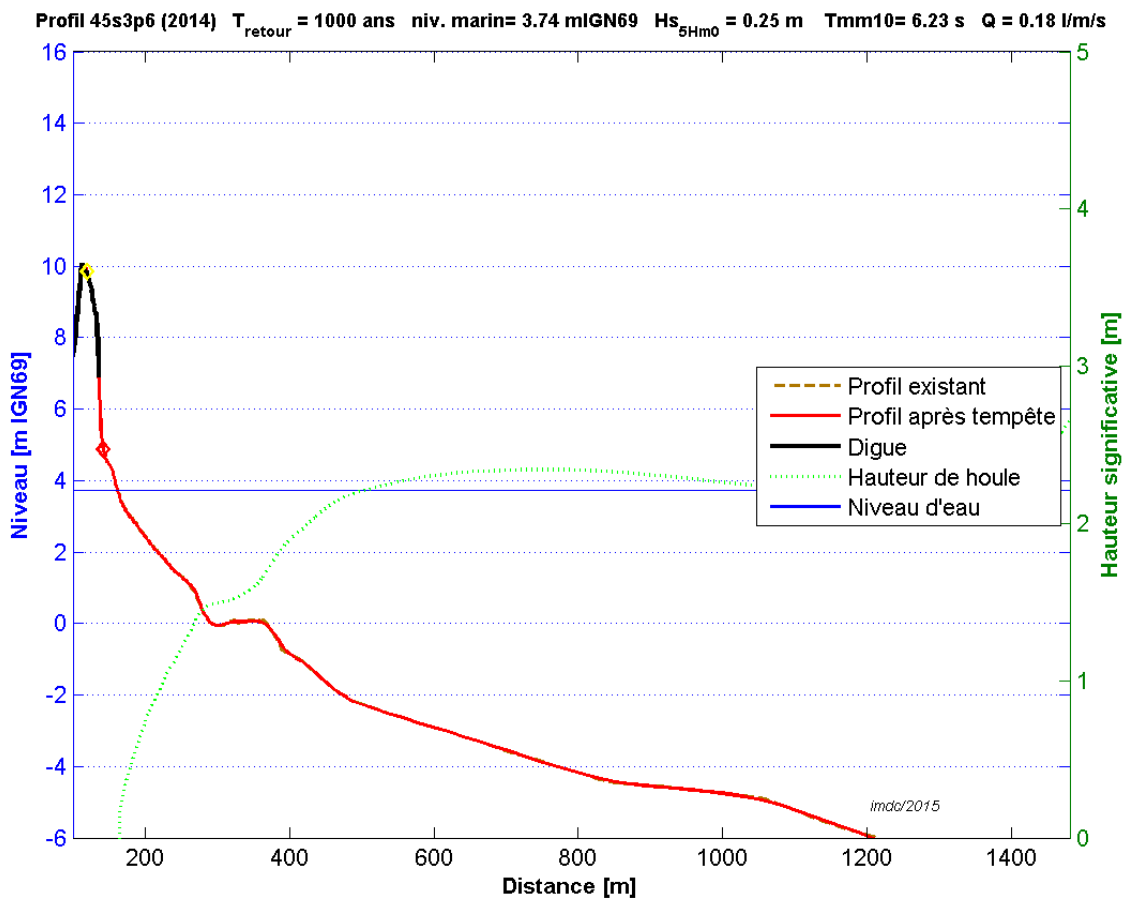


Figure V.89: Test de digue condition extrême (T1000), profil s3p6

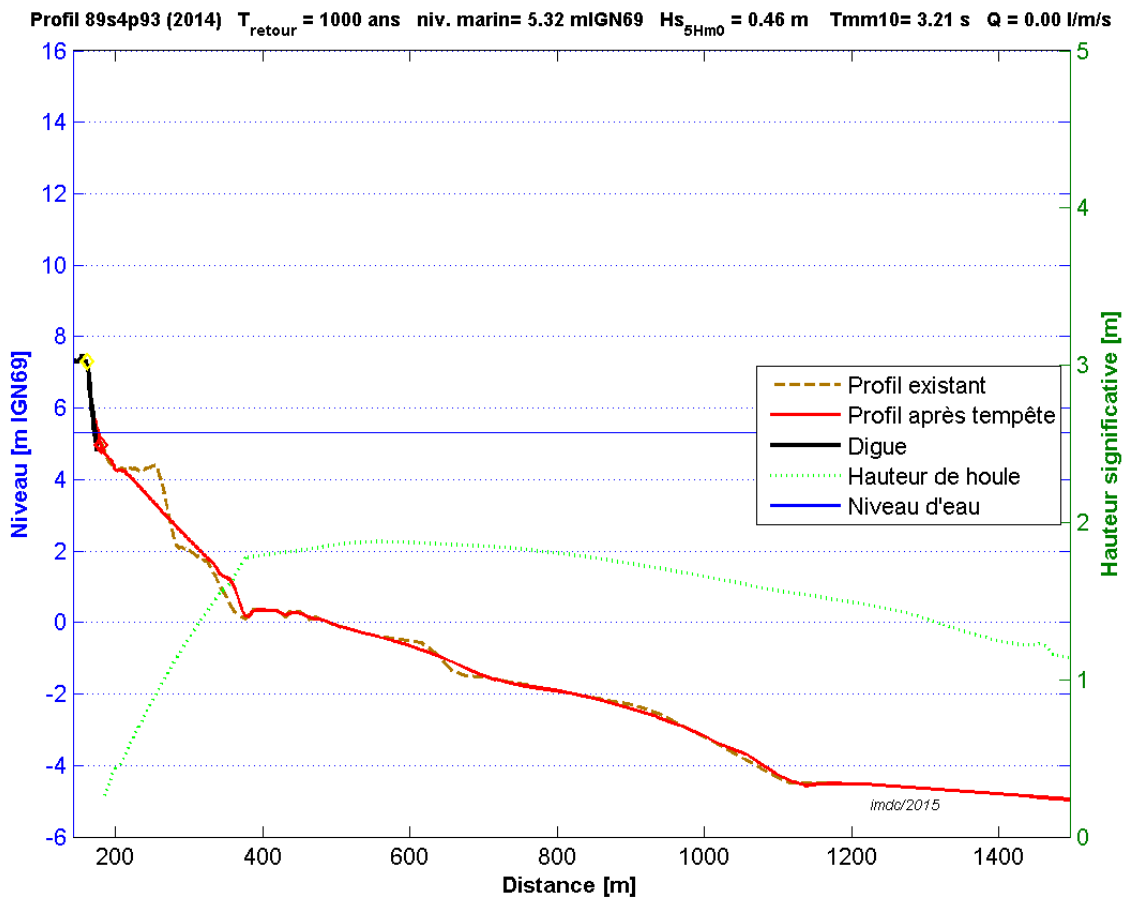


Figure V.90: Test de digue condition extrême (T1000), profil s4p93

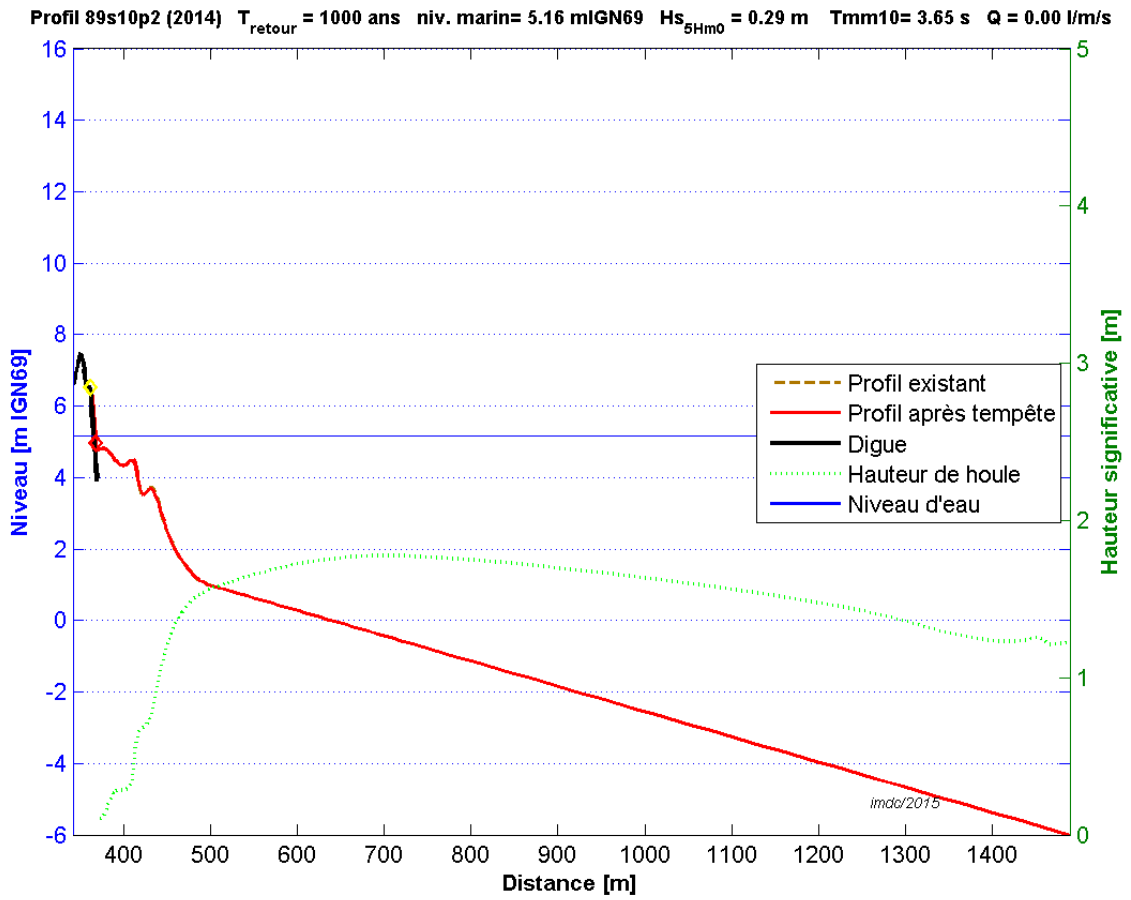


Figure V.91: Test de digue condition extrême (T1000), profil s10p2

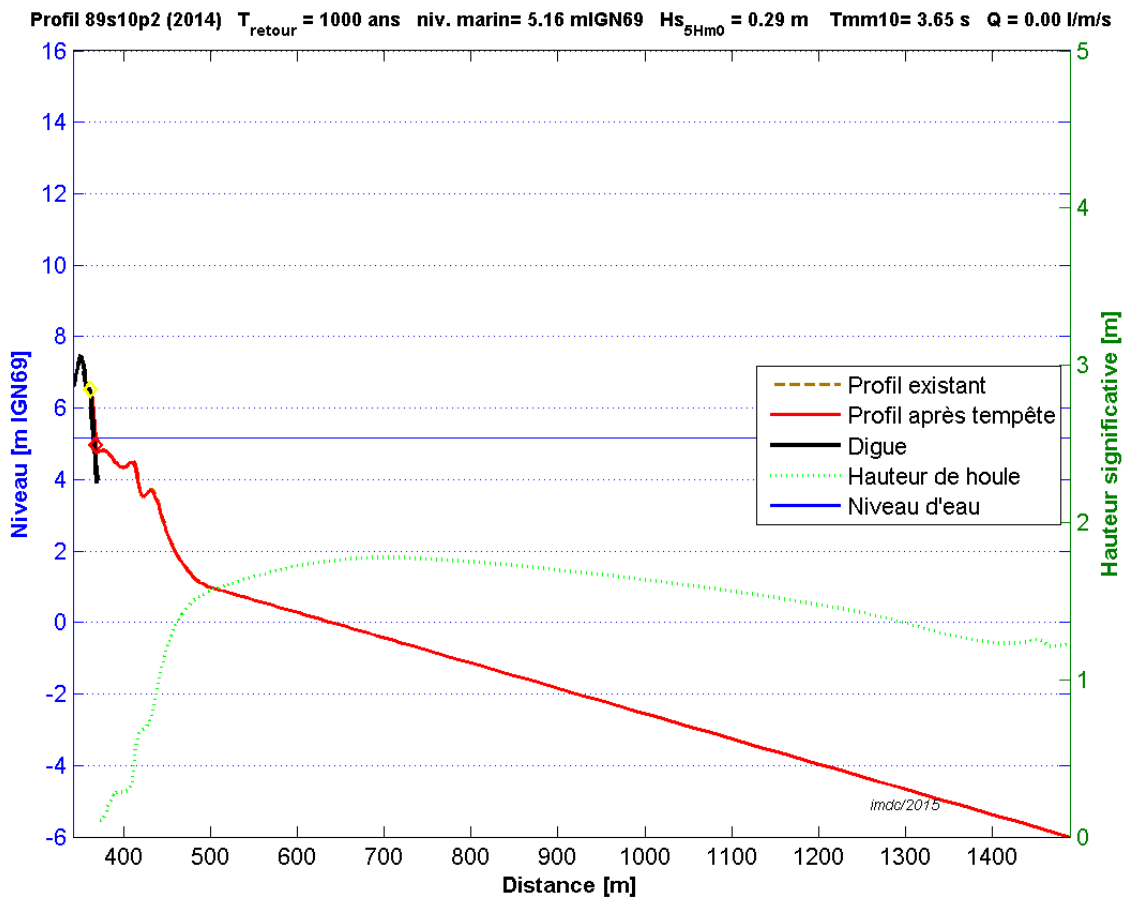


Figure V.92: Test de digue condition extrême (T1000), profil s10p2

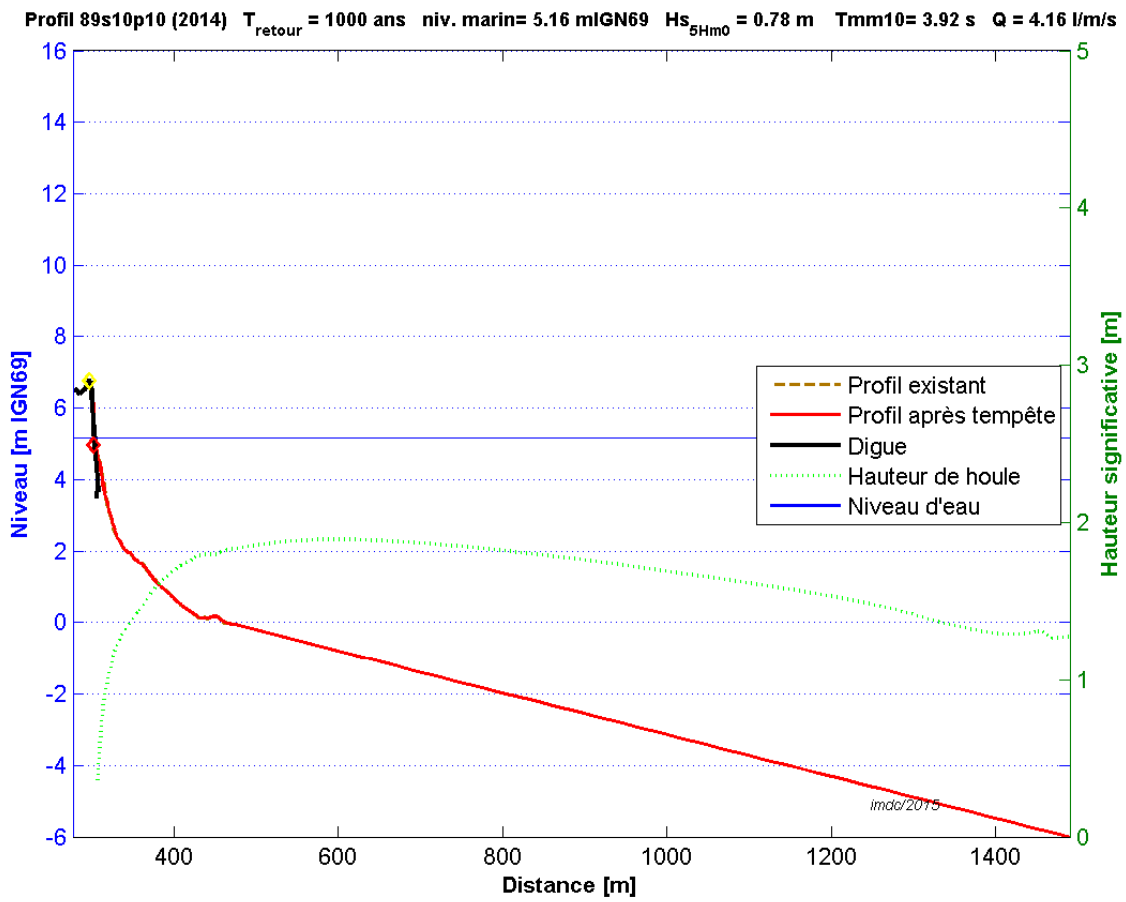


Figure V.93: Test de digue condition extrême (T1000), profil s10p10

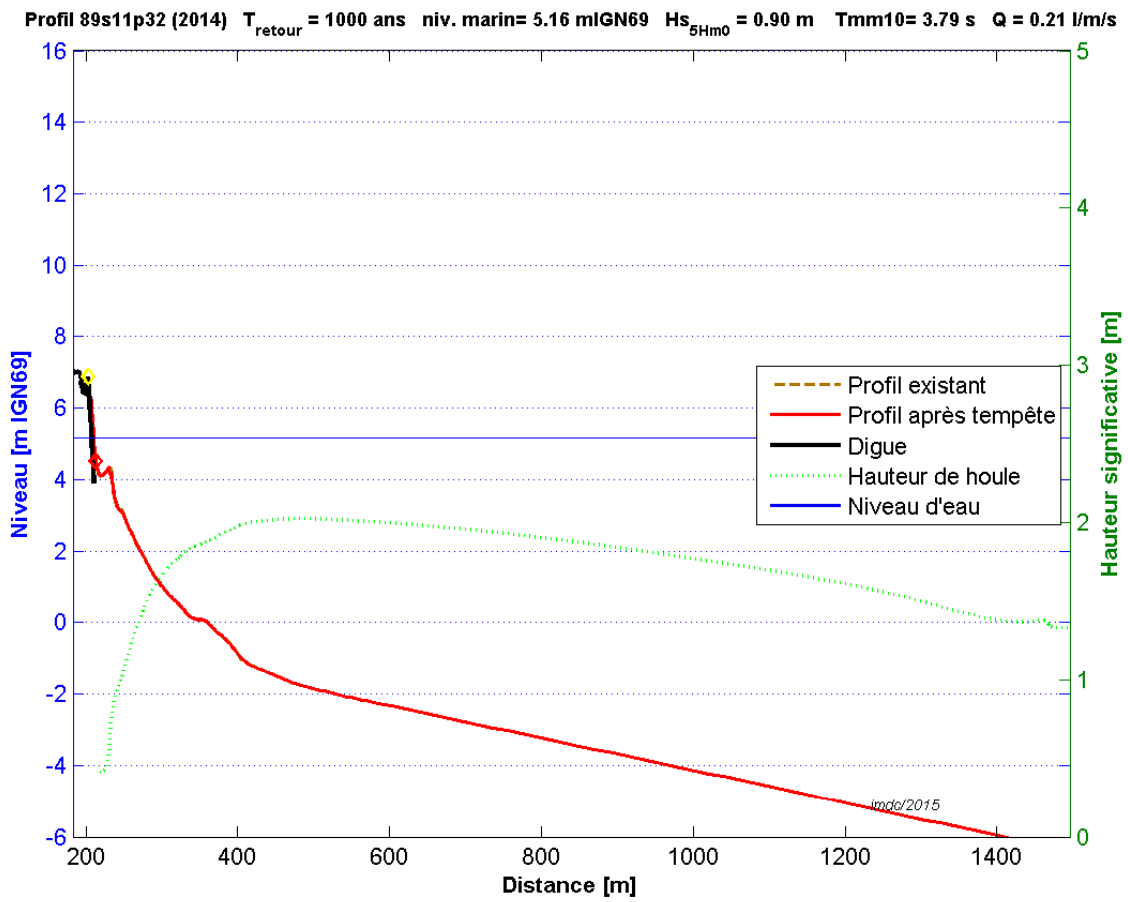


Figure V.94: Test de digue condition extrême (T1000), profil s11p32

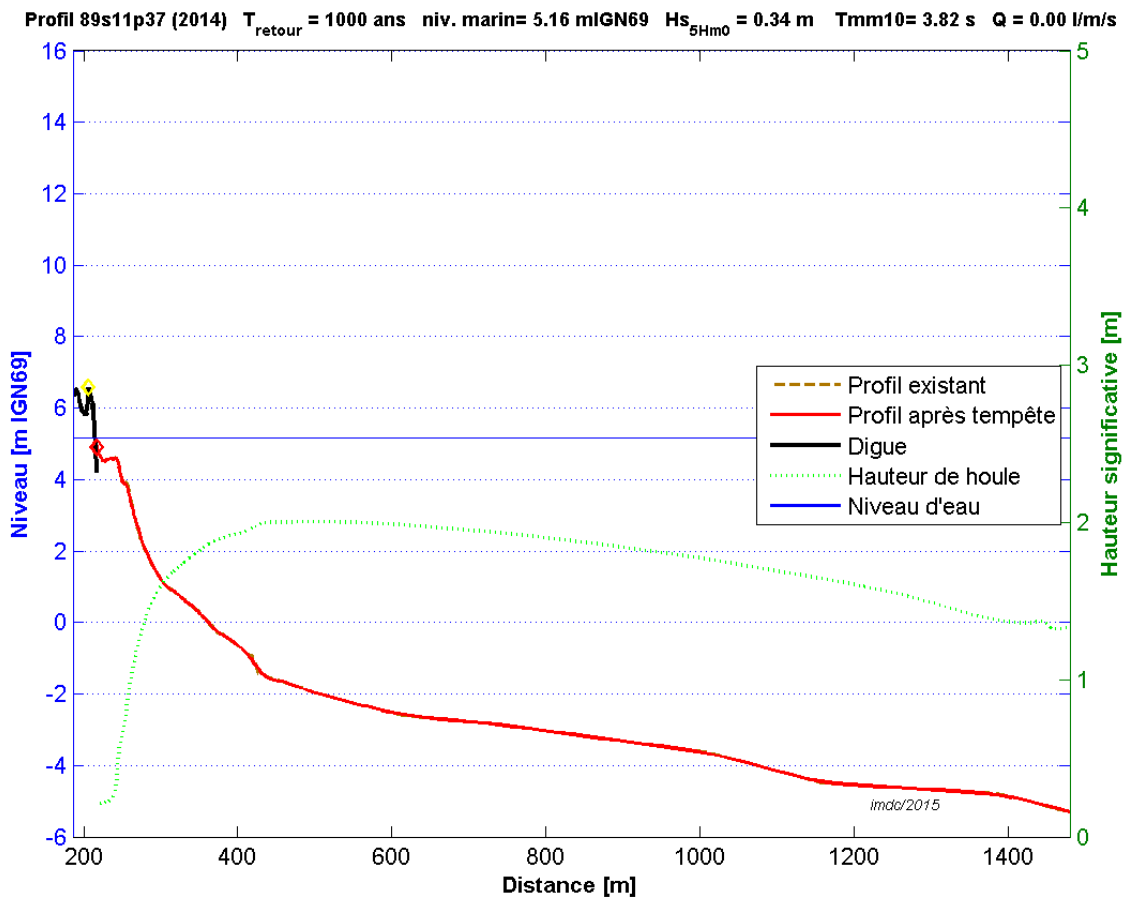


Figure V.95: Test de digue condition extrême (T1000), profil s11p37

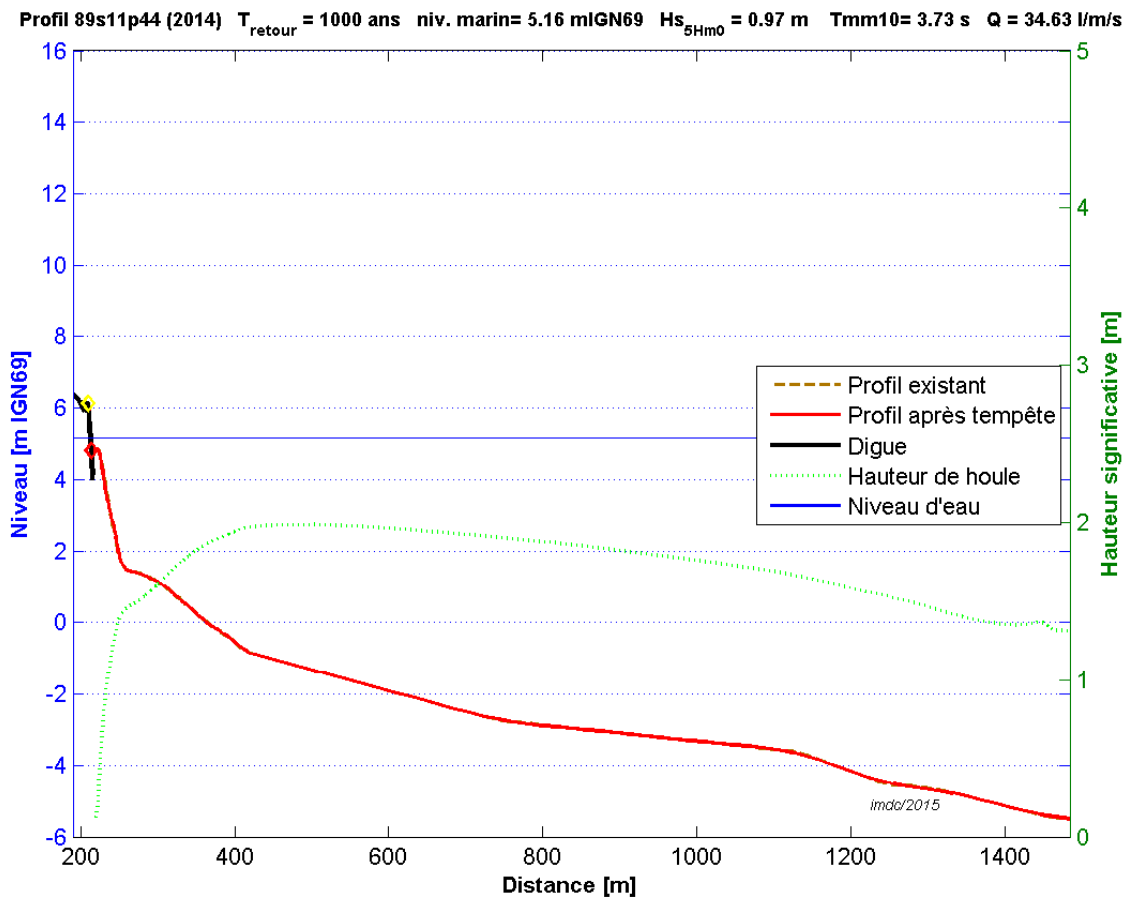


Figure V.96: Test de digue condition extrême (T1000), profil s11p44

Annexe E : Résultats test de dunes Secteur Bessin

Marais de l'Édit (Bernières-Courseulles)

Scénario à échéance 100 ans (T100 +60cm)

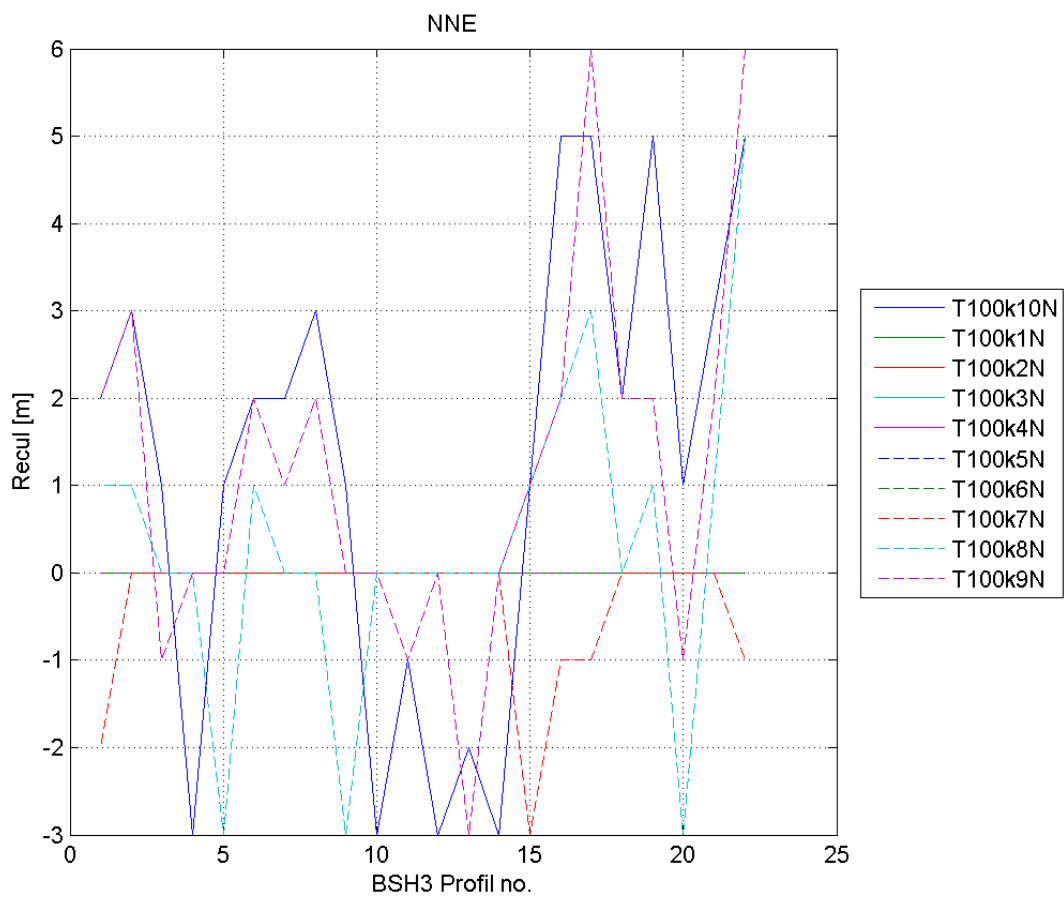


Figure 1: Recul ponctuel, marais de l'Édit, conditions de référence +60cm NNE

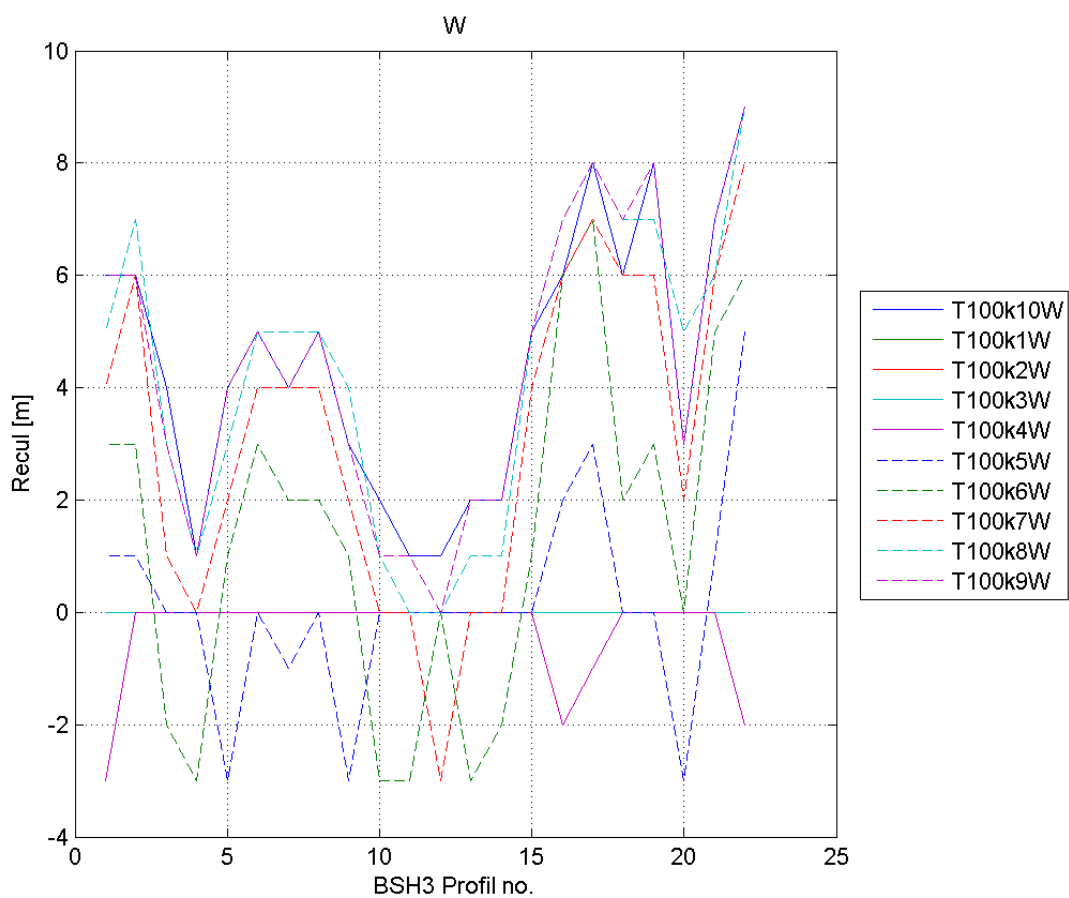


Figure 2: Recul ponctuel, marais de l'Edit, conditions de référence +60cm Ouest

Scénario fréquent (T10)

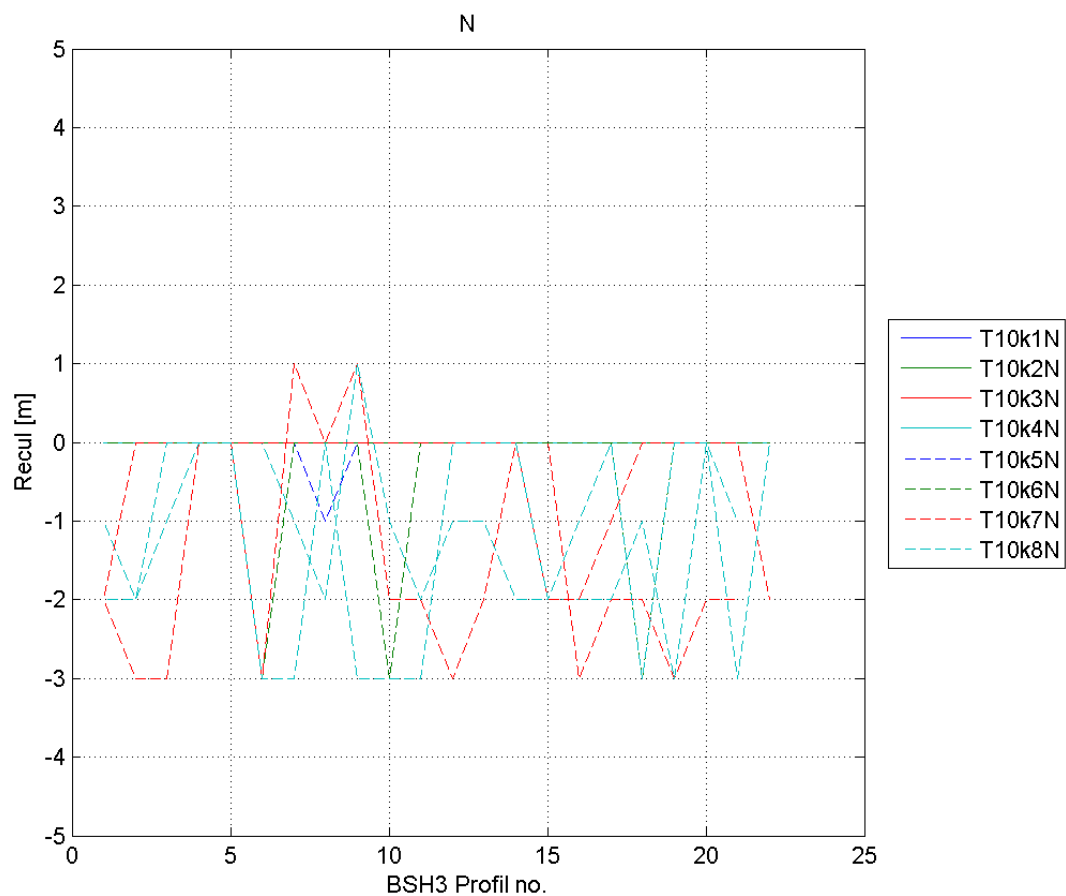


Figure 3: Recul ponctuel, marais de l'Edit, conditions fréquentes (T10) NNE

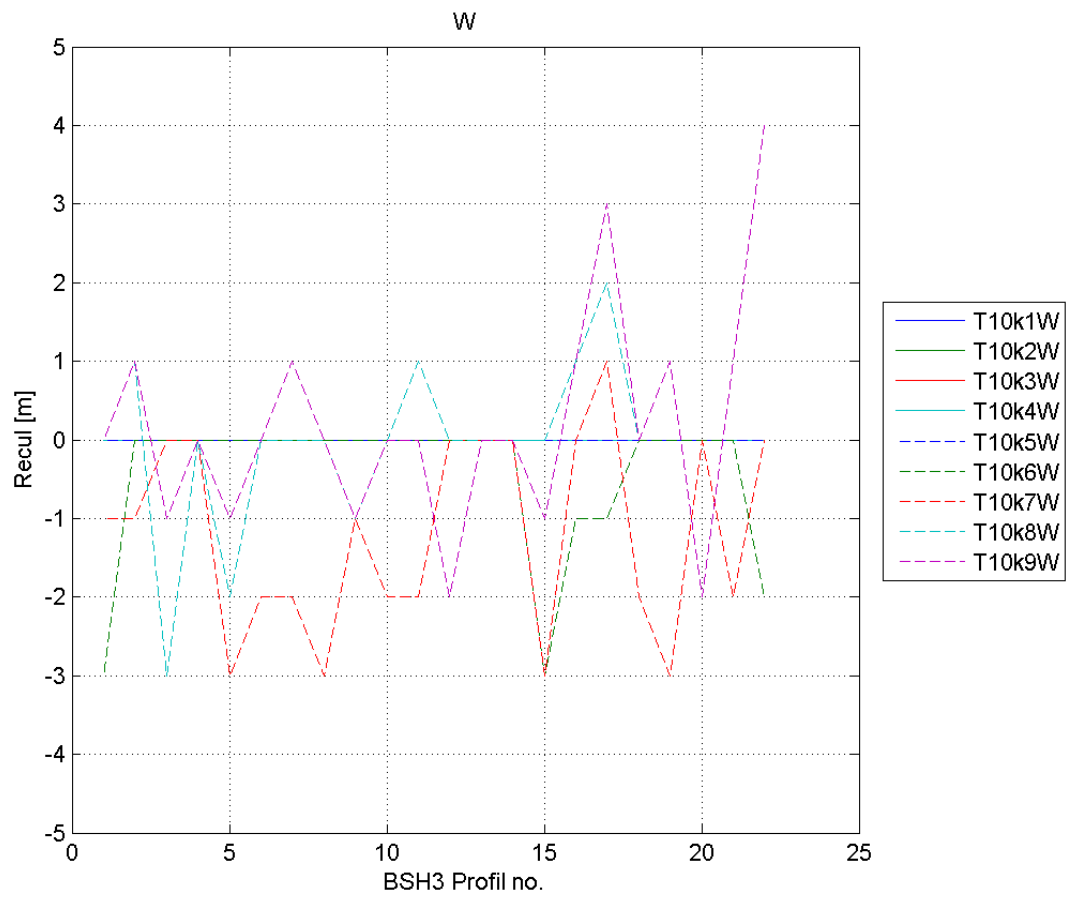


Figure 4: Recul ponctuel, marais de l'Edit, conditions fréquentes (T10) Ouest

Scénario extrême (T1000)

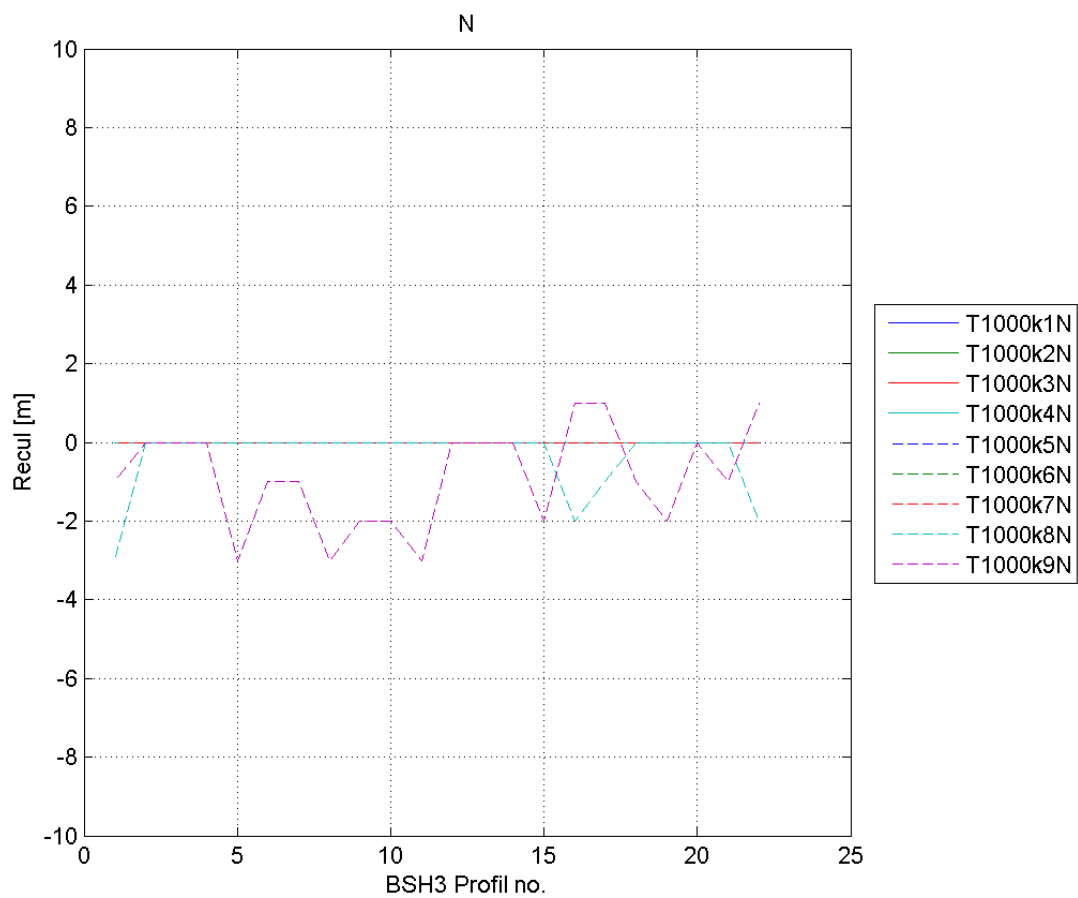


Figure 5: Recul ponctuel, marais de l'Edit, conditions extrêmes (T1000) NNE

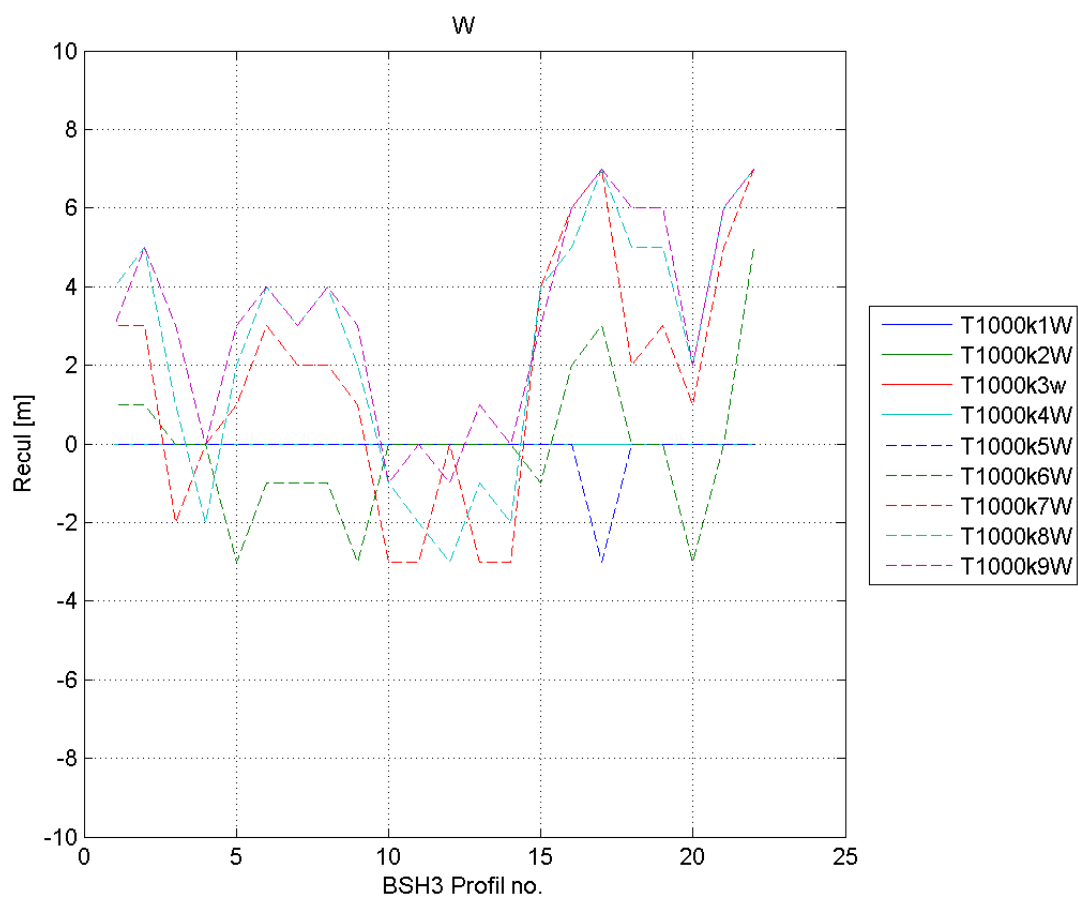


Figure 6: Recul ponctuel, marais de l'Edit, conditions extrêmes (T1000) Ouest

Marais de Graye- et Ver-sur-Mer

Scénario à échéance 100 ans (T100 +60cm)

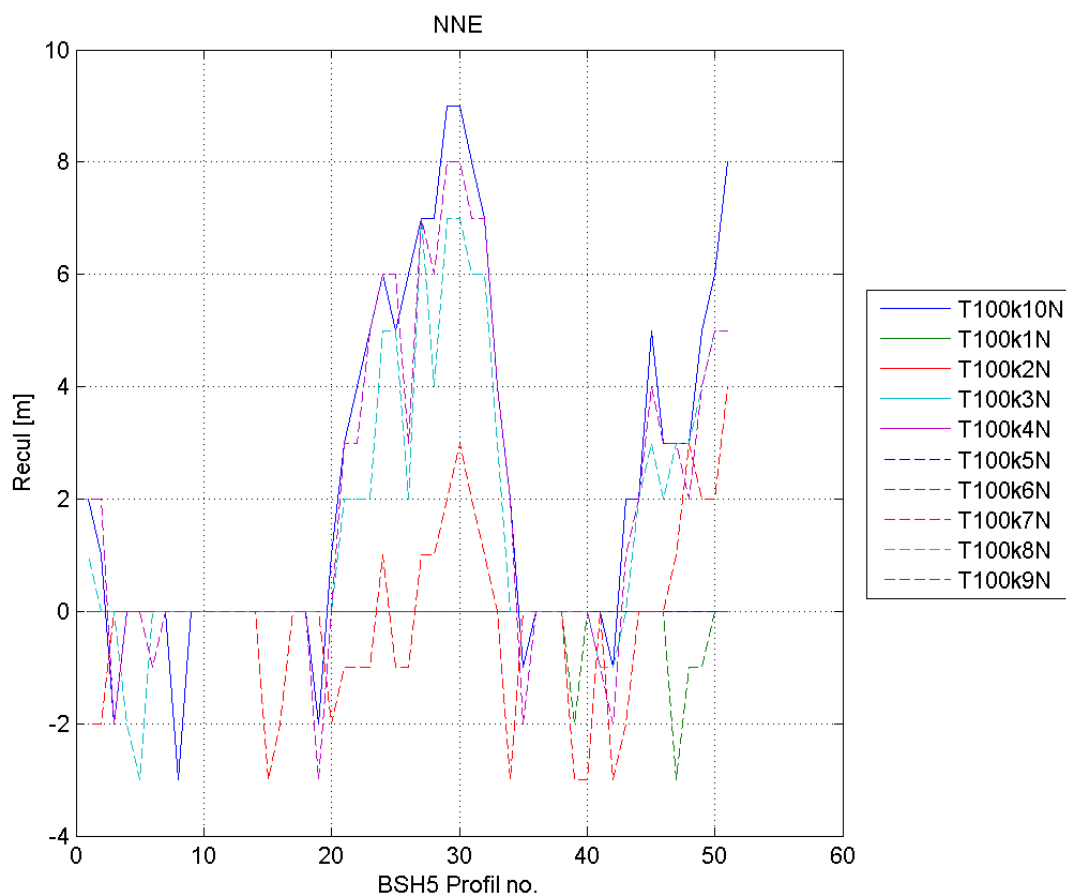


Figure 1: Recul ponctuel, marais de Graye et Ver, conditions de référence +60cm, NNE

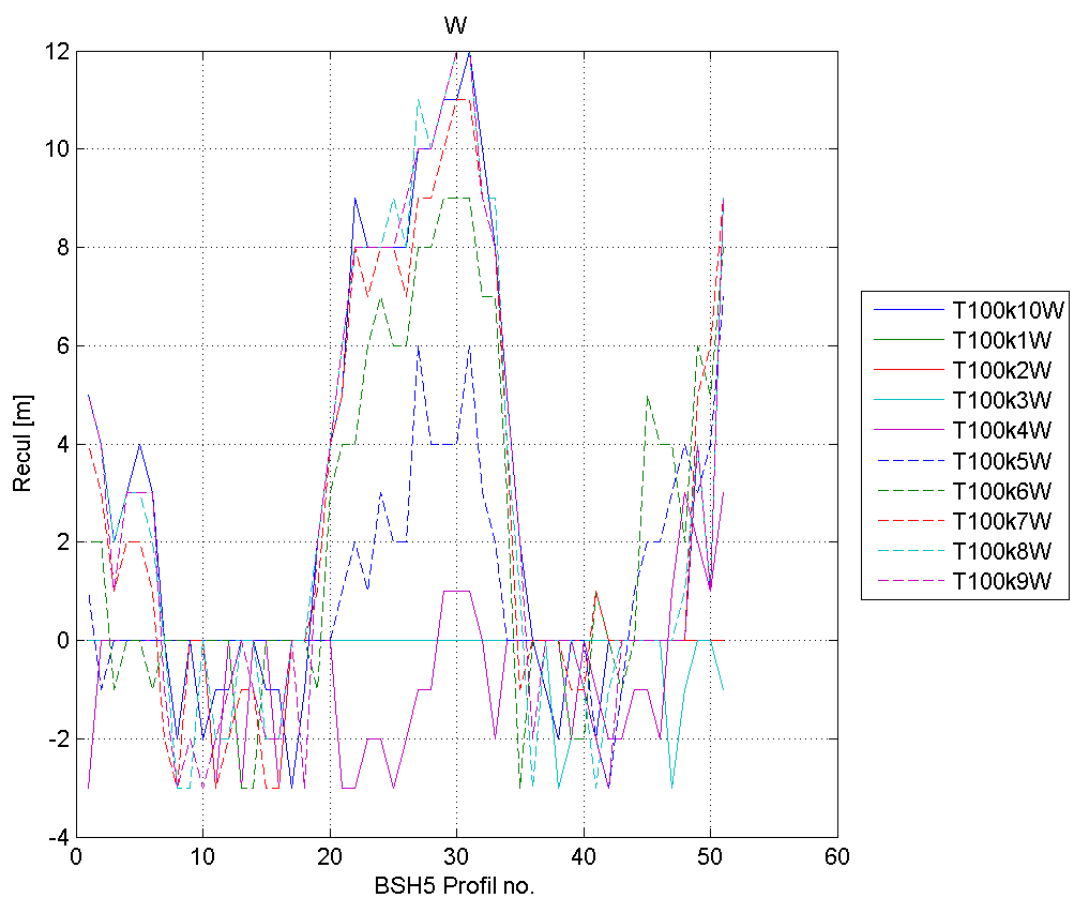


Figure 2: Recul ponctuel, marais de Graye et Ver, conditions de référence +60cm, Ouest

Scénario fréquent (T10)

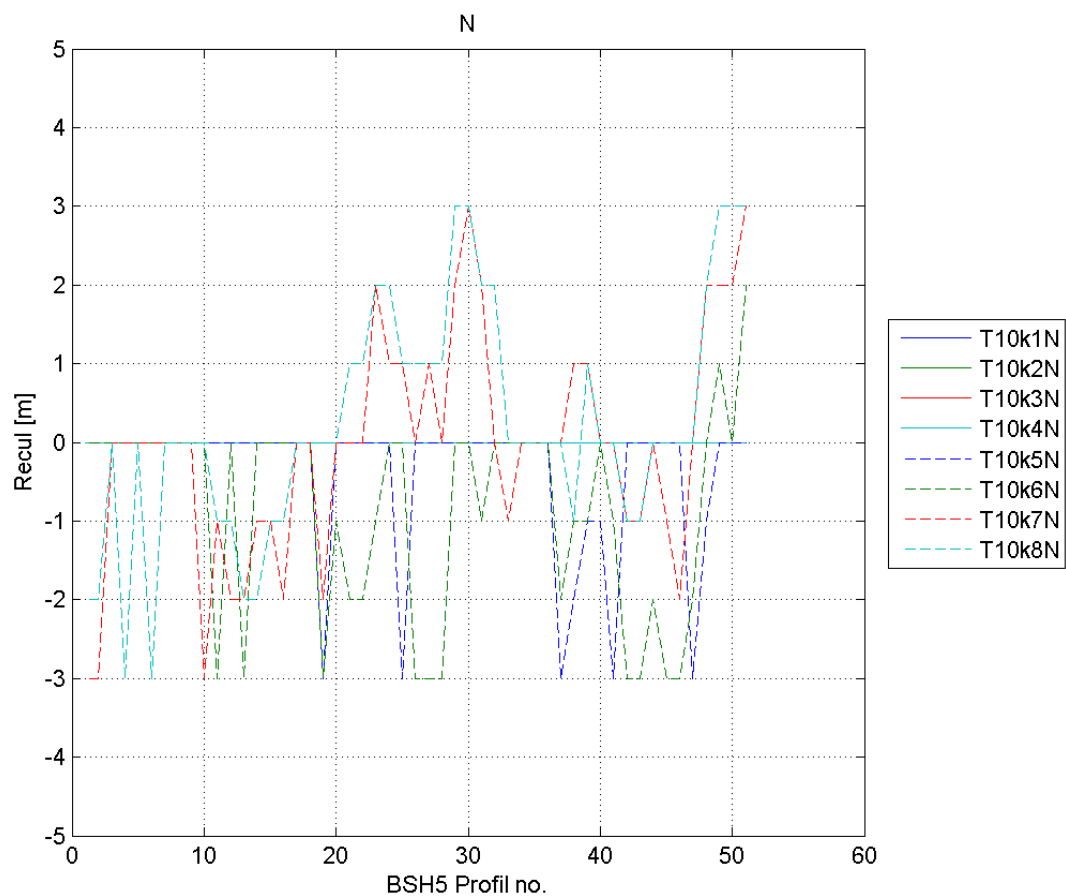


Figure 3: Recul ponctuel, marais de Graye et Ver, conditions fréquentes (T10), NNE

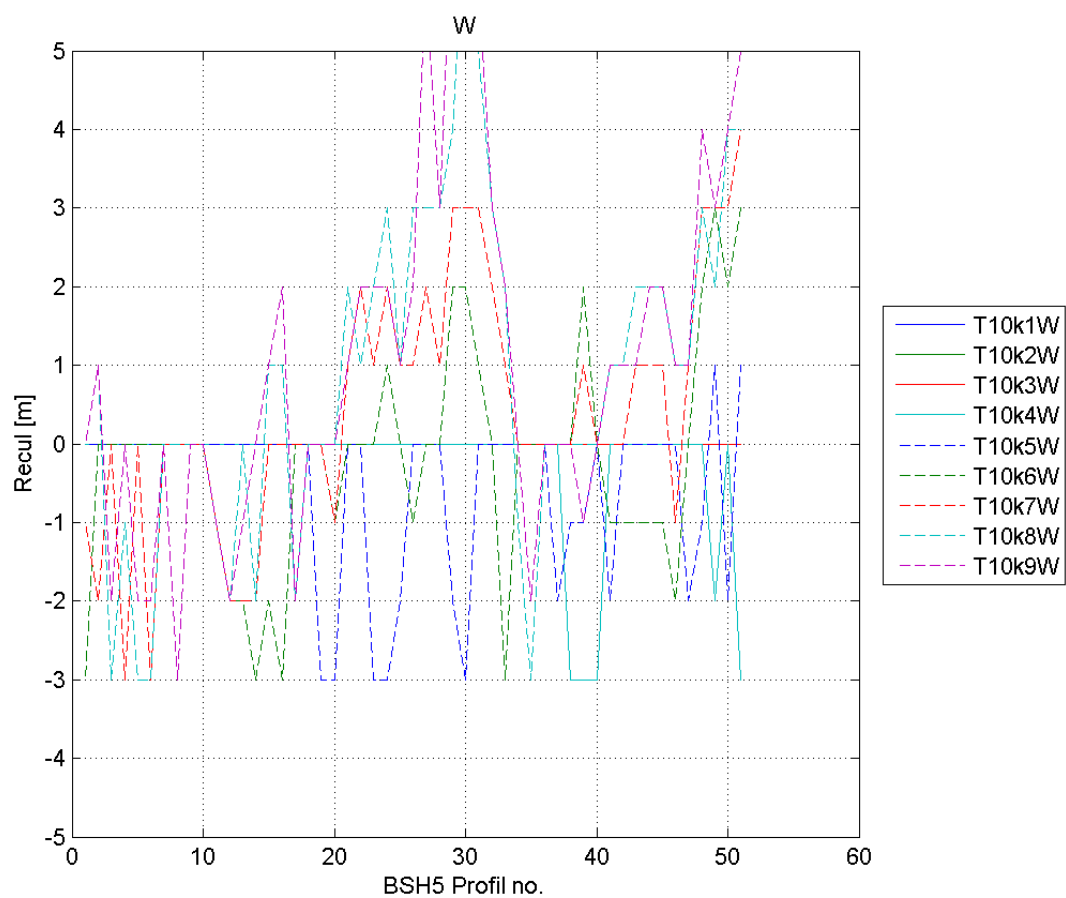


Figure 4: Recul ponctuel, marais de Graye et Ver, conditions fréquentes (T10), Ouest

Scénario extrême (T1000)

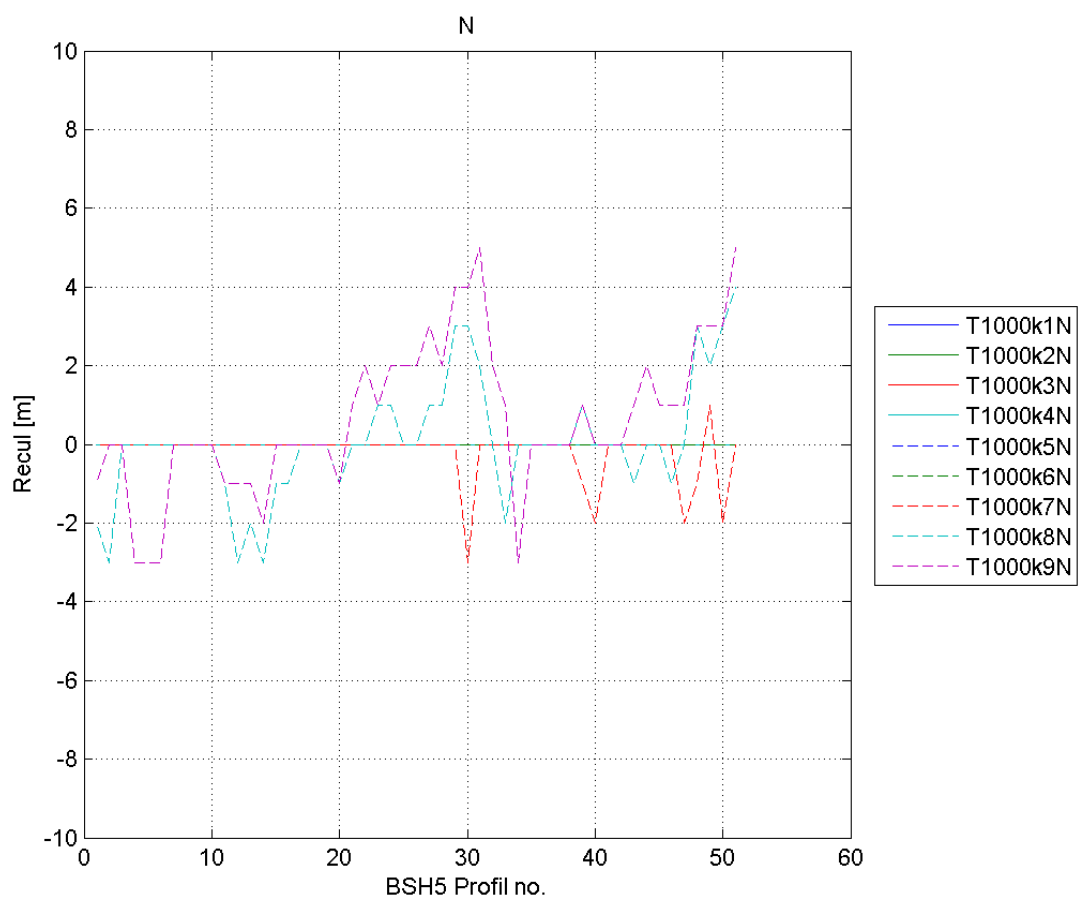


Figure 5: Recul ponctuel, marais de Graye et Ver, conditions extrêmes (T1000), NNE

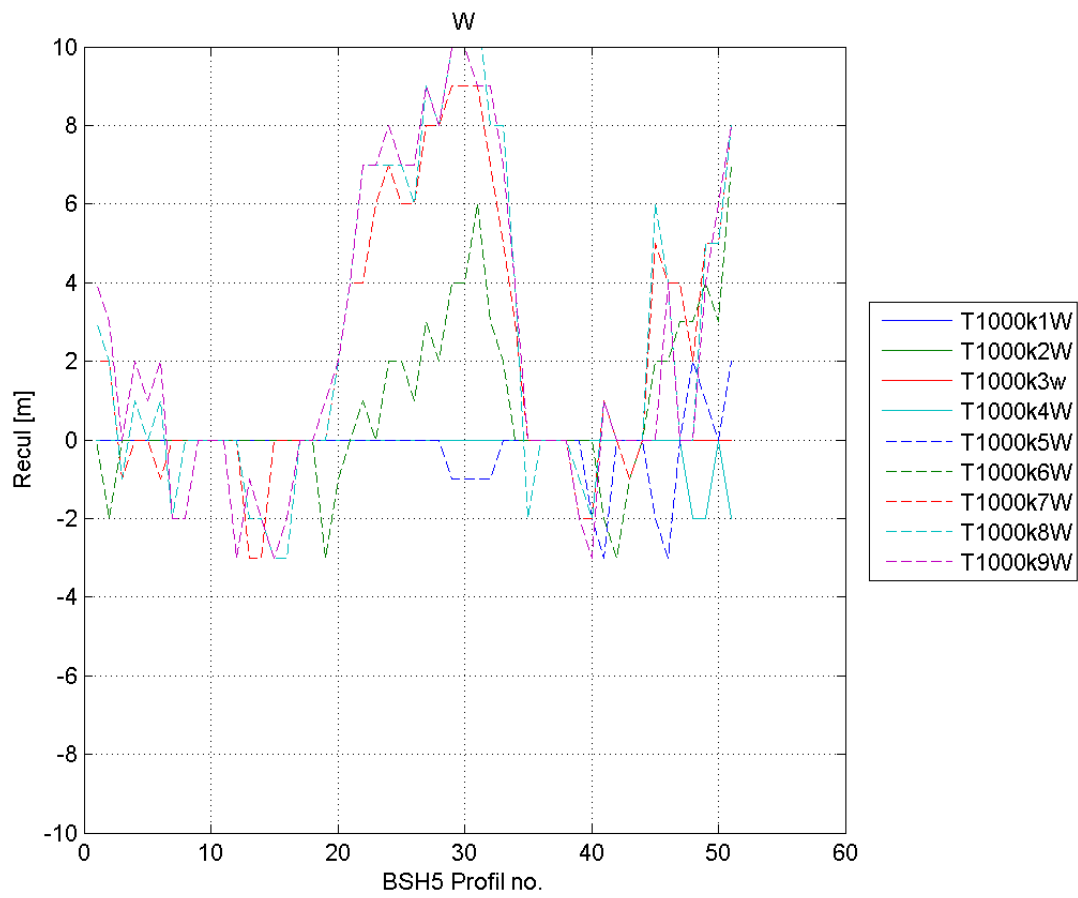


Figure 6: Recul ponctuel, marais de Graye et Ver, conditions extrêmes (T1000), Ouest

Marais de Ver-s/M et Meuvaines

Scénario à échéance 100 ans (T100 +60cm)

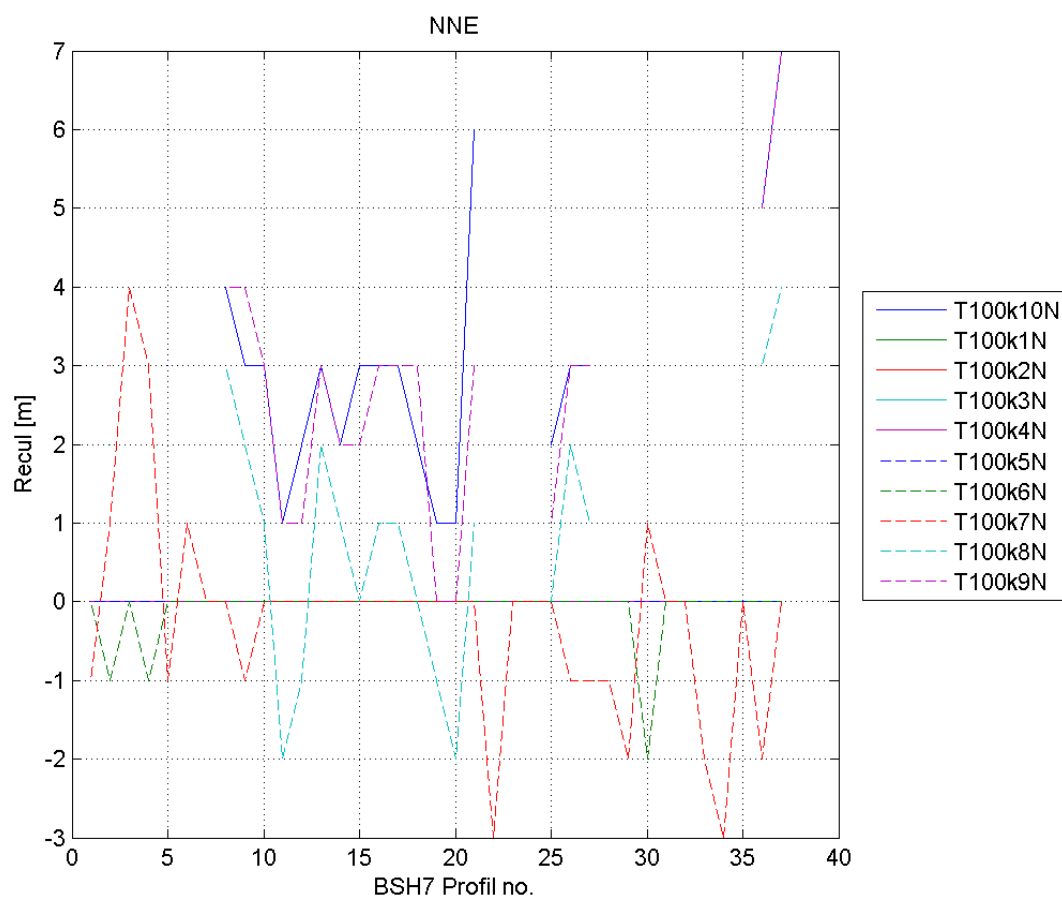


Figure 1: Recul ponctuel, marais de Ver, conditions de référence +60cm, NNE

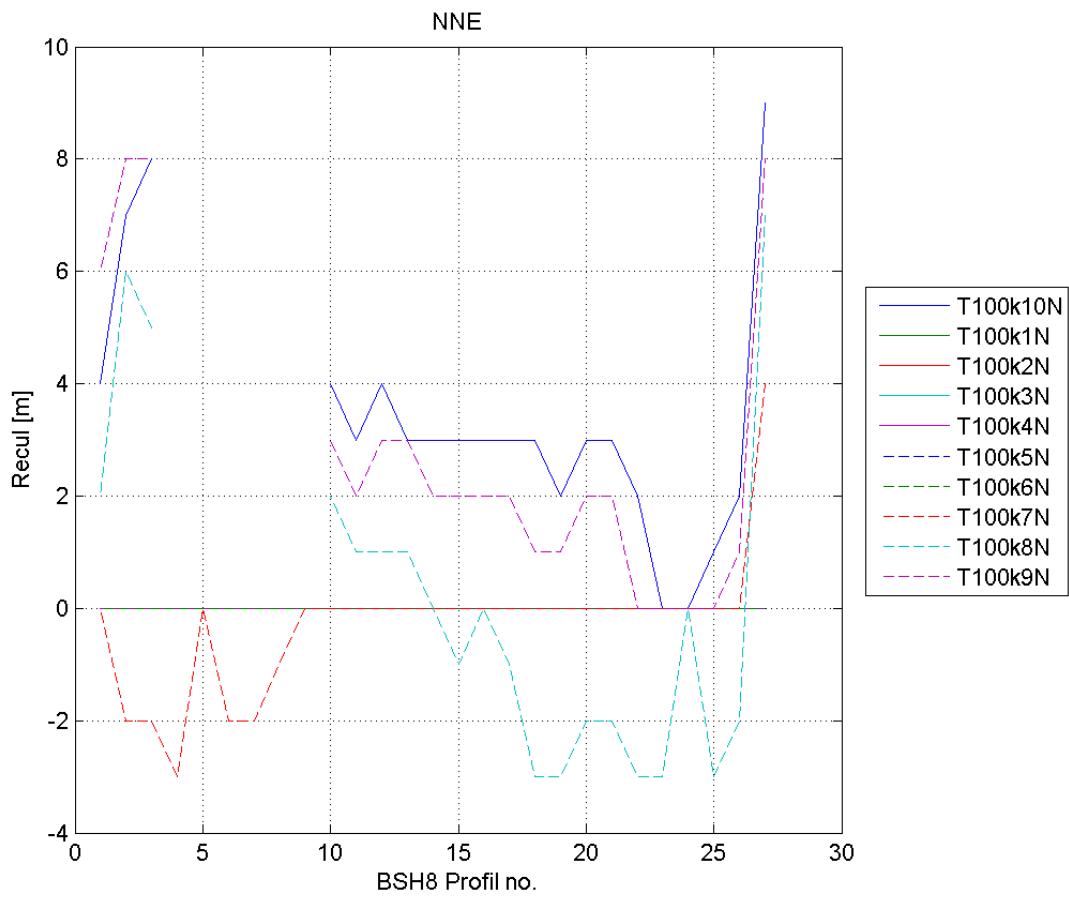


Figure 2: Recul ponctuel, marais de Meuvaines, conditions de référence +60cm, NNE

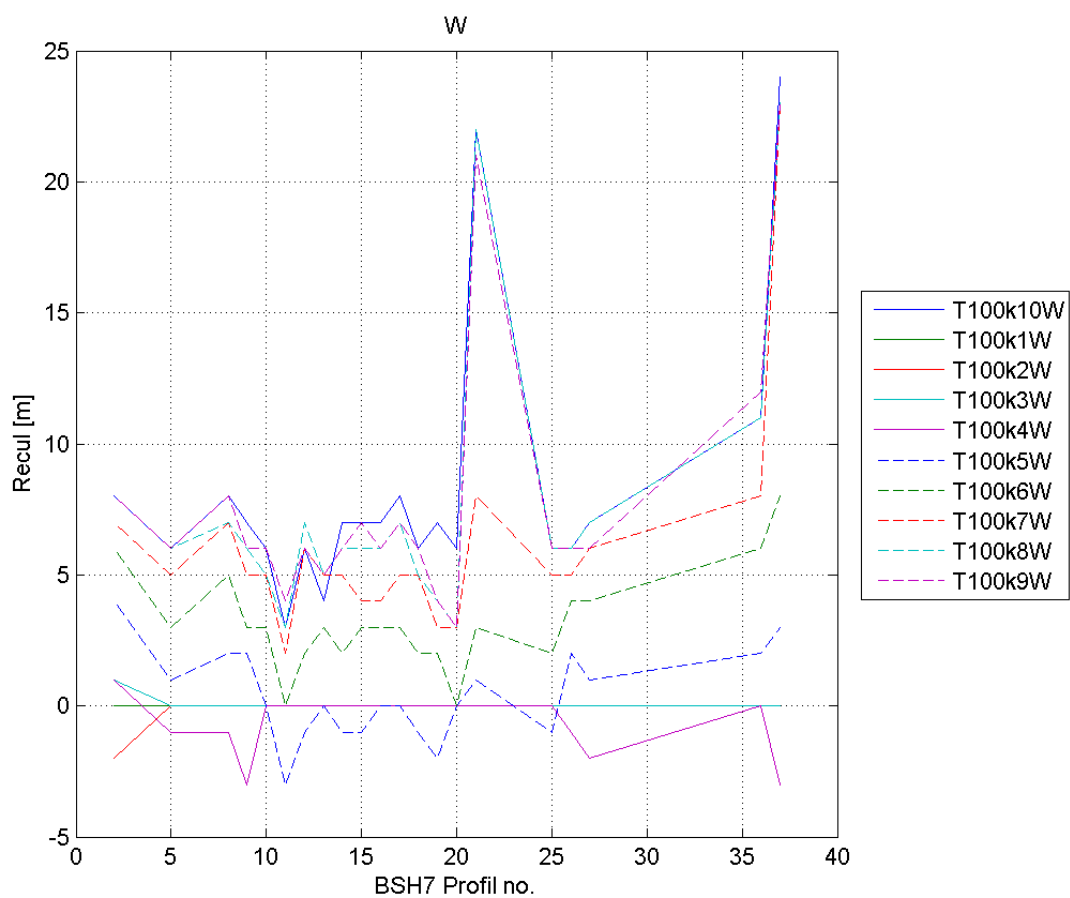


Figure 3: Recul ponctuel, marais de Ver, conditions de référence +60cm, Ouest

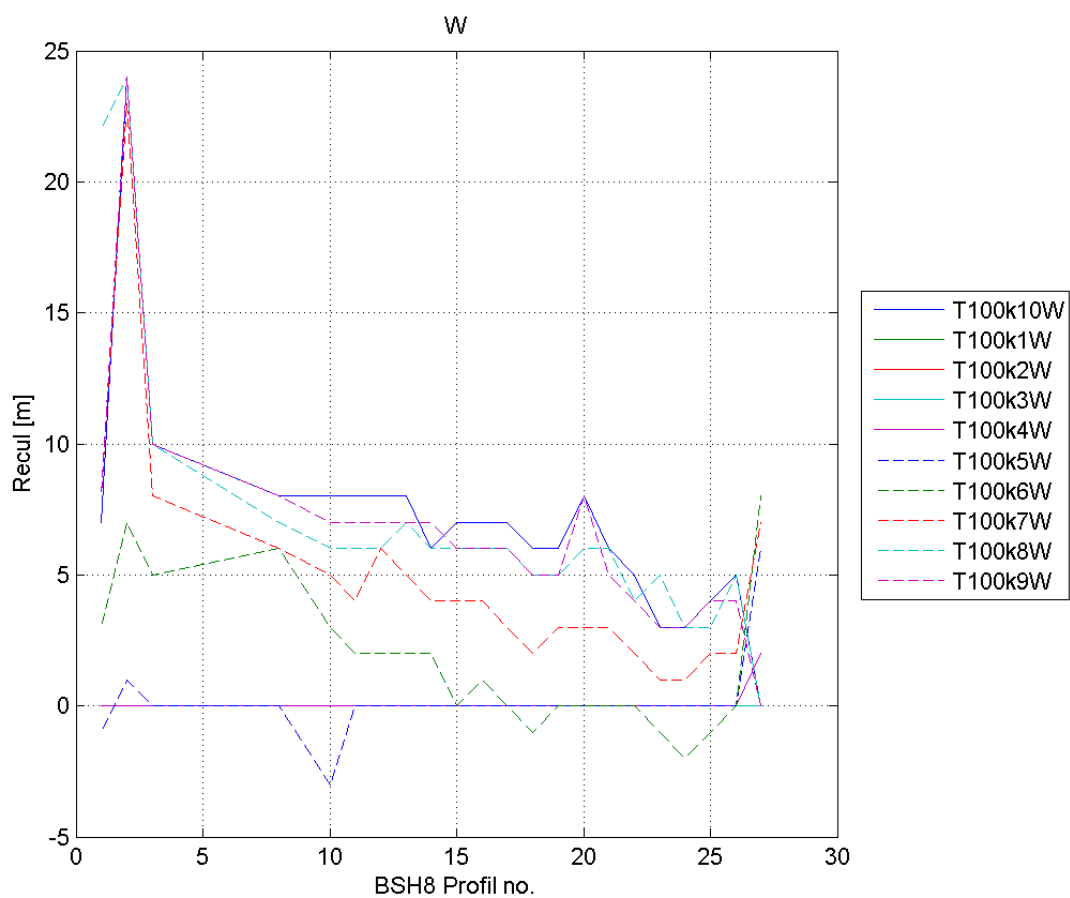


Figure 4: Recul ponctuel, marais de Meuvaines, conditions de référence +60cm, Ouest

Scénario fréquent (T10)

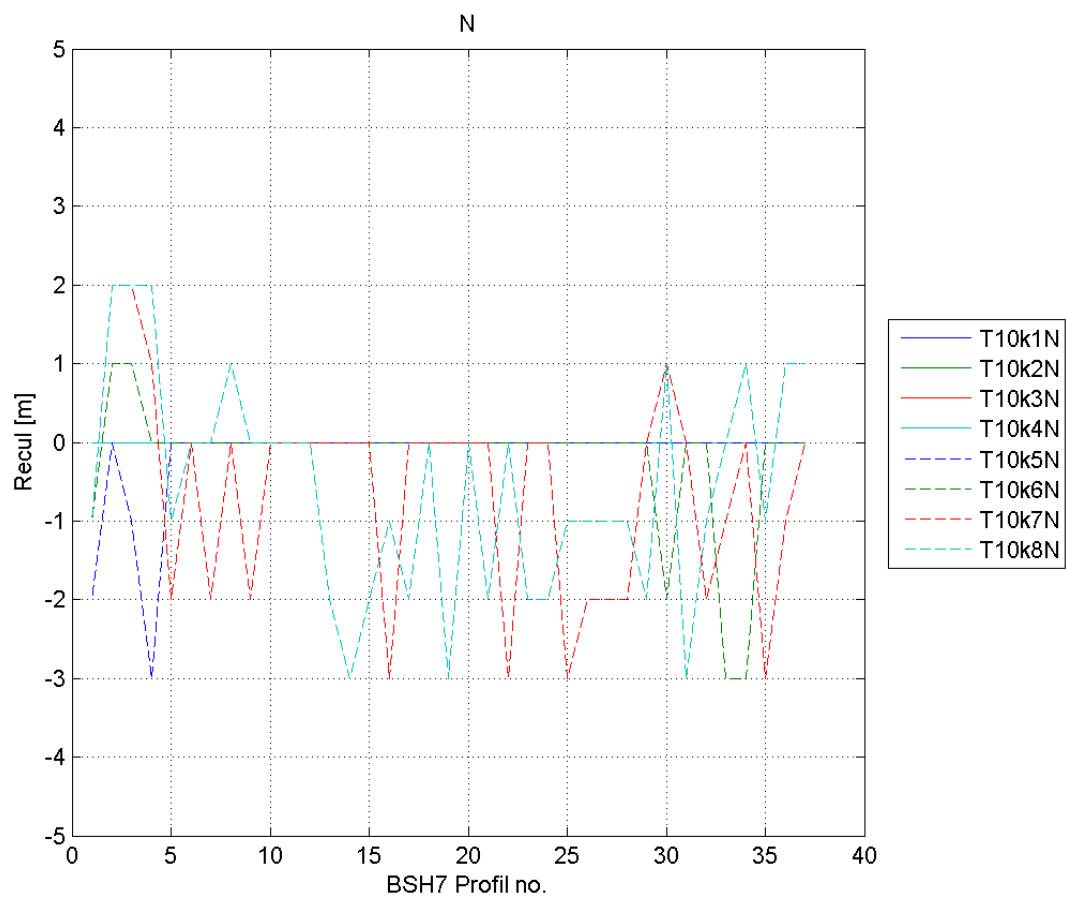


Figure 5: Recul ponctuel, marais de Ver, conditions fréquentes (T10), NNE

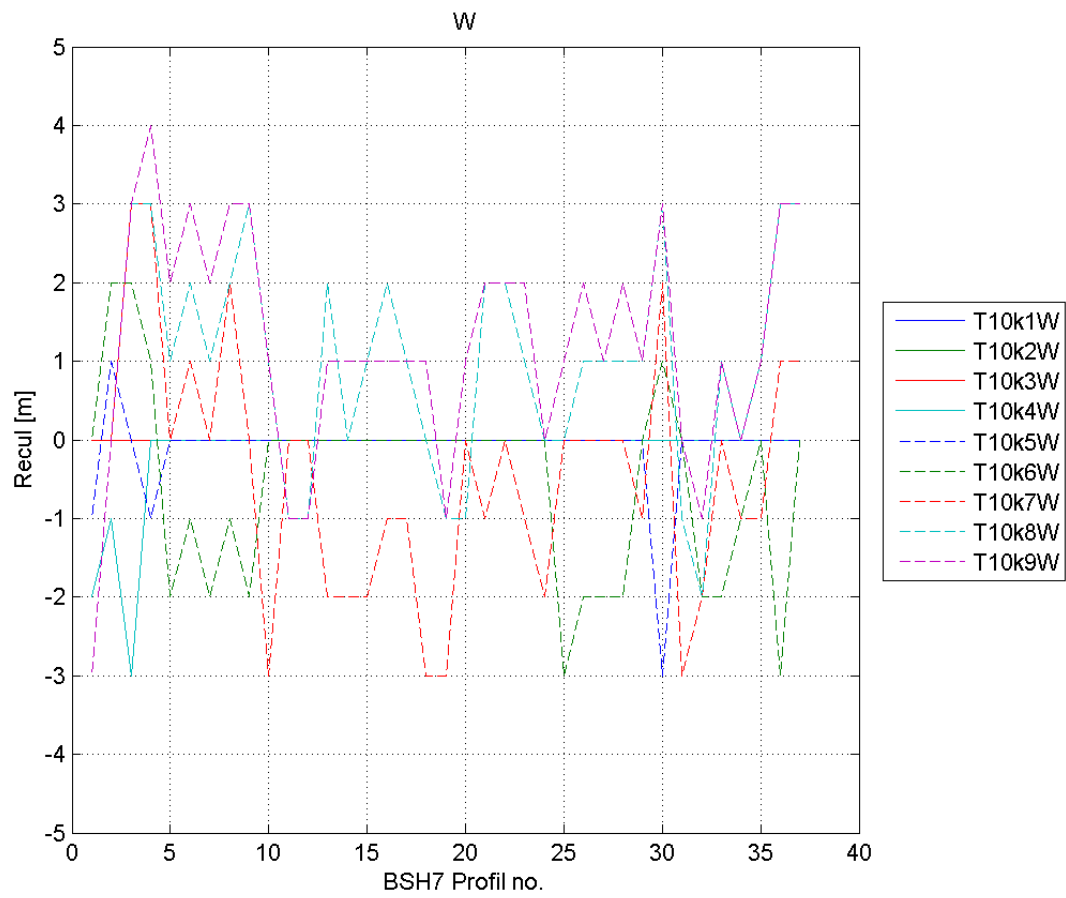


Figure 6: Recul ponctuel, marais de Ver, conditions fréquentes (T10), Ouest

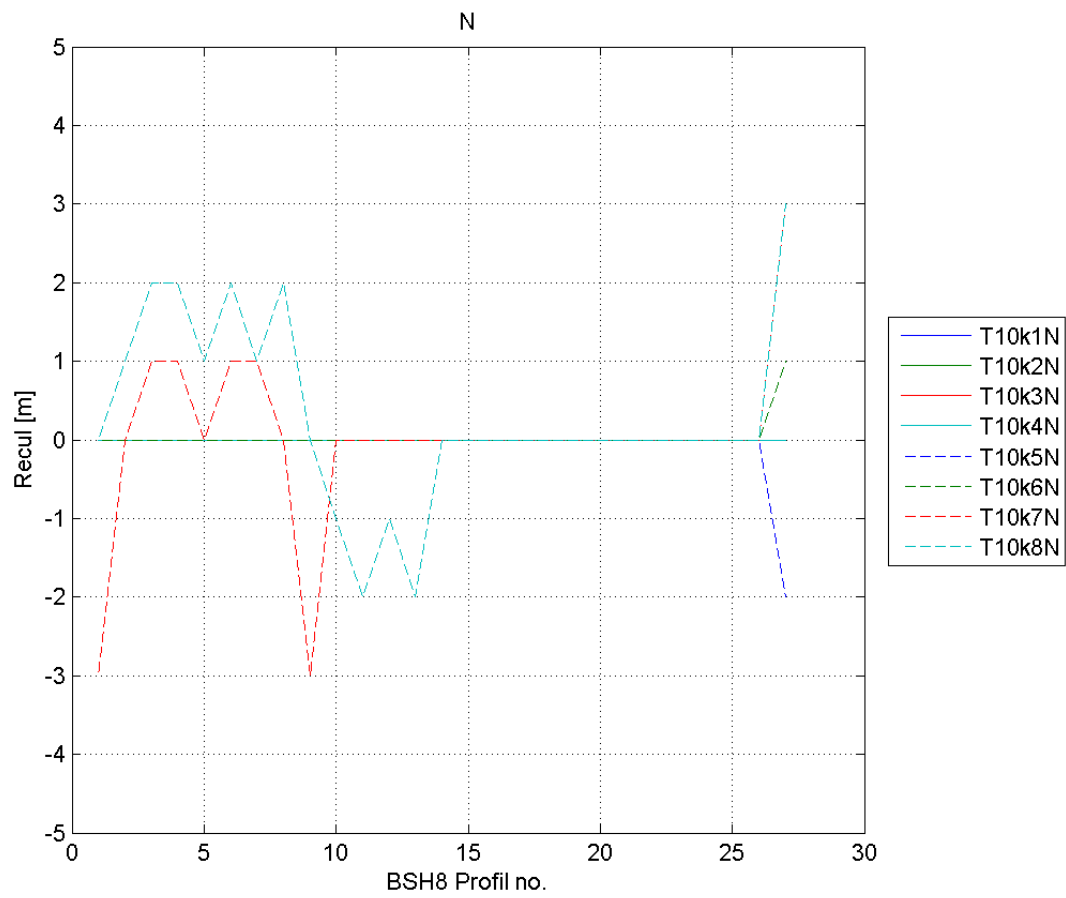


Figure 7: Recul ponctuel, marais de Meuvaines, conditions fréquentes (T10), NNE

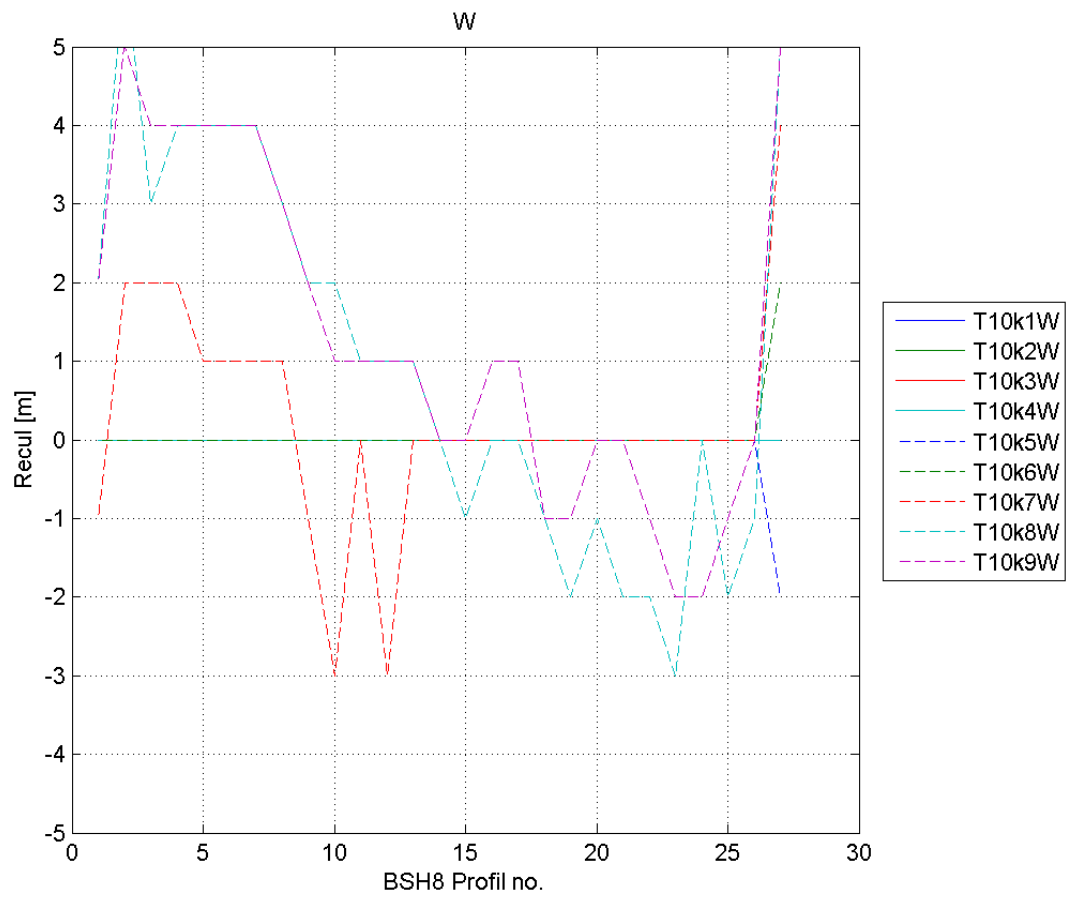


Figure 8: Recul ponctuel, marais de Meuvaines, conditions fréquentes (T10), Ouest

Scénario extrême (T1000)

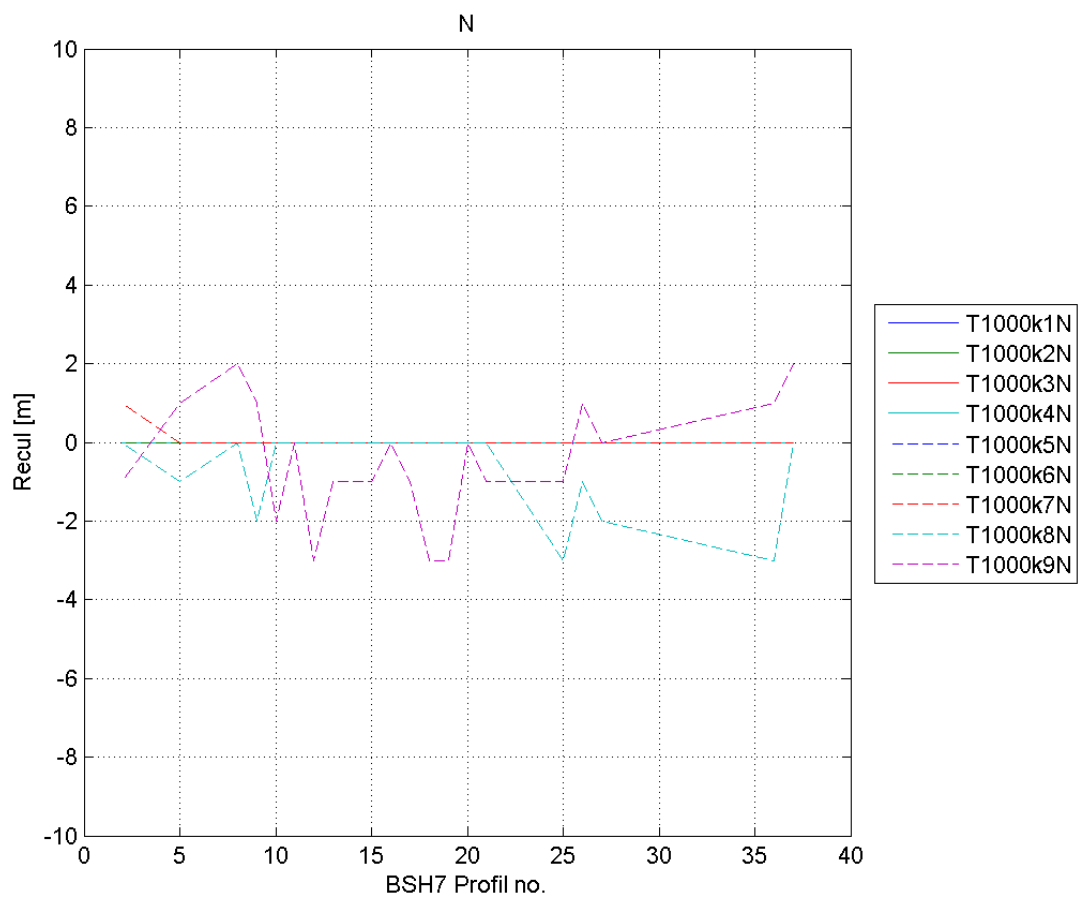


Figure 9: Recul ponctuel, marais de Ver, conditions extrêmes (T1000), NNE

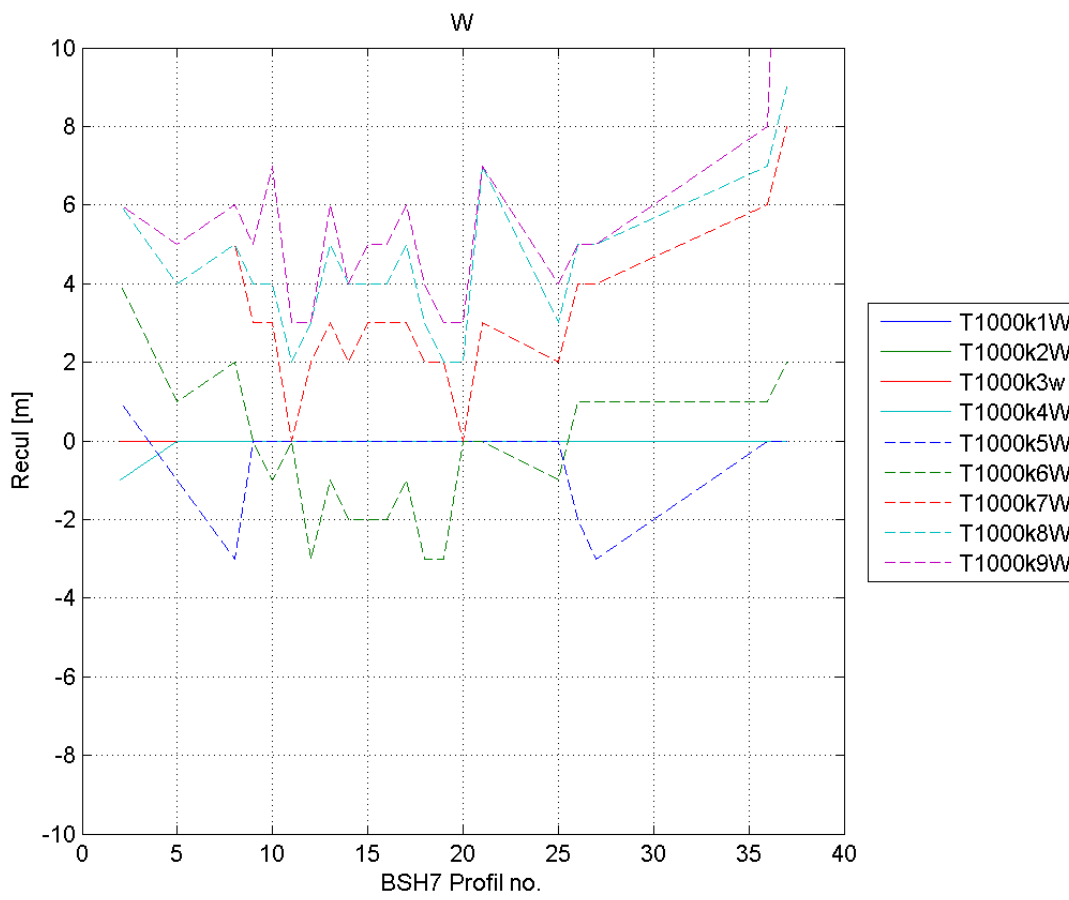


Figure 10: Recul ponctuel, marais de Ver, conditions extrêmes (T1000), Ouest

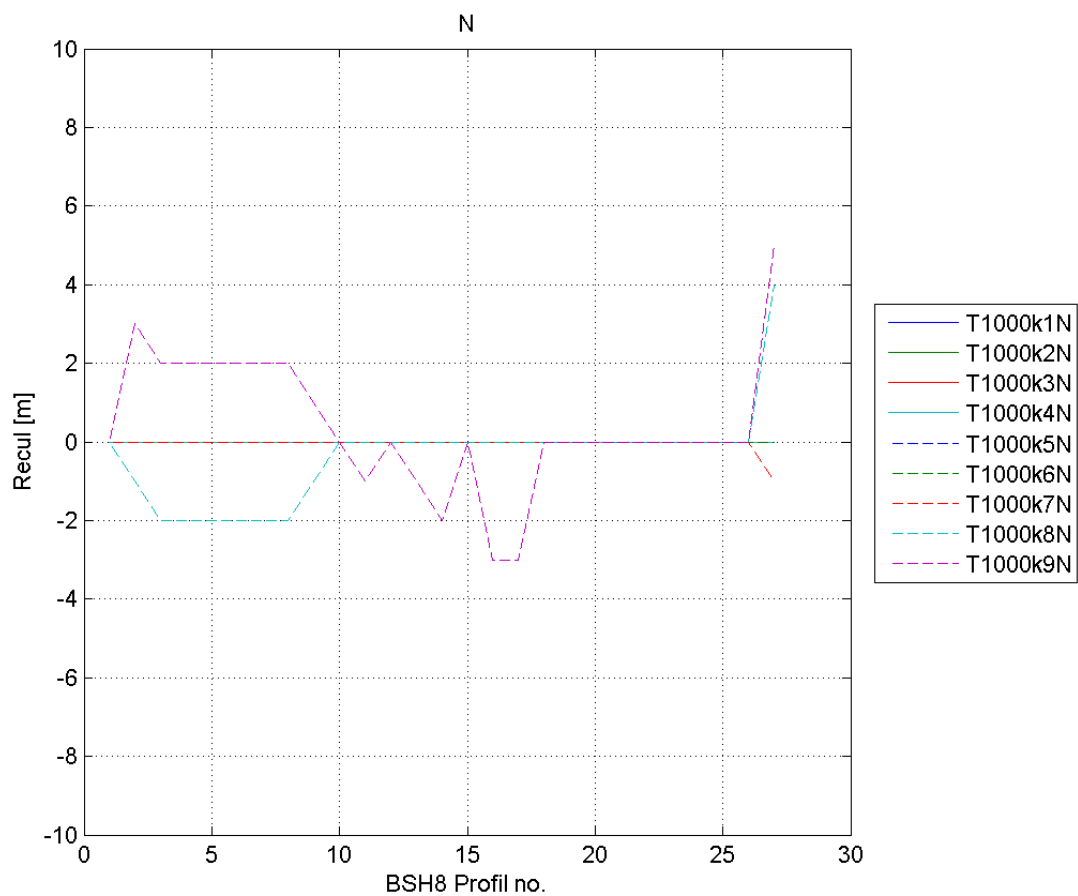


Figure 11: Recul ponctuel, marais de Meuvaines, conditions extrêmes (T1000), NNE

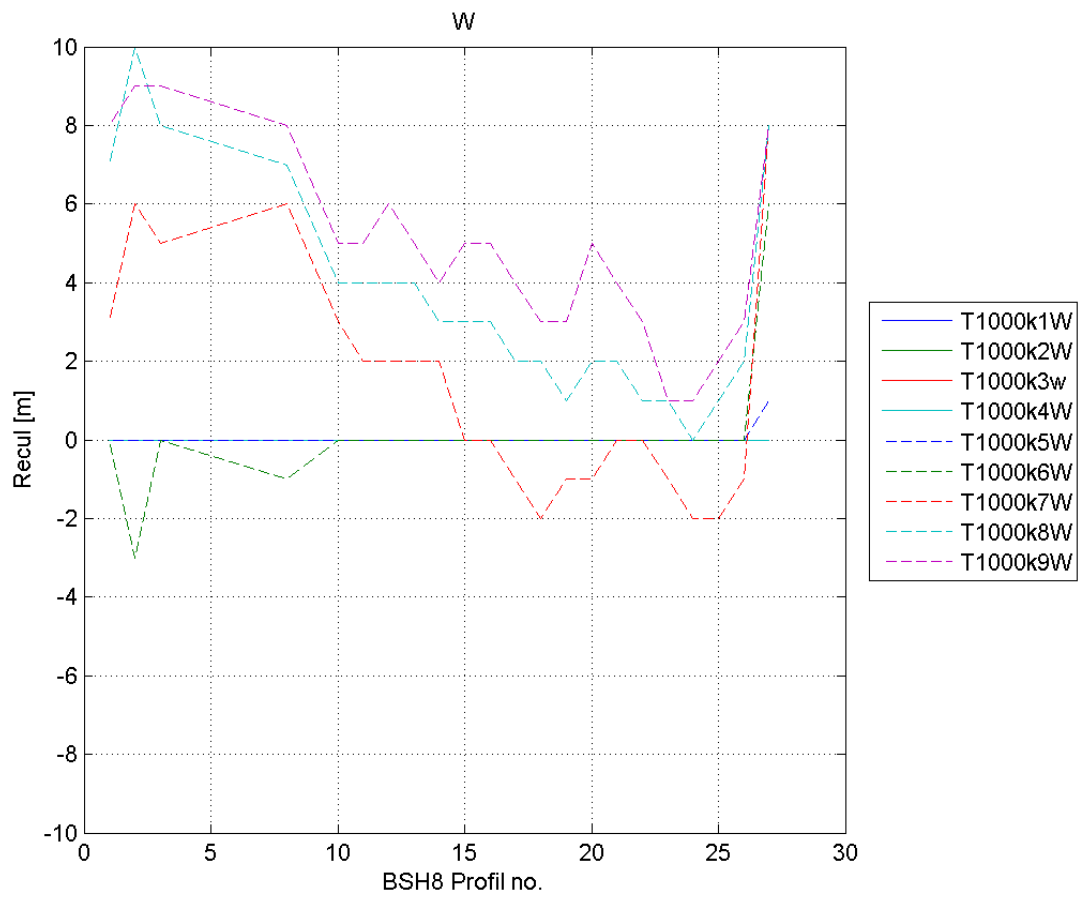


Figure 12: Recul ponctuel, marais de Meuvaines, conditions extrêmes (T1000), Ouest

Annexe F : Résultats test de dunes Secteur Dives-Orne

Pointe de Cabourg

Scénario à échéance 100 ans (T100+60cm)

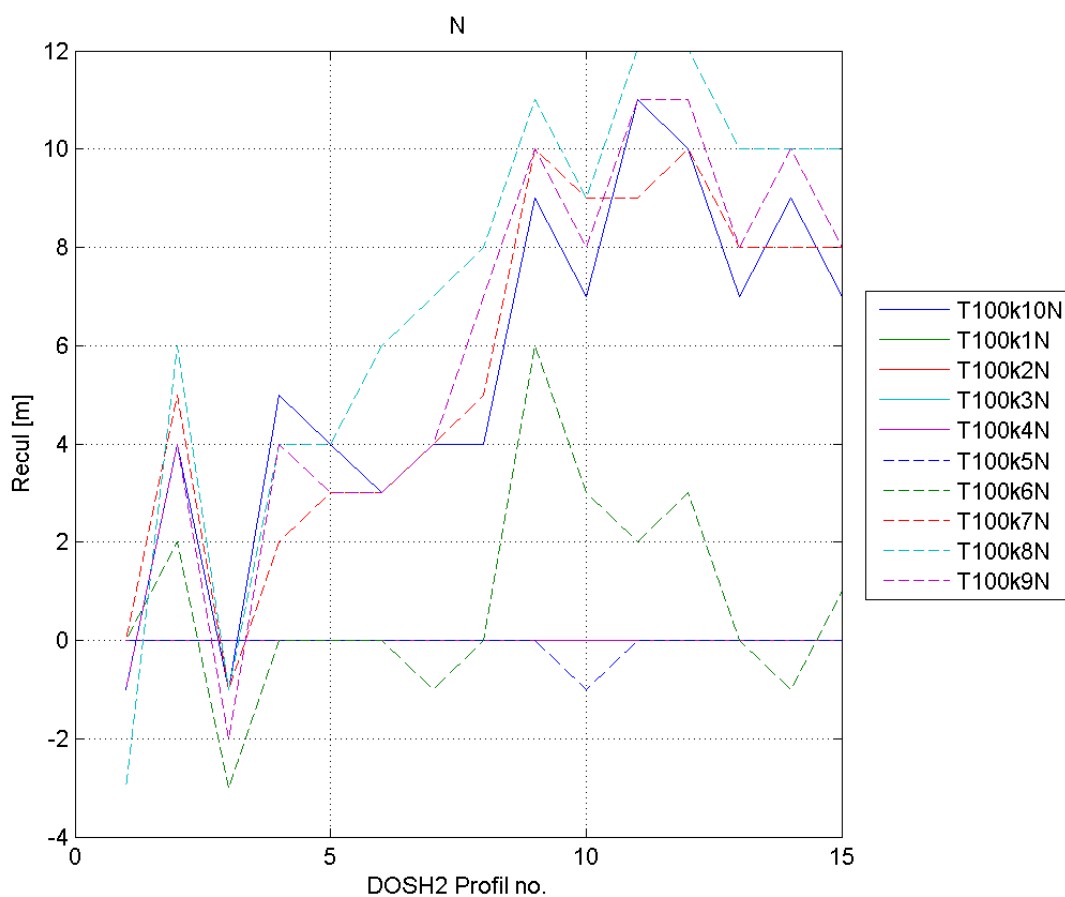


Figure 1: Recul ponctuel, Pointe de Cabourg, conditions de référence +60cm, NNE

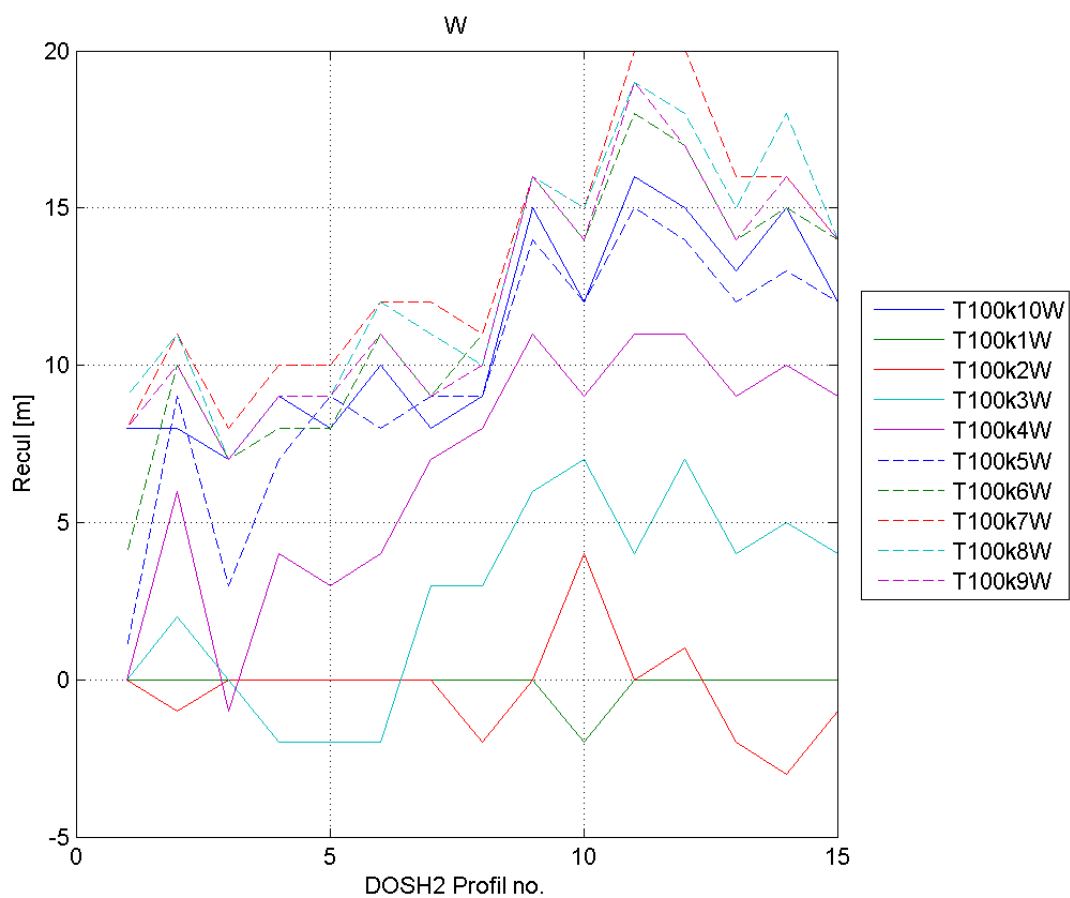


Figure 2: Recul ponctuel, Pointe de Cabourg, conditions de référence +60cm, Ouest

Scénario fréquent (T10)

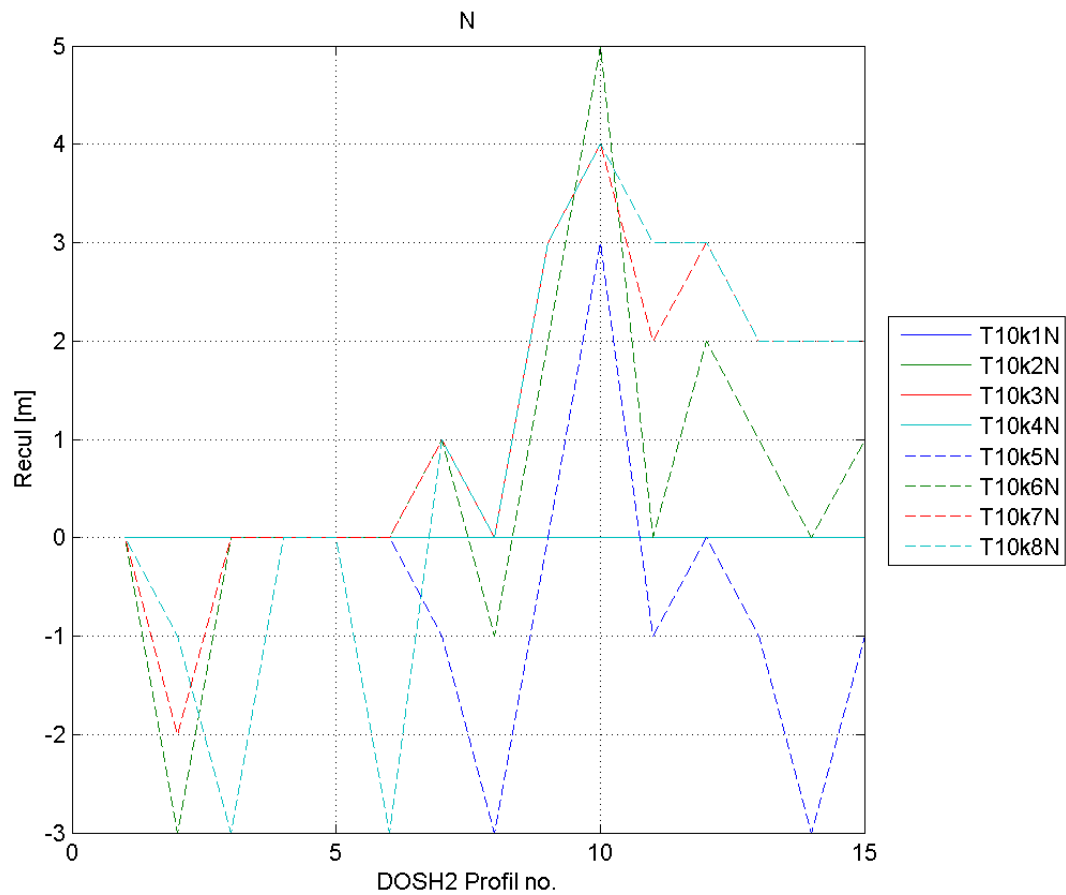


Figure 3: Recul ponctuel, Pointe de Cabourg, conditions fréquentes (T10), NNE

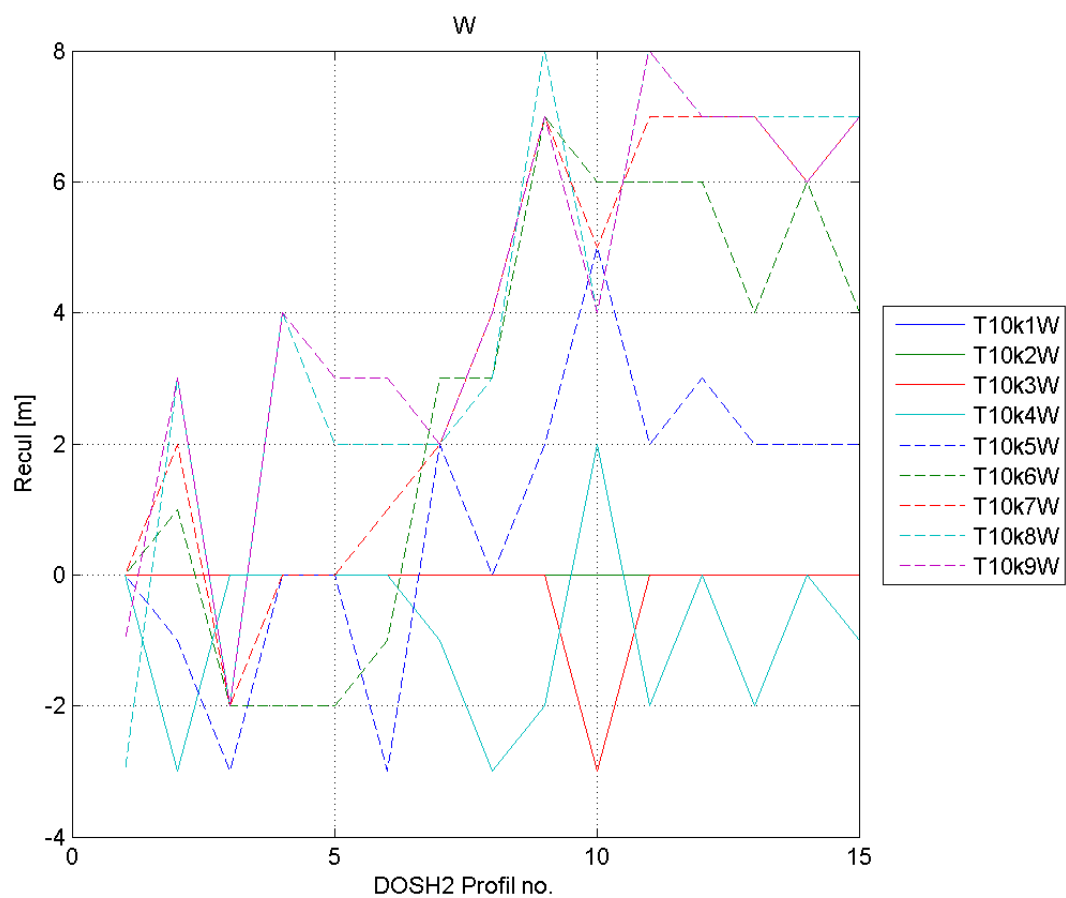


Figure 4: Recul ponctuel, Pointe de Cabourg, conditions fréquentes (T10), Ouest

Scénario extrême (T1000)

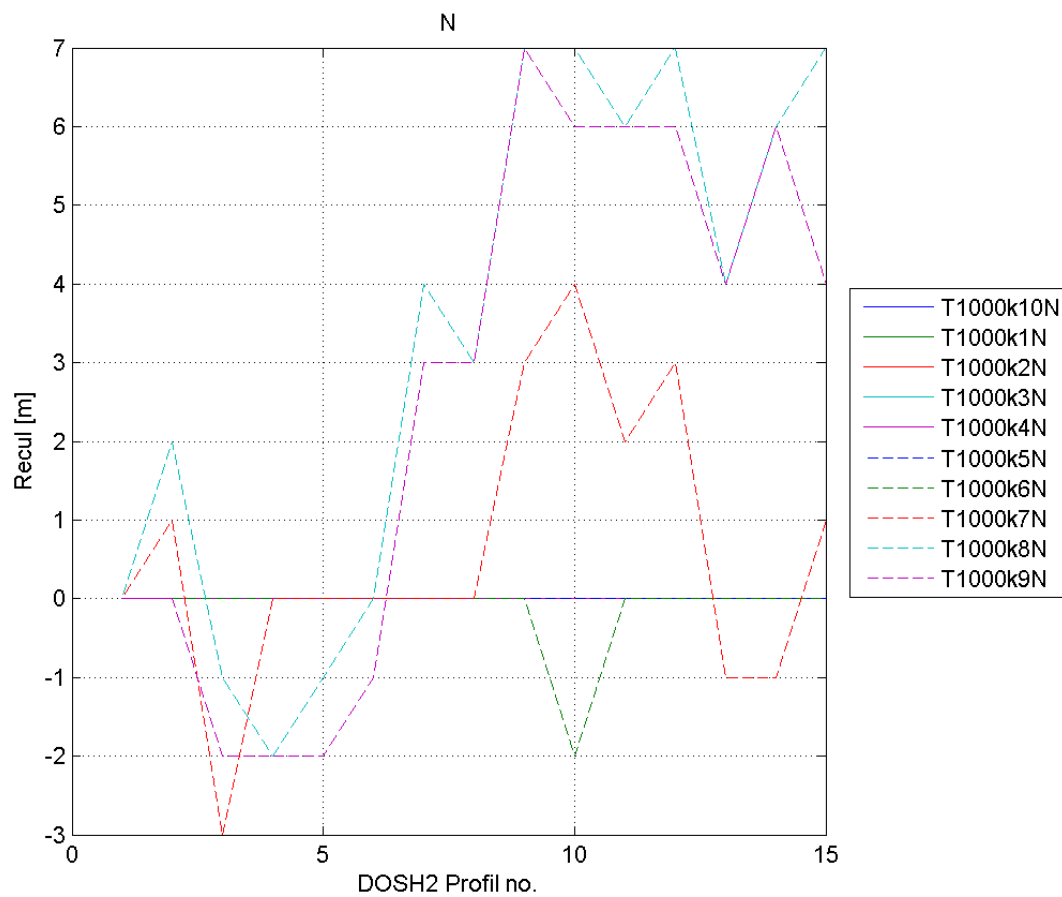


Figure 5: Recul ponctuel, Pointe de Cabourg, conditions extrêmes (T1000), NNE

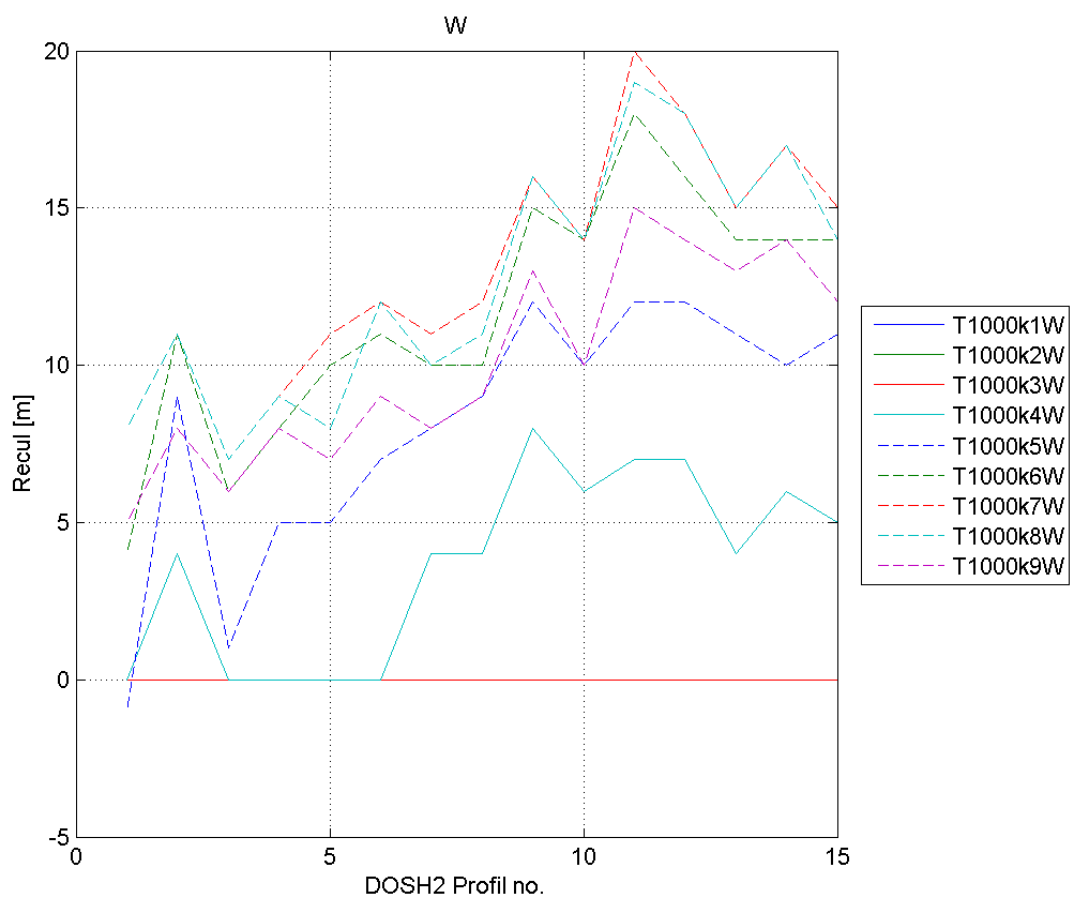


Figure 6: Recul ponctuel, Pointe de Cabourg, conditions extrêmes (T1000), Ouest

Dune de Varaville et Franceville/Merville-plage

Scénario à échéance 100 ans (T100+60cm)

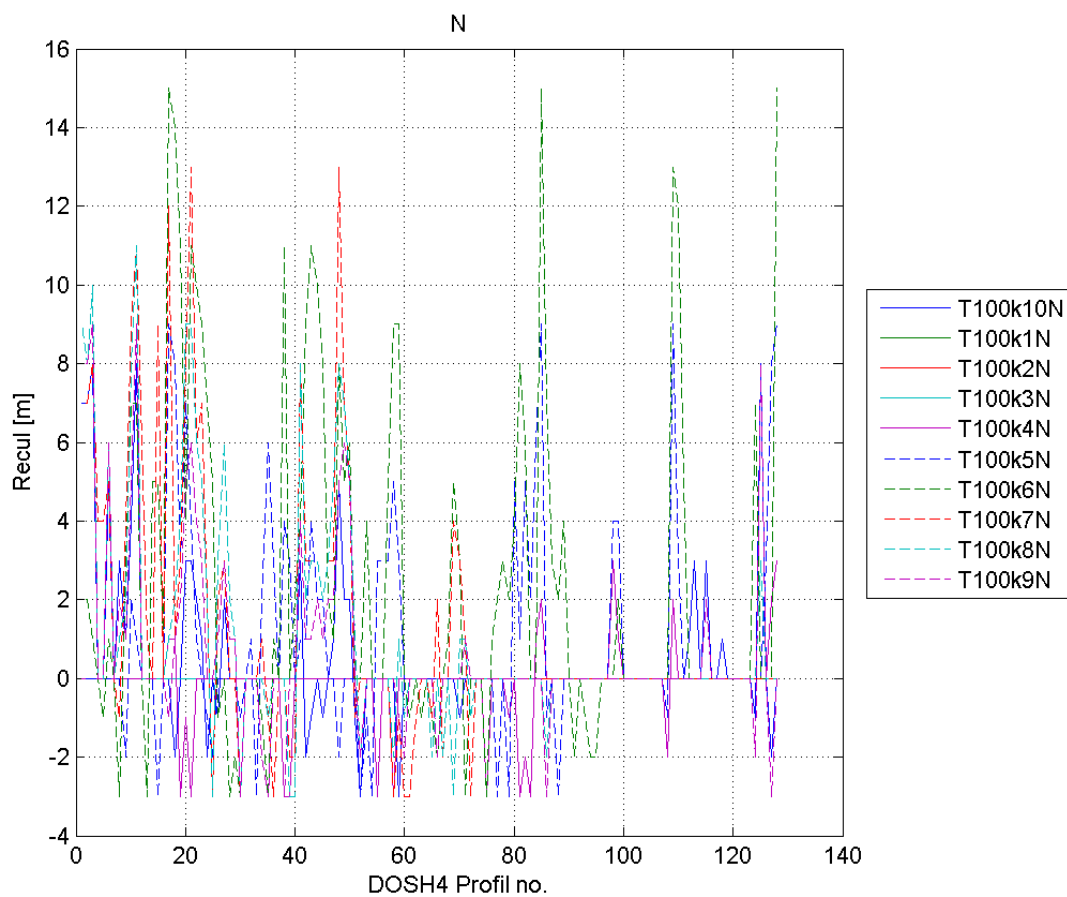


Figure 1: Recul ponctuel, dune de Varaville et Merville-Franceville-pl., référence +60cm, NNE

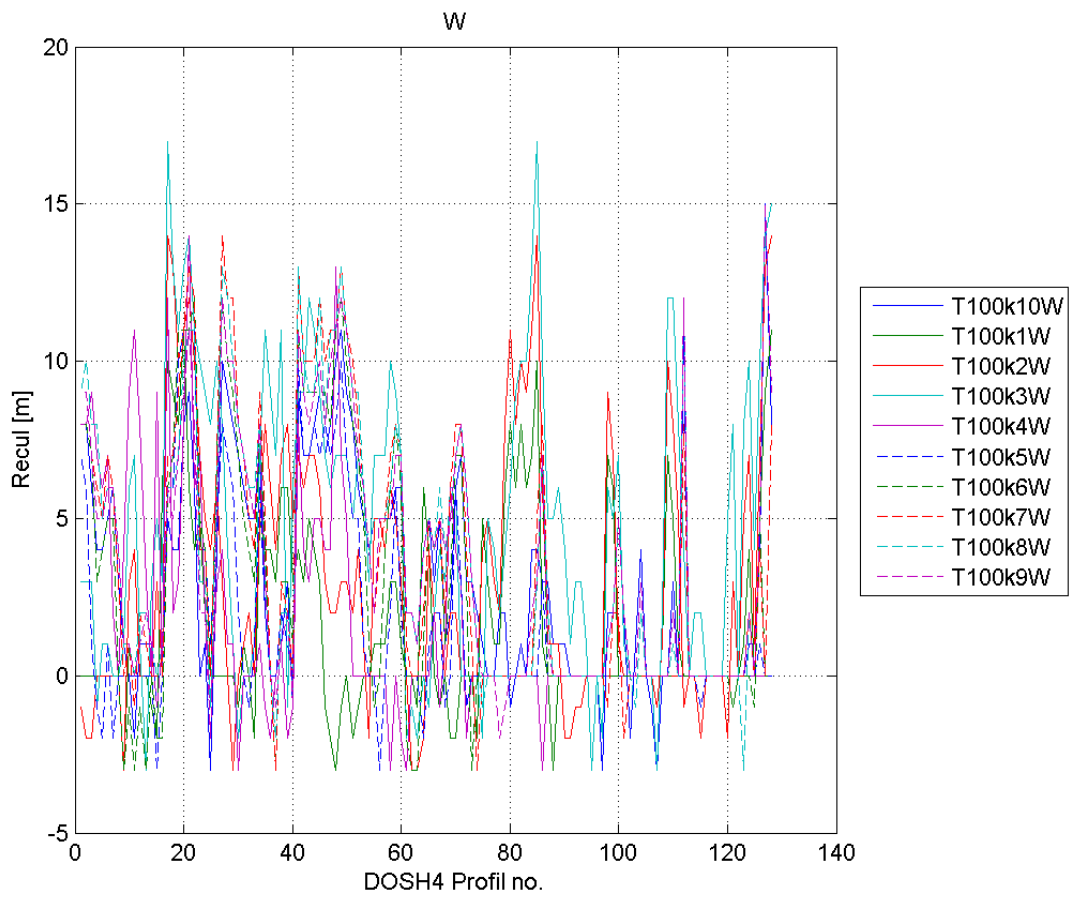


Figure 2: Recul ponctuel, dune de Varaville et Merville-Franceville-pl., référence +60cm, Ouest

Scénario fréquent (T10)

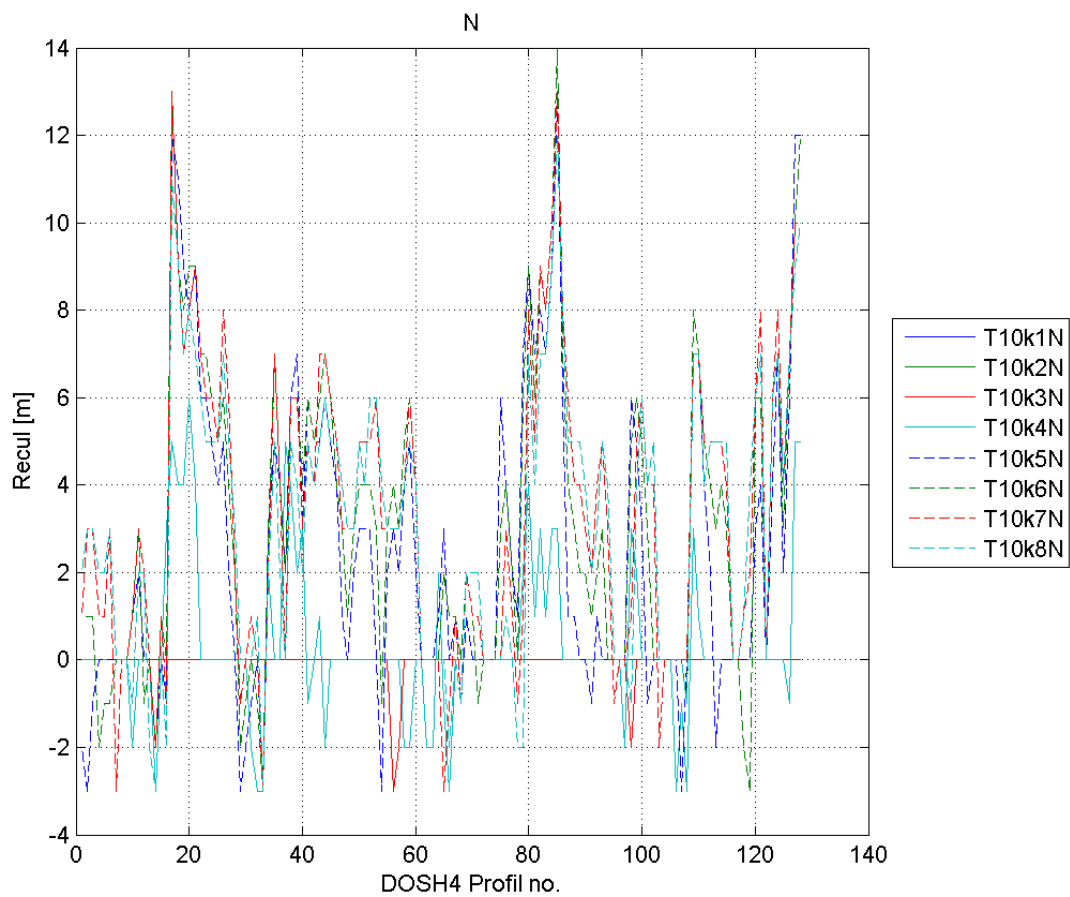


Figure 3: Recul ponctuel, dune de Varaville et Merville-Franceville-pl., conditions fréquentes (T10), NNE

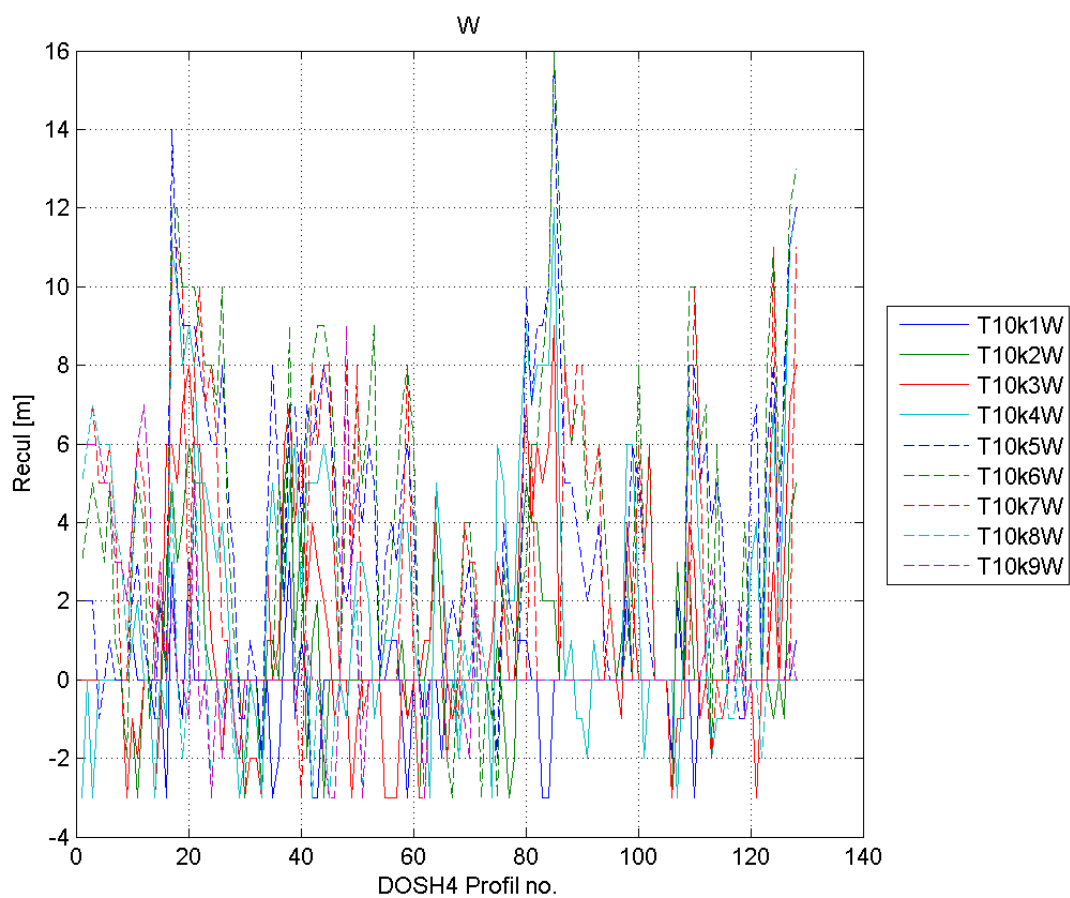


Figure 4: Recul ponctuel, dune de Varaville et Merville-Franceville-pl., conditions fréquentes (T10), Ouest

Scénario extrême (T1000)

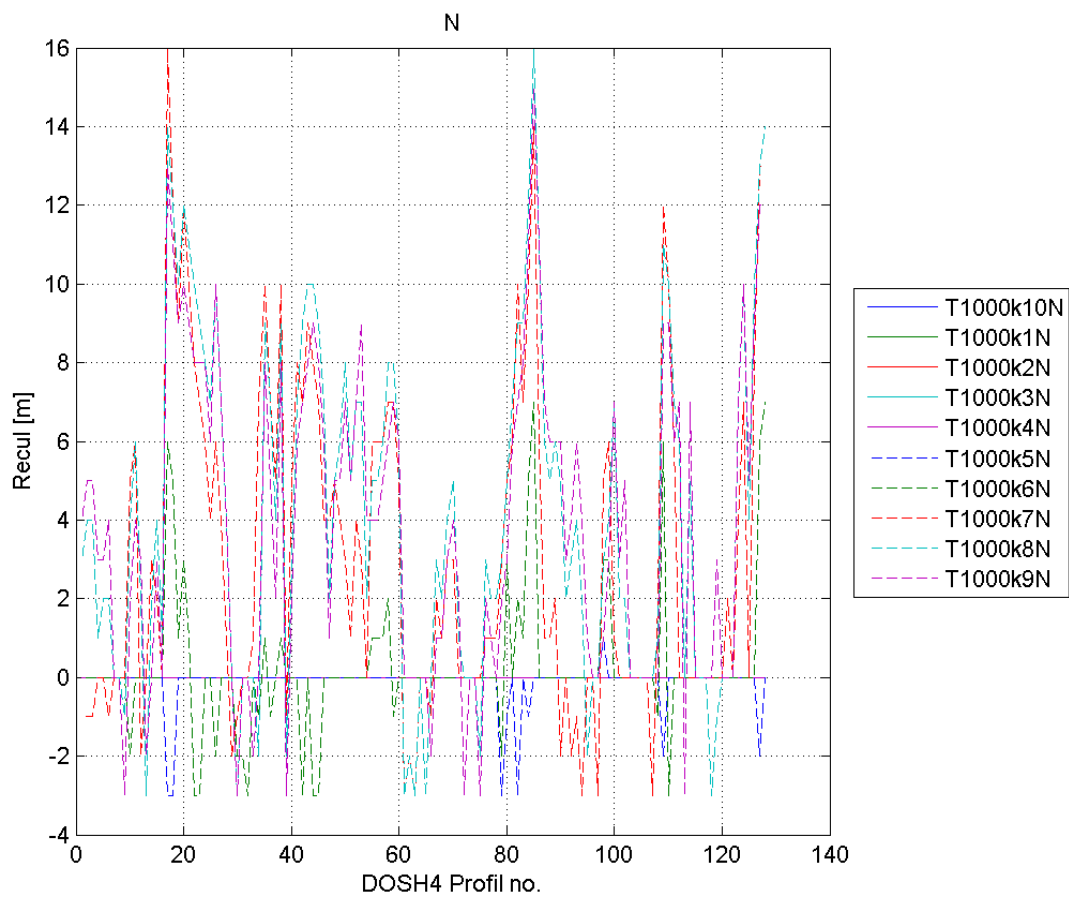


Figure 5: Recul ponctuel, dune de Varaville et Merville-Franceville-pl., conditions extrêmes (T1000), NNE

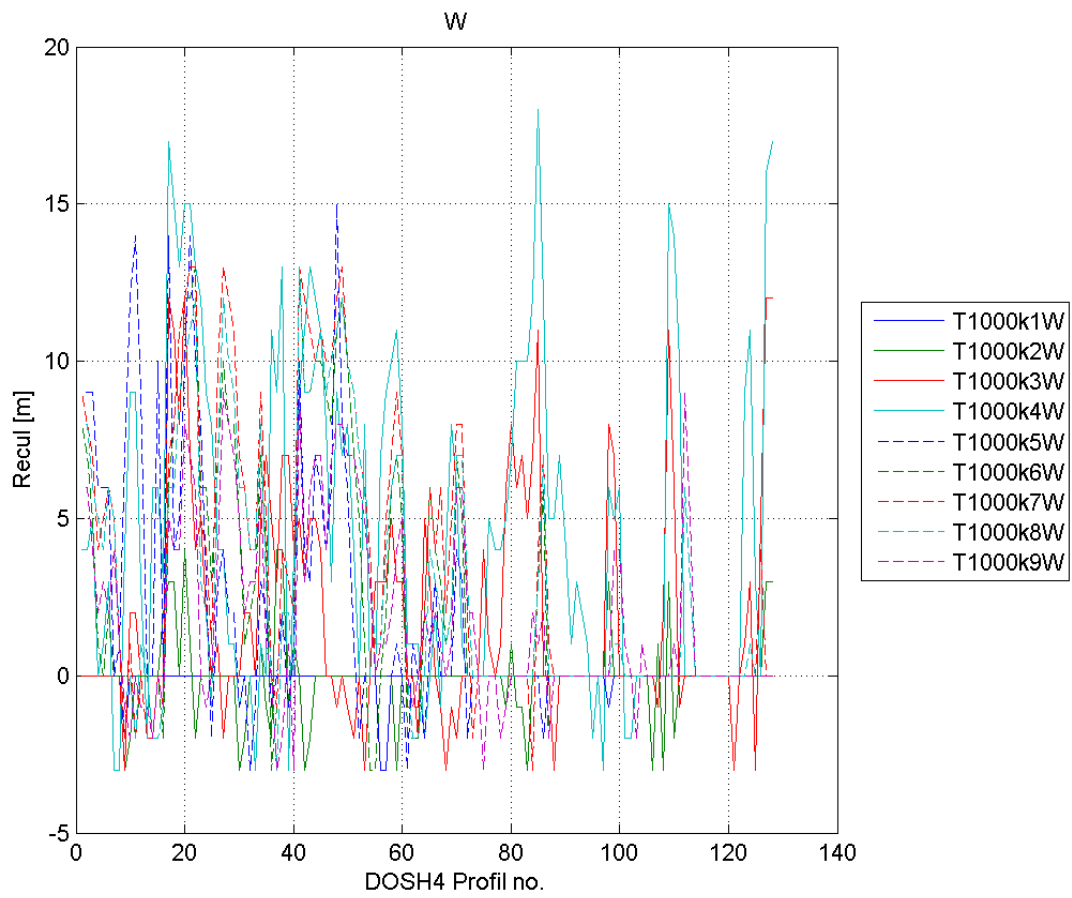


Figure 6: Recul ponctuel, dune de Varaville et Merville-Franceville-pl., conditions extrêmes (T1000), Ouest

Dune de Riva Bella (Ouistreham)

Scénario à échéance 100 ans (T100+60cm)

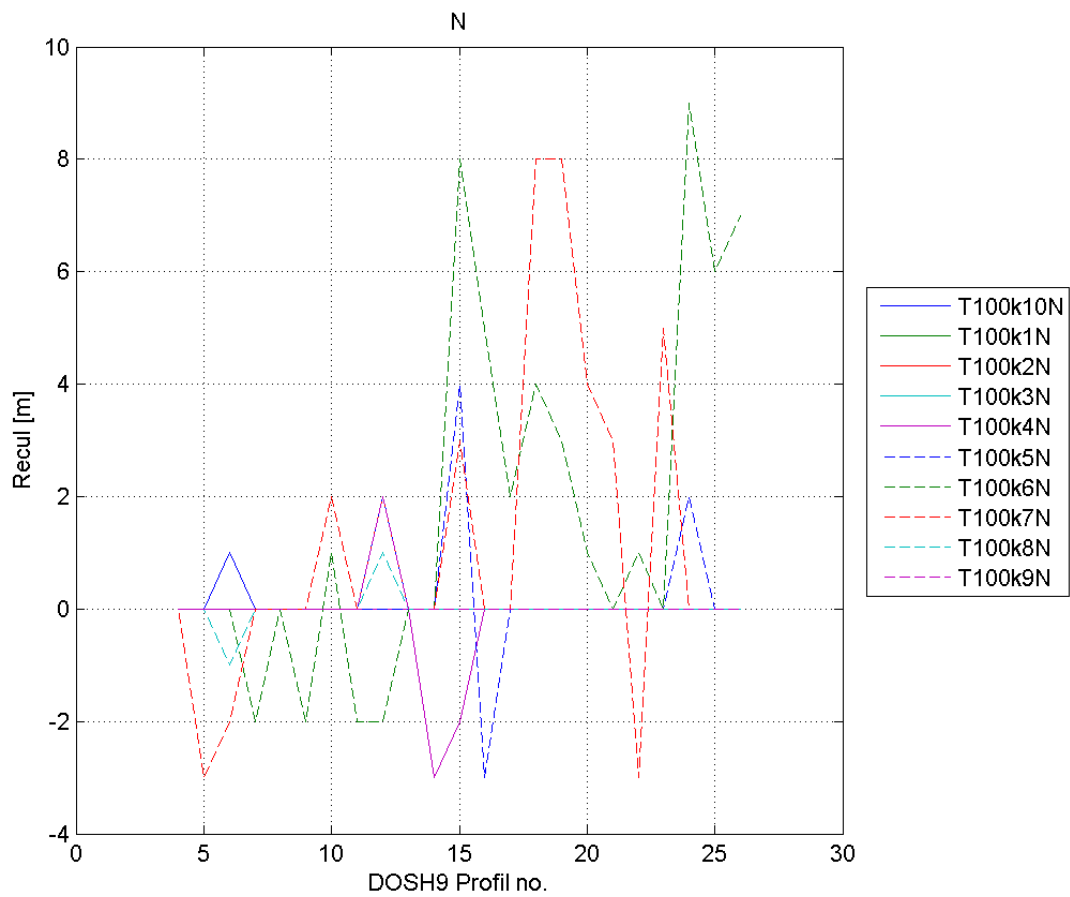


Figure 1: Recul ponctuel, dune Riva Bella (Ouistreham), référence +60cm, NNE

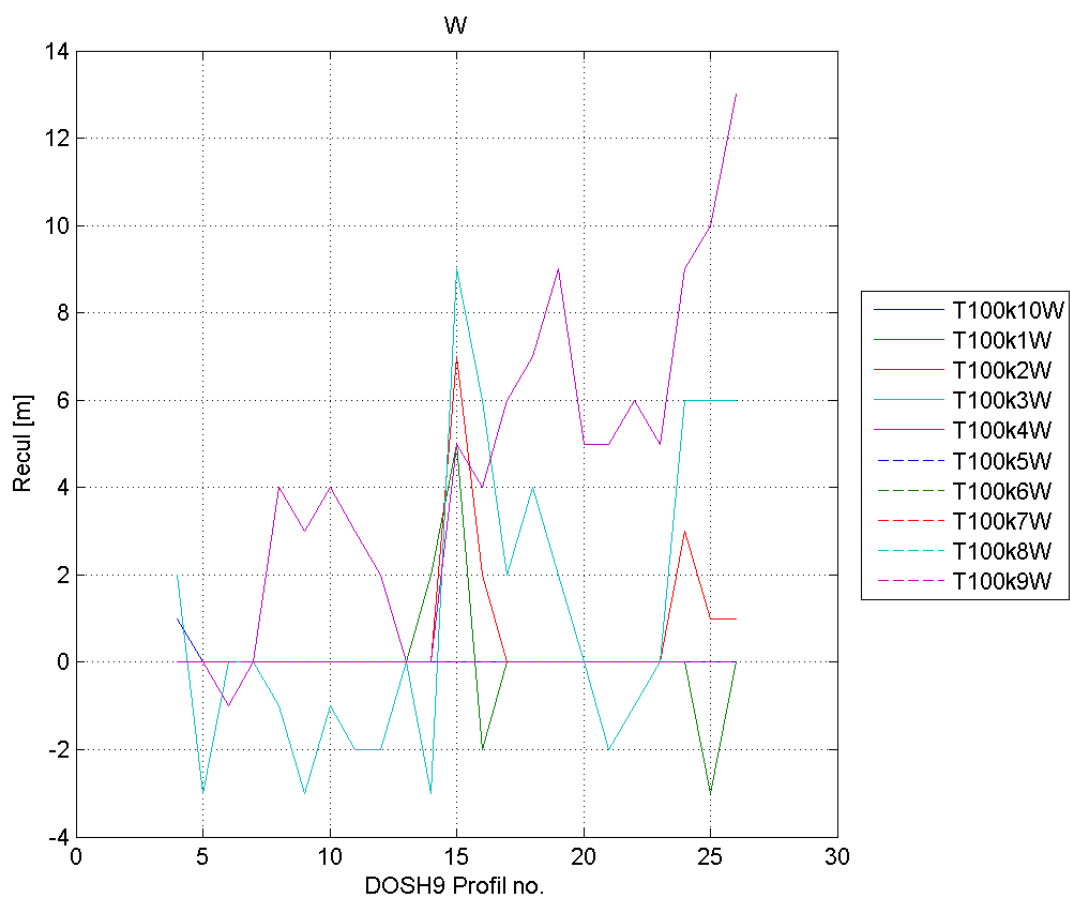


Figure 2: Recul ponctuel, dune Riva Bella (Ouistreham), référence +60cm, Ouest

Scénario fréquent (T10)

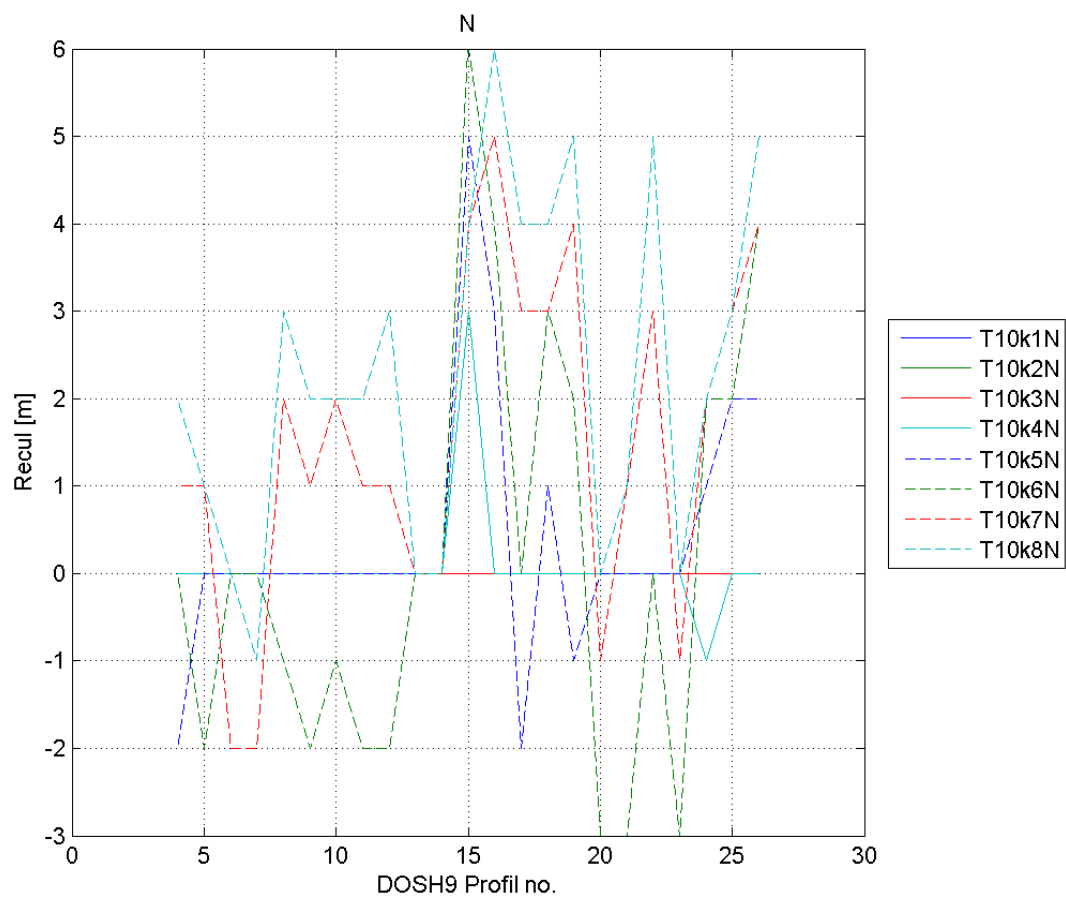


Figure 3: Recul ponctuel, dune Riva Bella (Ouistreham), conditions fréquentes (T10), NNE

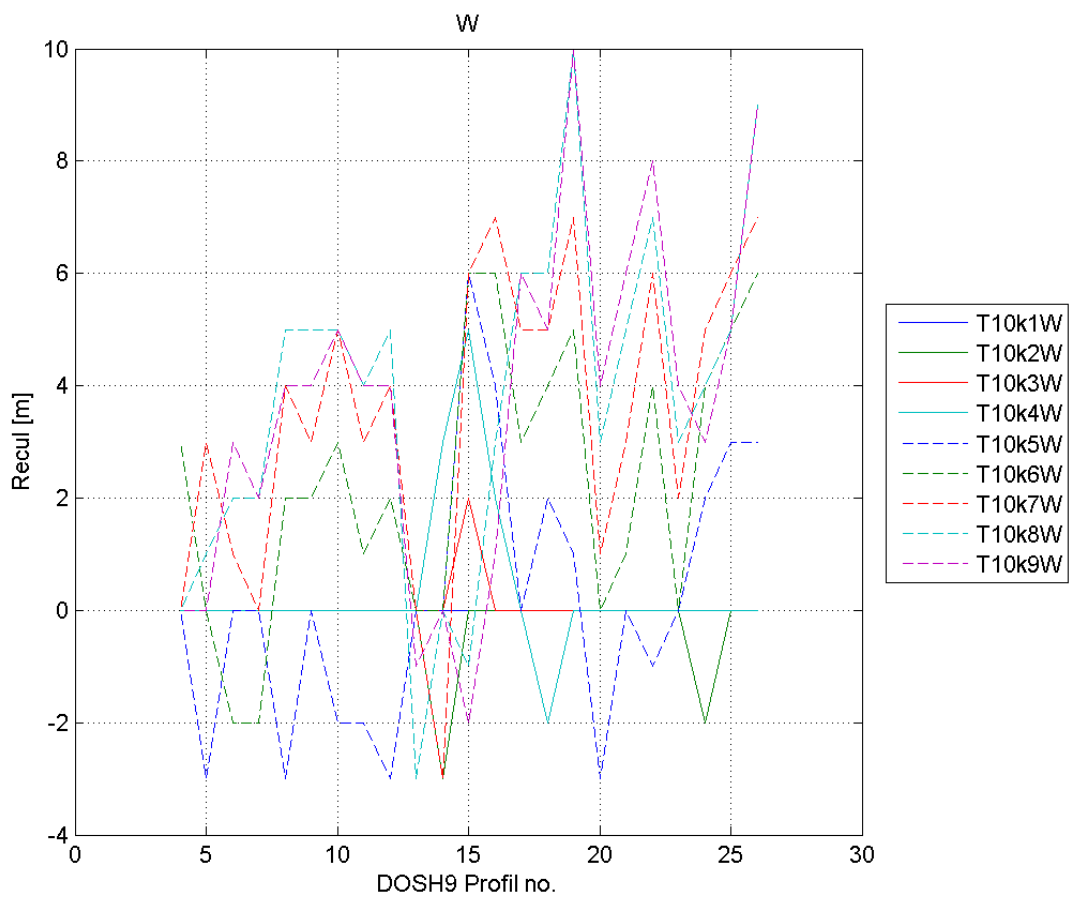


Figure 4: Recul ponctuel, dune Riva Bella (Ouistreham), conditions fréquentes (T10), Ouest

Scénario extrême (T1000)

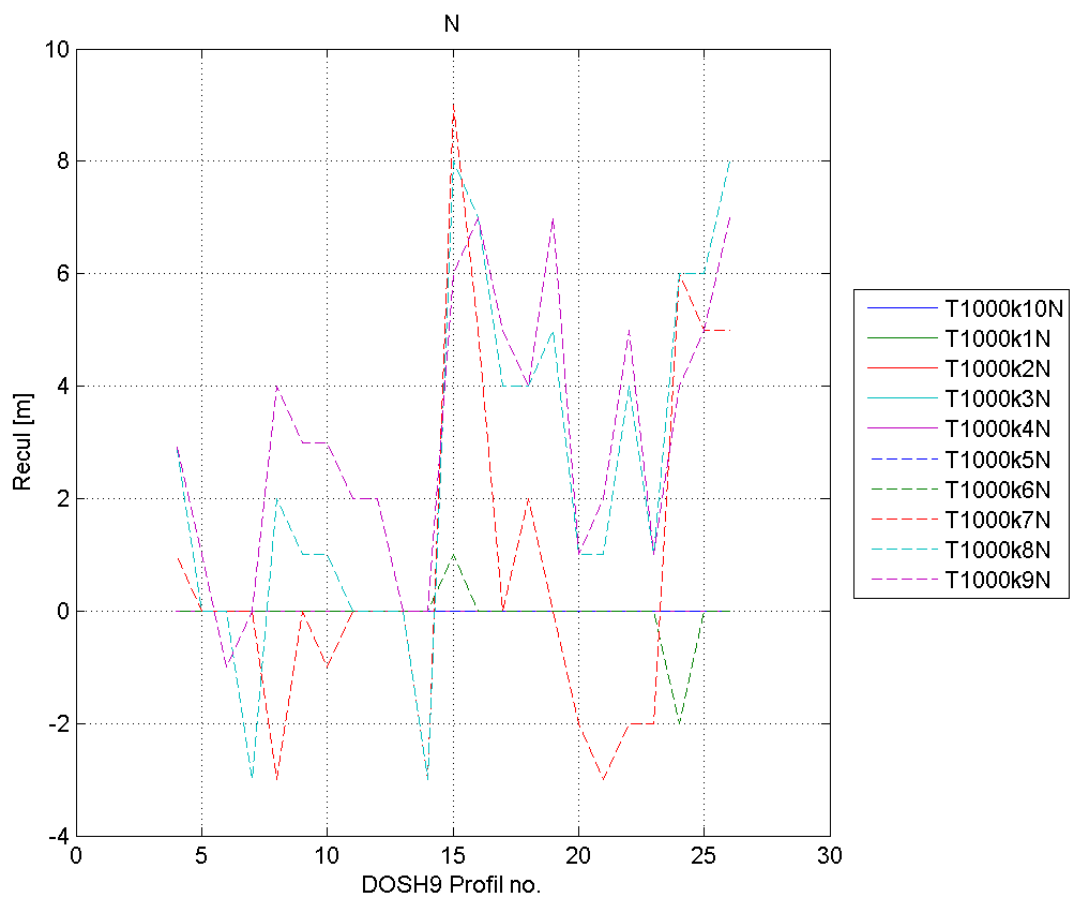


Figure 5: Recul ponctuel, dune Riva Bella (Ouistreham), conditions extrêmes (T1000), NNE

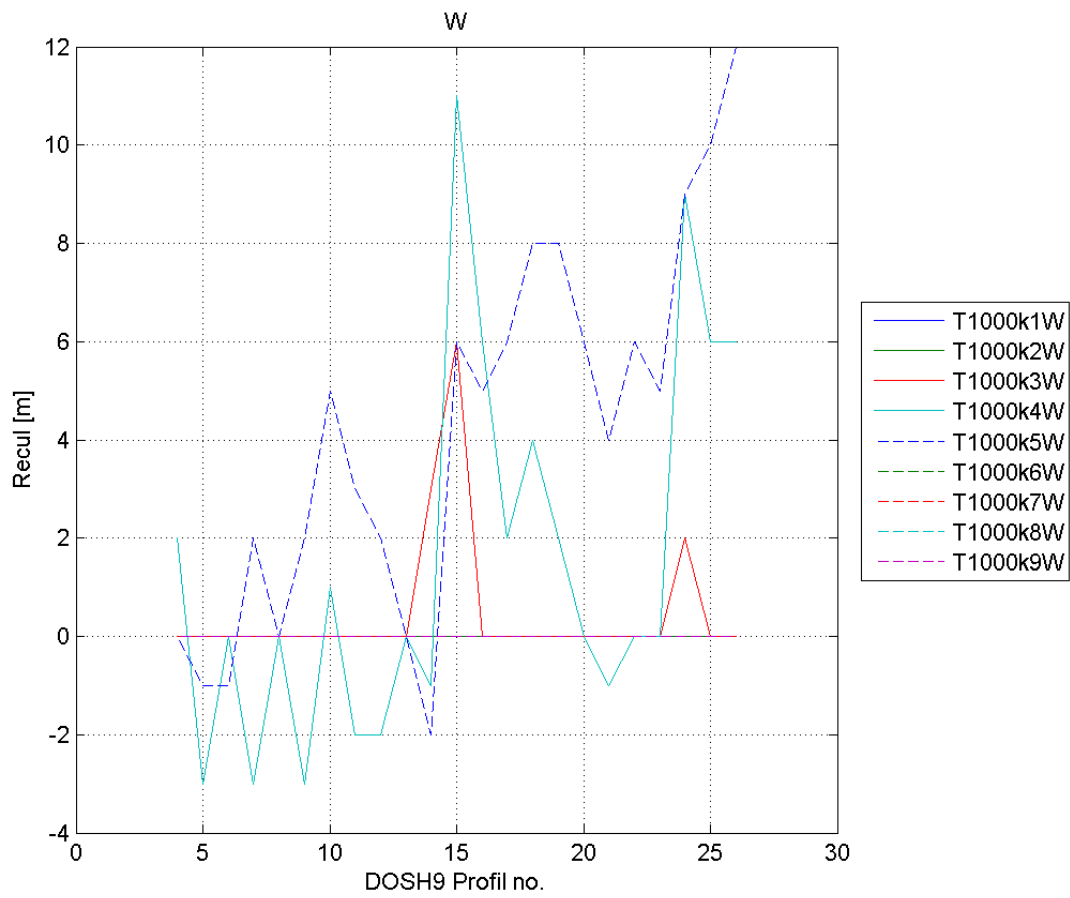


Figure 6: Recul ponctuel, dune Riva Bella (Ouistreham), conditions extrêmes (T1000), Ouest

Dune de Colleville-Montgomery

Scénario à échéance 100 ans (T100+60cm)

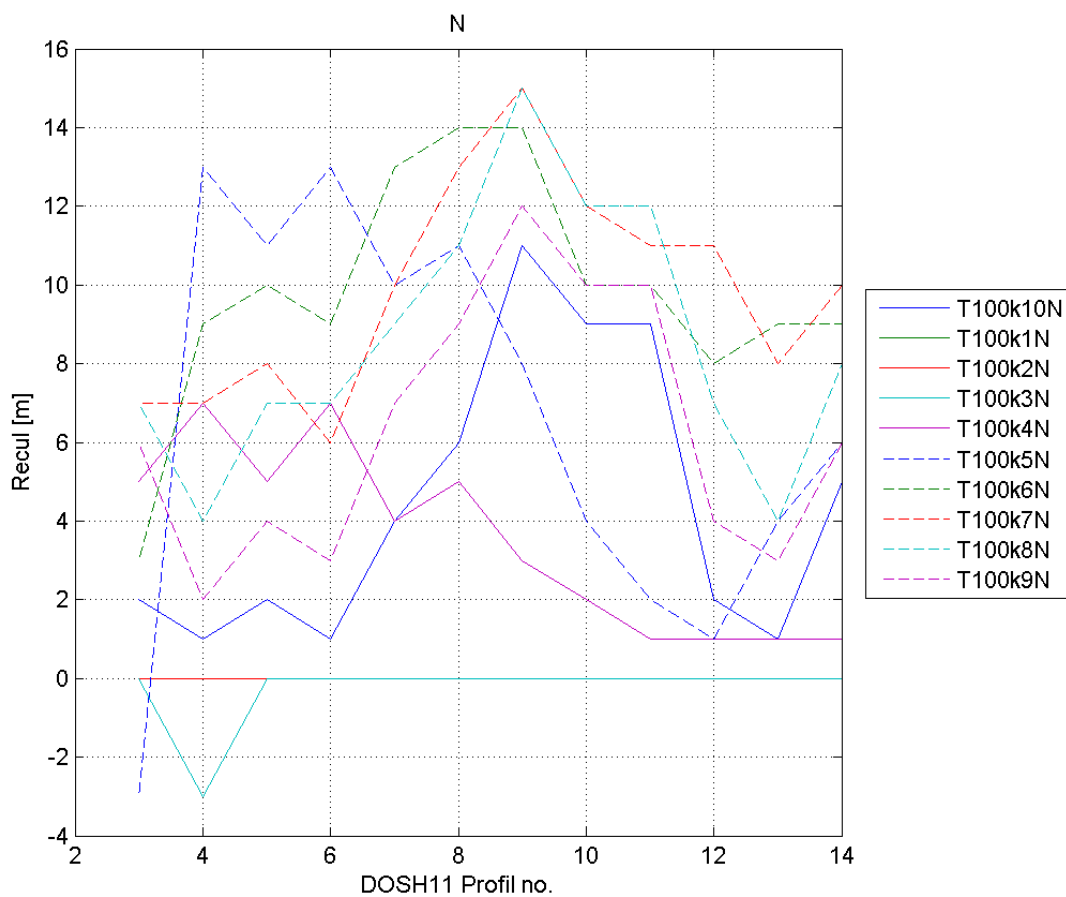


Figure 1: Recul ponctuel, dune Colleville-My., référence +60cm, NNE

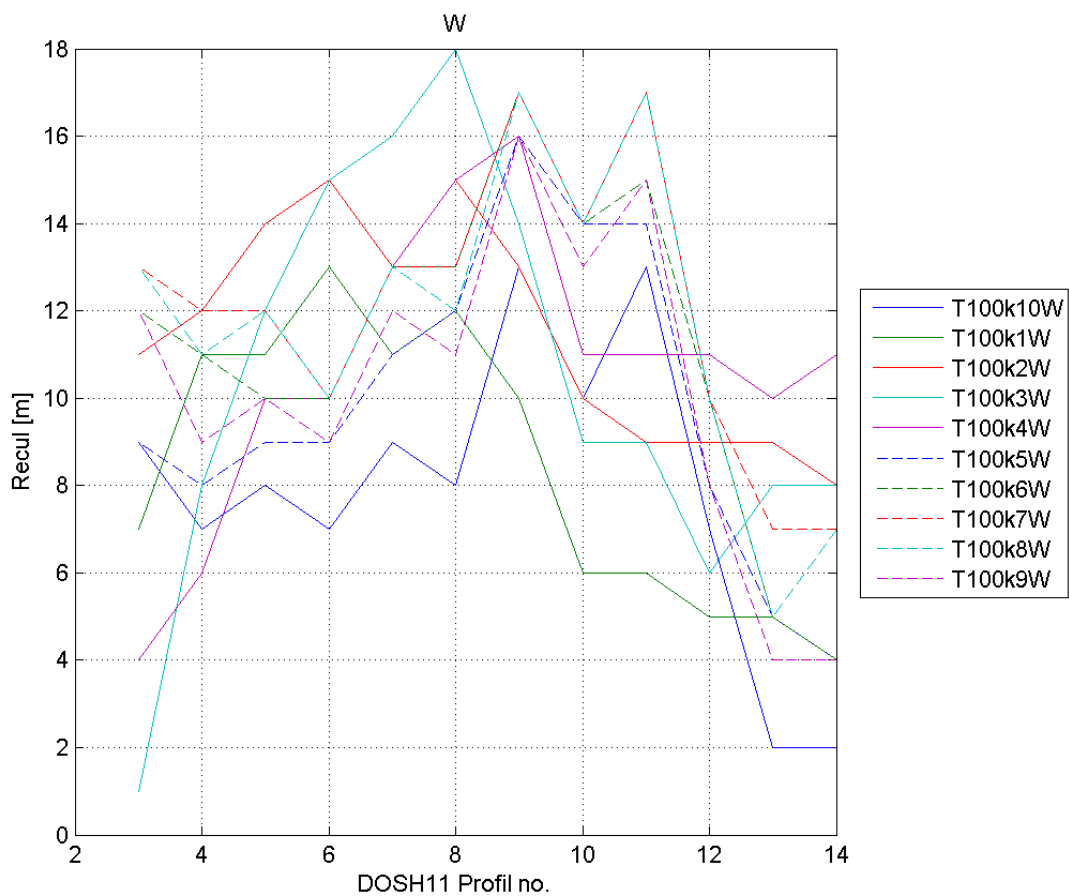


Figure 2: Recul ponctuel, dune Colleville-My., référence +60cm, Ouest

Scénario fréquent (T10)

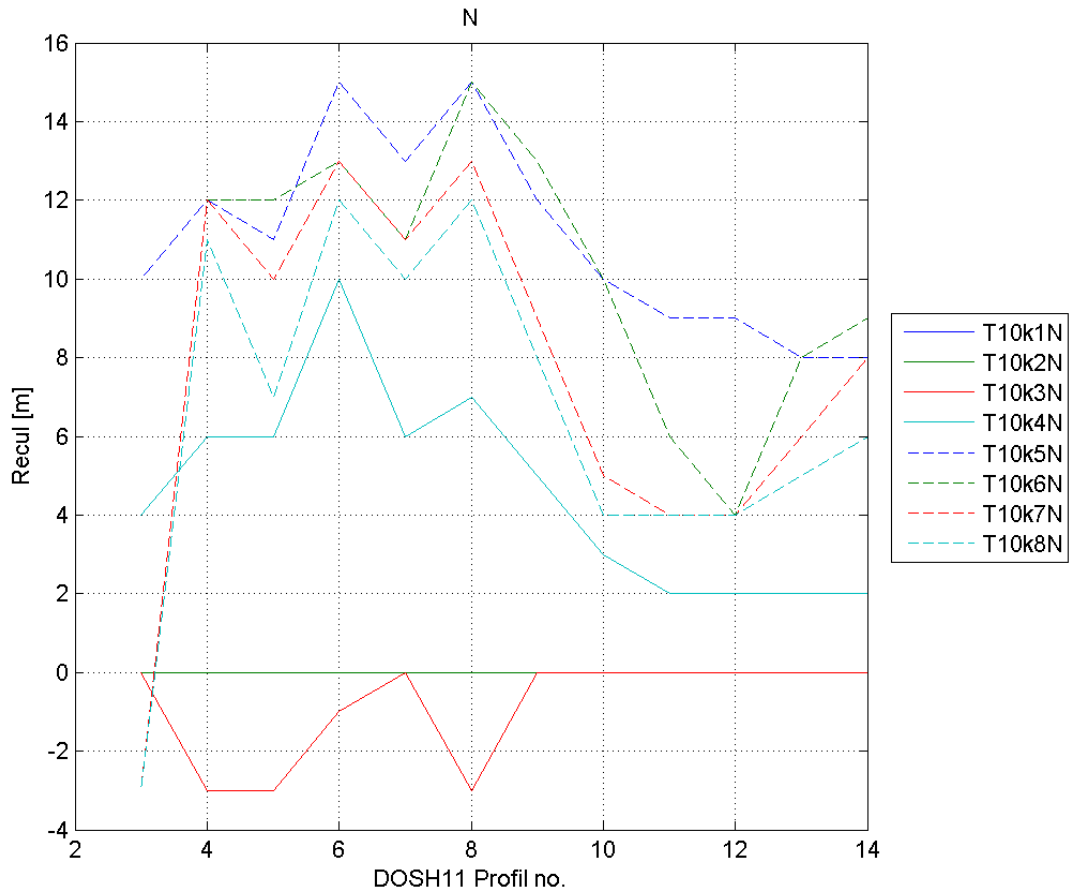


Figure 3: Recul ponctuel, dune Colleville-My., conditions fréquentes (T10), NNE

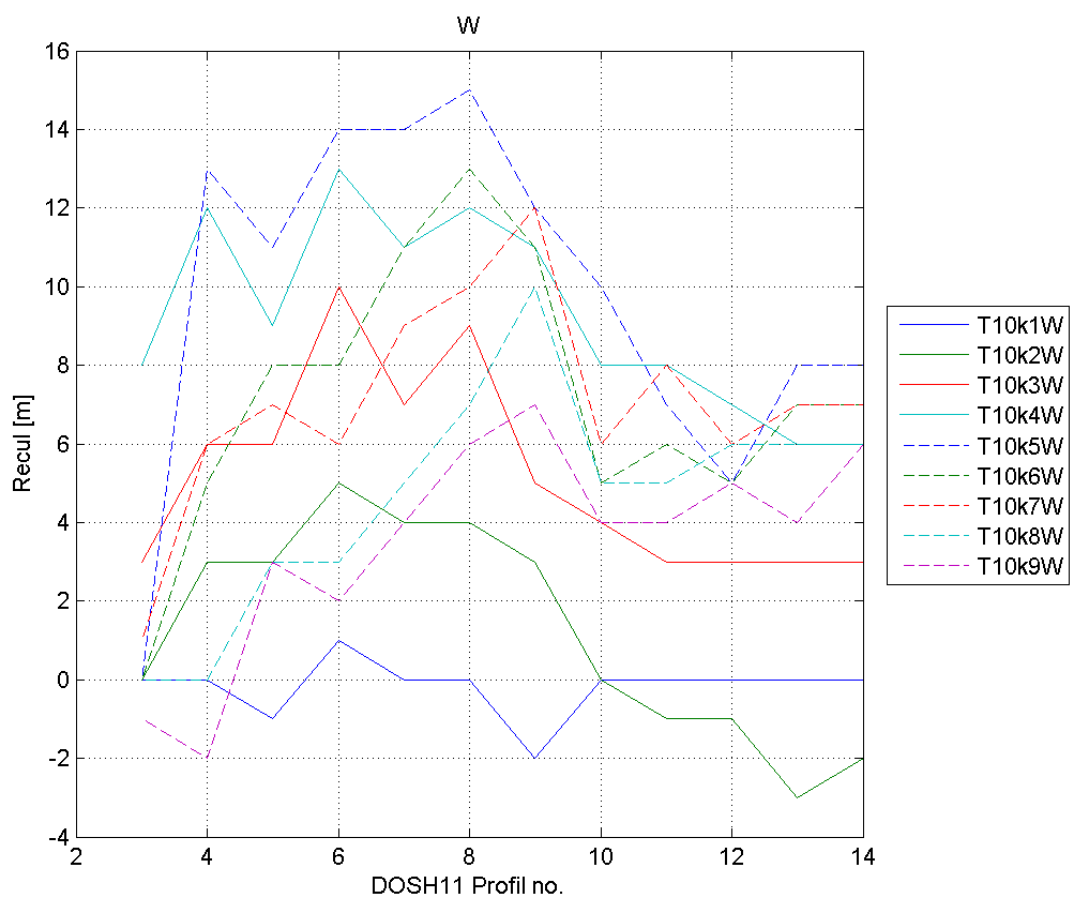


Figure 4: Recul ponctuel, dune Colleville-My., conditions fréquentes (T10), Ouest

Scénario extrême (T1000)

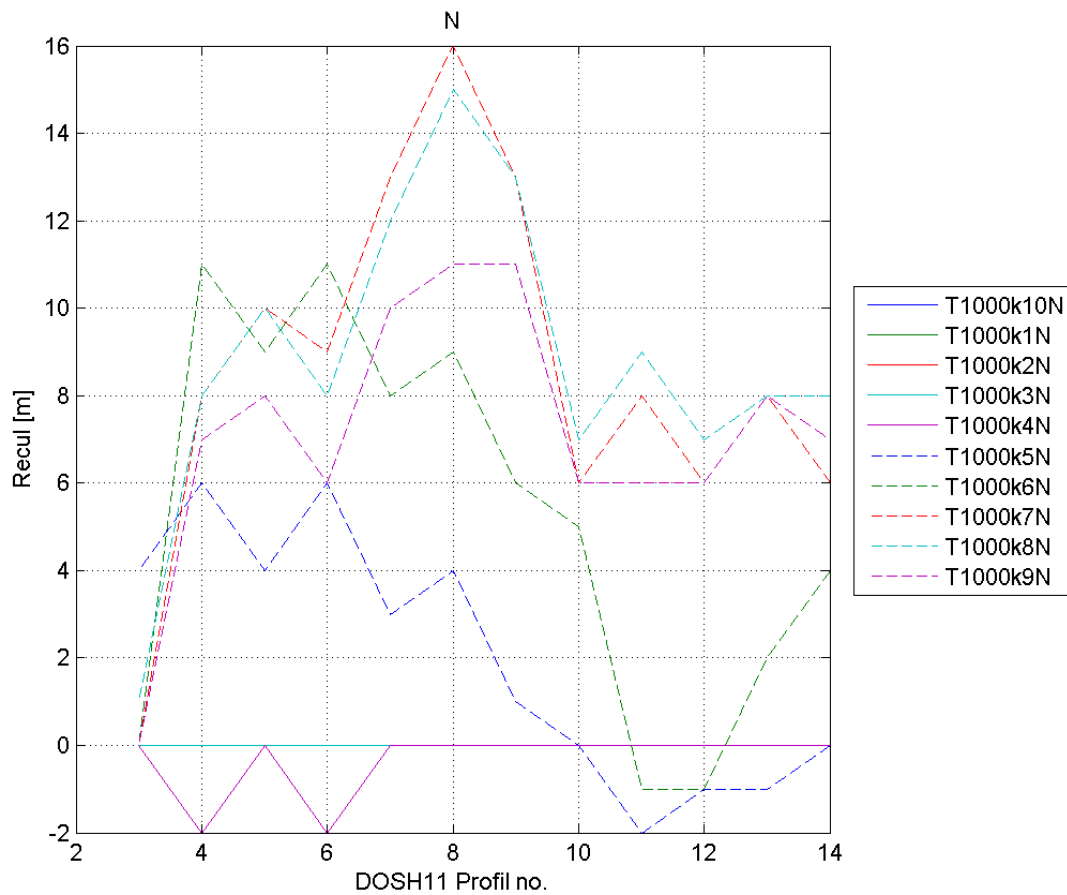


Figure 5: Recul ponctuel, dune Colleville-My., conditions extrêmes (T1000), NNE

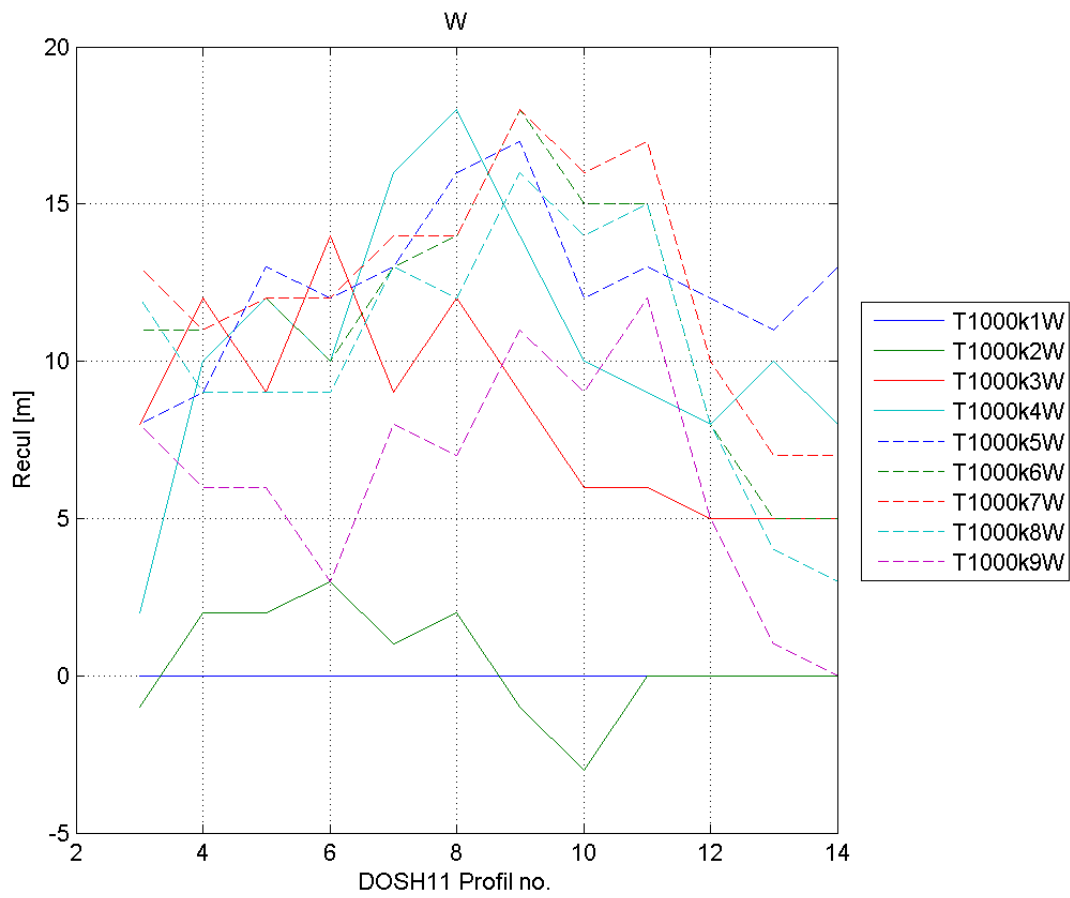


Figure 6: Recul ponctuel, dune Colleville-My., conditions extrêmes (T1000), Ouest