

Port de Québec

Étude de configuration finale de la plage

Nouvelles infrastructures portuaires

Secteur de Beauport, Québec

Dossier APQ : J4177-000 (Bons de commande : P-84005 / 85067)



Rapport technique FINAL

Par

Yann ROPARS, ing., M.Sc.

Consultants Ropars inc.

3643, Chemin Saint-Louis

Québec (Québec) G1W 1T2

yann_ropars@videotron.ca

Février 2015

Pour le



TABLES DES MATIÈRES

1 Introduction.....	1
2 Granulométrie des sédiments disponibles.....	3
2.1 Étude géotechnique.....	3
2.2 Analyse de la granulométrie des sédiments servant à la plage.....	4
2.3 Analyse des sédiments actuellement sur la plage.....	4
2.4 Recommandation de diamètre caractéristique des matériaux pour les études..	5
3 Vents à Beauport.....	7
3.1 Données de la station de Beauport.....	7
3.2 Données de vent à Beauport.....	8
4 Vagues devant Beauport.....	10
4.1 Contexte de l'étude de vagues.....	10
4.2 Fetchs.....	10
4.3 Génération des vagues devant Beauport.....	14
4.4 Vagues prédites devant Beauport – Point BB1 à BB4.....	14
4.5 Hauteur des vagues de dimensionnement à Beauport.....	17
4.6 Tempêtes du secteur est-nord-est à Beauport.....	18
4.7 Tempêtes du secteur ouest-sud-ouest à Beauport.....	22
5 Niveaux d'eau.....	24
5.1 Sources de l'information.....	24
5.2 Données du SHC.....	24
5.3 Base de données de la station de Lauzon.....	25
5.4 Influence des changements climatiques sur les niveaux d'eau hauts.....	26
6 Pente de stabilité de la plage.....	28
6.1 Granulométrie du matériel de recharge.....	28
6.2 Profil d'équilibre de la plage actuelle.....	29
7 Dimensionnement transversal de la plage.....	38
7.1 Généralités.....	38
7.2 Définition des événements de dimensionnement.....	38
7.3 Remontée des vagues sur la plage.....	39
7.4 Profils d'équilibre de la nouvelle plage principale.....	39
8 Dimensionnement en plan de la plage.....	45
8.1 Généralités.....	45
8.2 Options V1, V2 et V3.....	45
8.3 Options V4 et V5.....	46

8.4 Options V6.....	47
8.5 Options de plage principale 2014-V1 à V5.....	48
8.6 Options de plage de kitesurf 2014-V6 et V7.....	49
8.7 Résultats de la première série de modélisations de Lasalle NHC.....	51
8.8 Résultats de la deuxième série de modélisations de Lasalle NHC.....	53
8.9 Configuration de plage principale recommandée – 600 000 m3.....	54
8.10 Configuration de plage principale recommandée – 400 000 m3.....	55
8.11 Configuration de plage de kitesurf recommandée.....	56
9 Dimensionnement de l'enrochement.....	58
9.1 Remontée des vagues sur l'enrochement.....	58
9.2 Dimension des enrochements de protection.....	59
9.3 Coupe-types de l'enrochement.....	60
9.4 Musoir en rip-rap.....	61
10 Conclusion et recommandations.....	63
10.1 Conclusion.....	63
10.2 Recommandations.....	63
Annexe A.....	Tempêtes du secteur Est-Nord-Est près de Beauport
Annexe B.....	Tempêtes du secteur Ouest-Sud-Ouest près de Beauport
Annexe C.....	Transects de la plage de Beauport

Préliminaire

1 Introduction

L'Administration portuaire de Québec (APQ) prépare le projet d'extension de ses installations portuaires dans le secteur de Beauport (figure 1.1). Dans le cadre de ce projet, l'APQ voudrait profiter des sédiments dragués dans le cadre de la construction de nouveaux quais pour réaménager la zone récréotouristique et assurer une meilleure pérennité à la plage de Beauport.

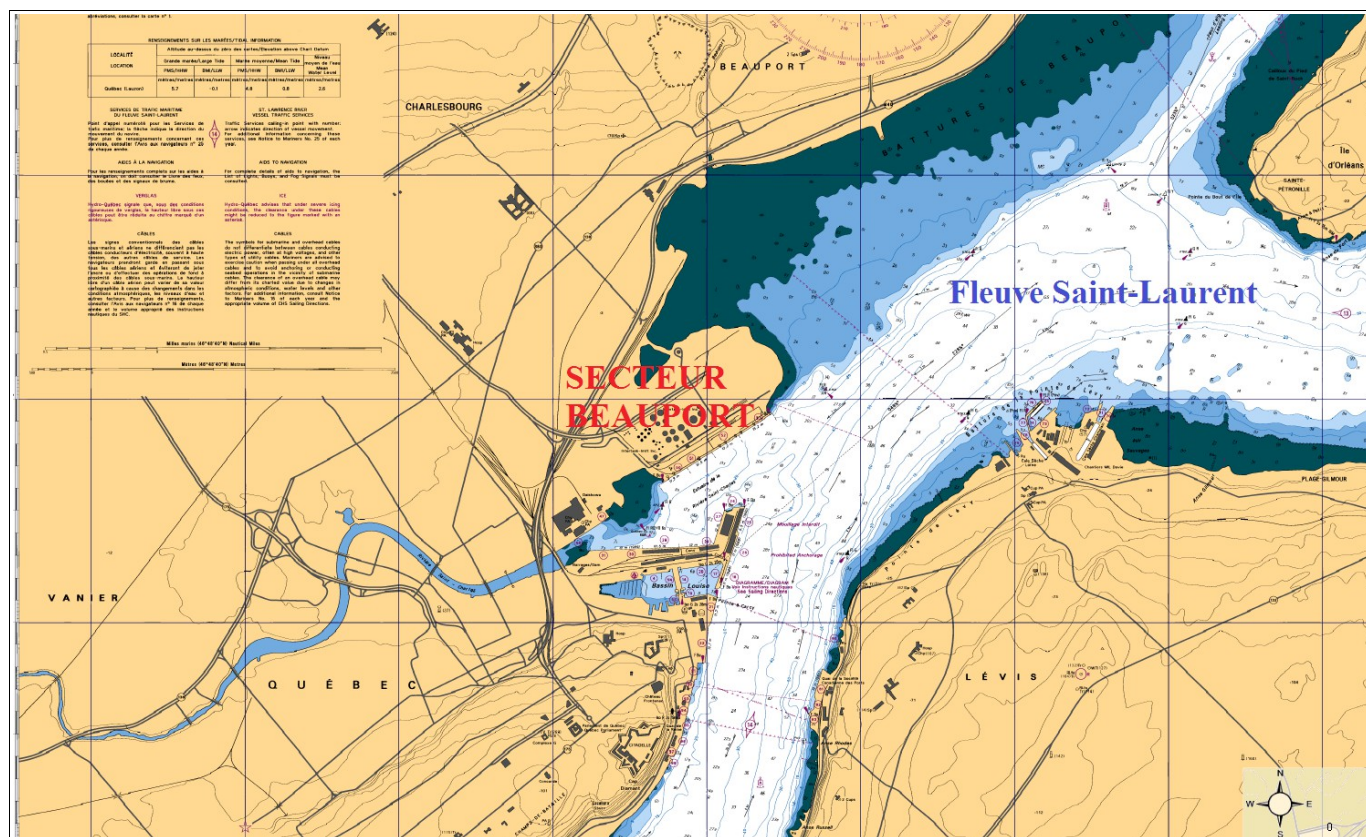


Figure 1.1 Plan de localisation des installations portuaires de l'APQ à Beauport (carte marine 1316)

Le projet consiste à utiliser les sédiments dragués pour créer une nouvelle plage ayant des caractéristiques géométriques lui permettant de perdurer dans le temps au lieu de subir l'érosion et les déplacements massifs de sédiments que connaît la plage actuelle. Une structure de type brise-lames serait installée pour s'assurer de la stabilité de la future plage. Le plan de Hatch¹ daté du 28 mars 2013 et reproduit sur la figure 1.2 donne une idée de la géométrie que pourrait avoir la nouvelle plage et de l'extension portuaire.

En juillet 2013, l'APQ a demandé à Lasalle|NHC et à Consultants Ropars Inc. (CRI) de concevoir cette nouvelle plage en fonction de la présence de l'extension du quai (poste 54) et d'une quantité de sédiments

¹Hatch Mott MacDonald, « Nouvelles infrastructures portuaires – Secteur de Beauport - Avant-projet », No de dessin 316823-GA-100-79-xxxx, 28 mars 2013

de 650 000 m³. En juin 2014, l'APQ a demandé à Lasalle|NHC et à CRI de réviser à la baisse les quantités de sédiments à utiliser dans le projet de recharge de plage, soit 400 000 m³.

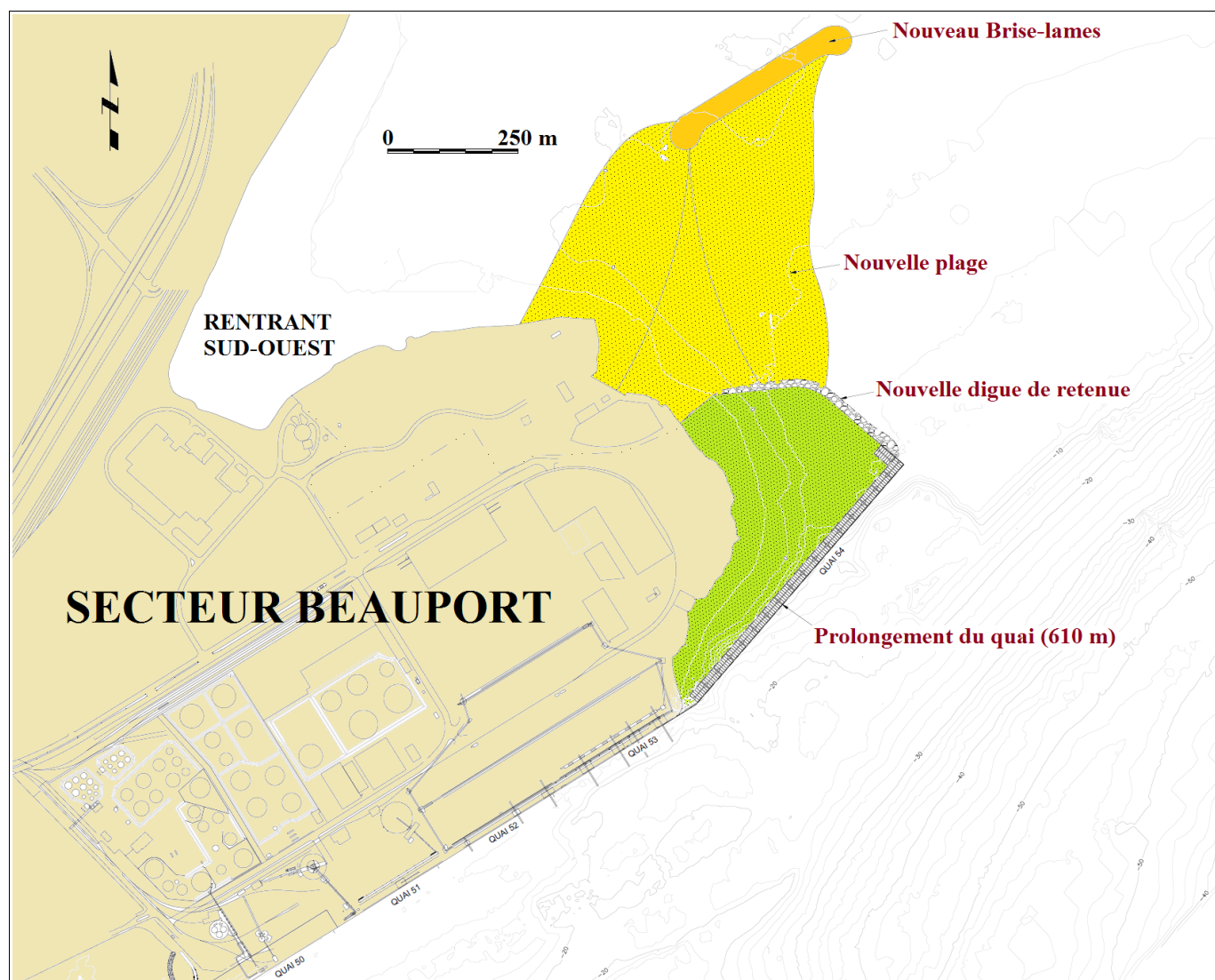


Figure 1.2 Illustration d'une géométrie potentielle de la nouvelle plage (Hatch 2013)

2 Granulométrie des sédiments disponibles

2.1 Étude géotechnique

Une campagne géotechnique a été réalisée par Groupe Qualitas Inc. de septembre à novembre 2012 (figure 2.1). Six forages ont été réalisés dans la zone de dragage, source des sédiments de la plage.

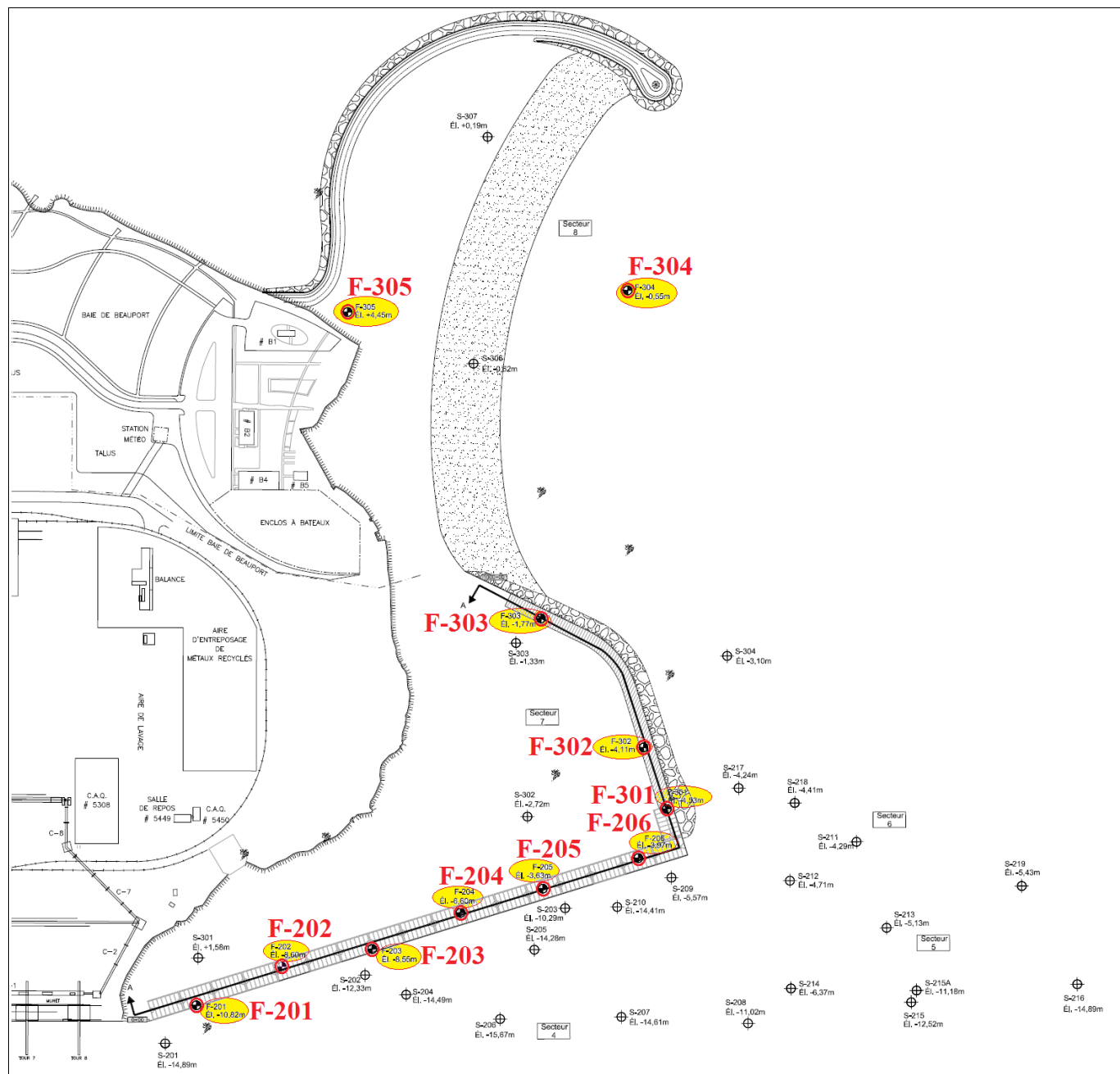


Figure 2.1 Localisation des forages géotechniques

2.2 Analyse de la granulométrie des sédiments servant à la plage

Les analyses granulométriques des sédiments de la série 20x ont été étudiées en ne retenant que les sédiments susceptibles d'être dragués (élévation supérieure à -16 m ZC²).

La figure 2.2 présente les courbes granulométriques obtenues pour ces échantillons sélectionnés.

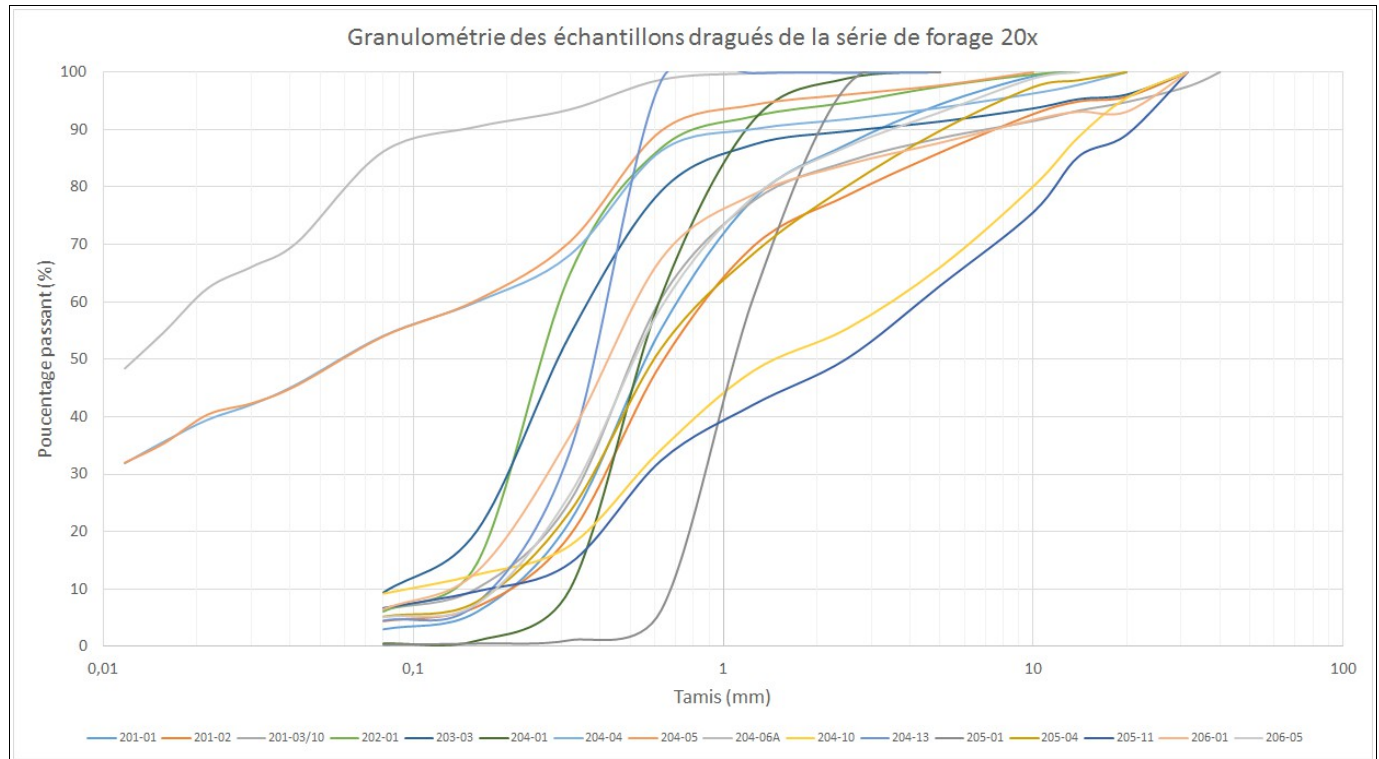


Figure 2.2 Courbes granulométriques des sédiments dragués

On constate sur la figure 2.2 une assez grande dispersion des courbes granulométriques, les sédiments allant du silt au gravier. Les sédiments silteux vont probablement être évacués de la plage, s'il s'y retrouvent, parce que les vagues vont rapidement les disperser dans l'eau et les courants vont les emporter. Si on ne retient que les sédiments sableux et graveleux qui devraient être plus stables sur la plage, les diamètres caractéristiques D_{50} (50 % passant) varient entre 0,15 mm et 2,5 mm.

2.3 Analyse des sédiments actuellement sur la plage

Les granulométries des sédiments prélevés dans la zone qui ne sera pas draguée ont également été étudiées. Par contre, la position des forages est loin d'être idéale pour l'étude des sédiments constituant la plage actuelle et la profondeur de prélèvement pose également un problème.

²ZC = Zéro des cartes marines ou référence marégraphique

La figure 2.3 présente l'ensemble des courbes granulométriques de ces sédiments. La seule conclusion qui peut être tirée de cette figure est que les sédiments constituant la fondation de la plage actuelle sont très similaires à ceux qui seront dragués.

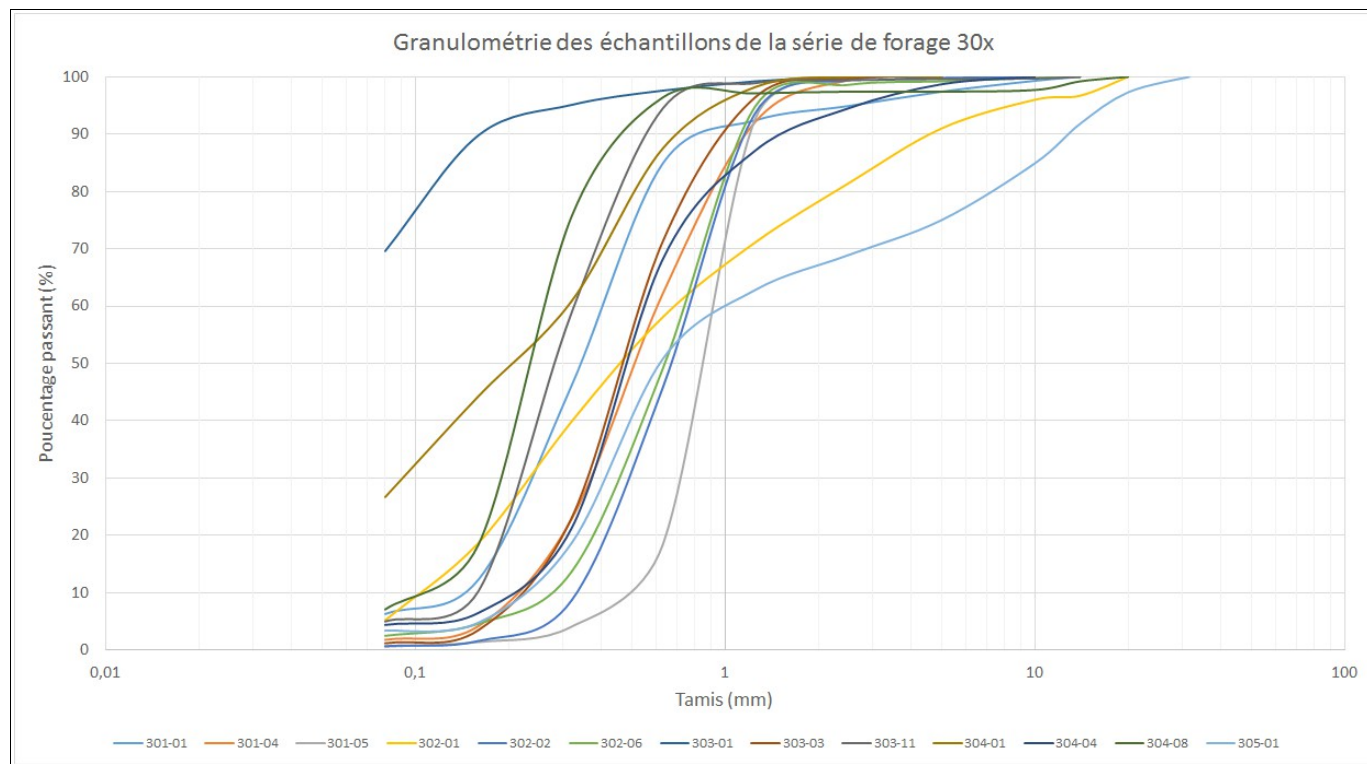


Figure 2.3 Courbes granulométriques des sédiments dans la zone non-draguée sous la plage actuelle

2.4 Recommandation de diamètre caractéristique des matériaux pour les études

La figure 2.4 présente la courbe de fréquence de dépassement des diamètres caractéristiques D_{50} pour l'ensemble des échantillons de sédiments prélevés dans la zone qui sera draguée. On voit sur cette courbe que le diamètre caractéristique D_{50} le plus représentatif de cette série d'échantillons est de **0,5 mm**. C'est ce diamètre qui a servi de base aux différents calculs de stabilité de la nouvelle plage. L'étude de sensibilité a également fait intervenir un D_{50} de 0,2 mm pour tenir compte du risque posé par une concentration locale de sédiments plus fins que les sédiments de taille moyenne.

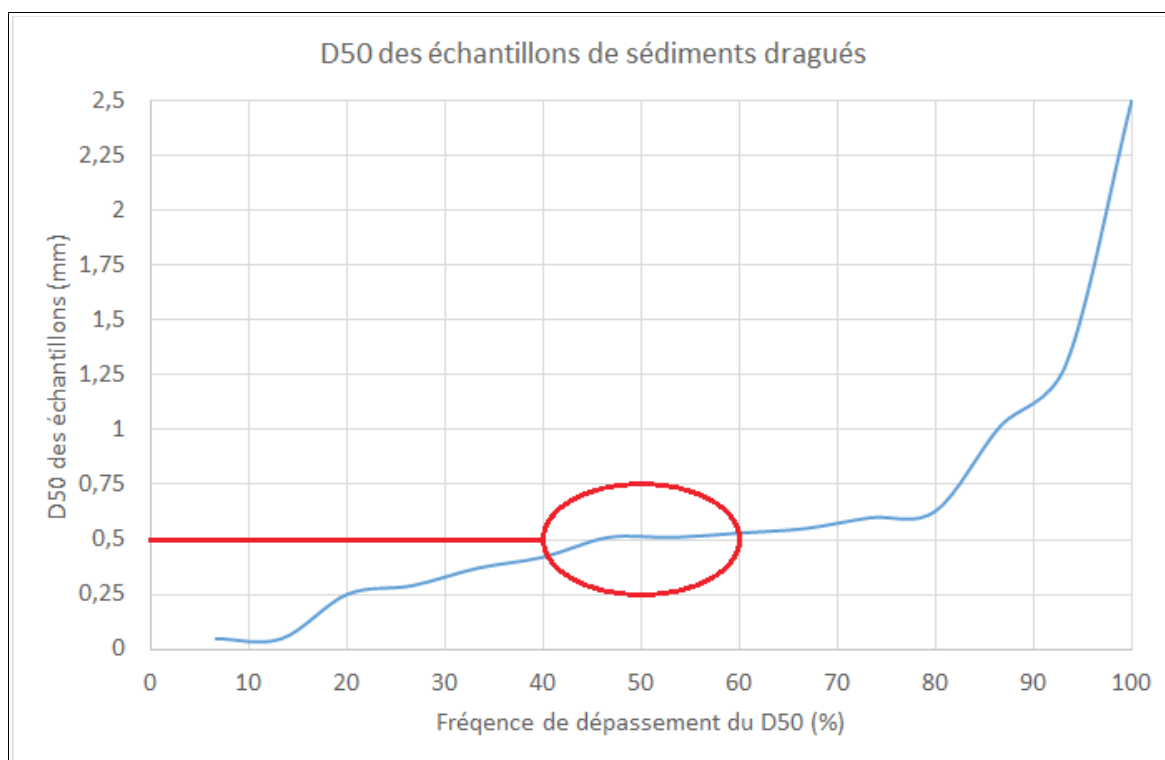


Figure 2.4 Fréquence de dépassement des D_{50} des échantillons de sédiments dans la zone draguée

3 Vents à Beauport

3.1 Données de la station de Beauport

La station météorologique d'Environnement Canada à Beauport (7010565) est située par 46°50'13,000" N et 71°11'50,000" O à une altitude de 10 m. Les données horaires sont disponibles sur le site Internet d'Environnement Canada à l'adresse : (http://climat.meteo.gc.ca/climateData/hourlydata_f.html?timeframe=1&Prov=QUE&StationID=27803&hlyRange=1999-08-19|2013-11-04&Year=2013&Month=11&Day=4).

Des données horaires sont disponibles à cette station depuis le 19 août 1999.

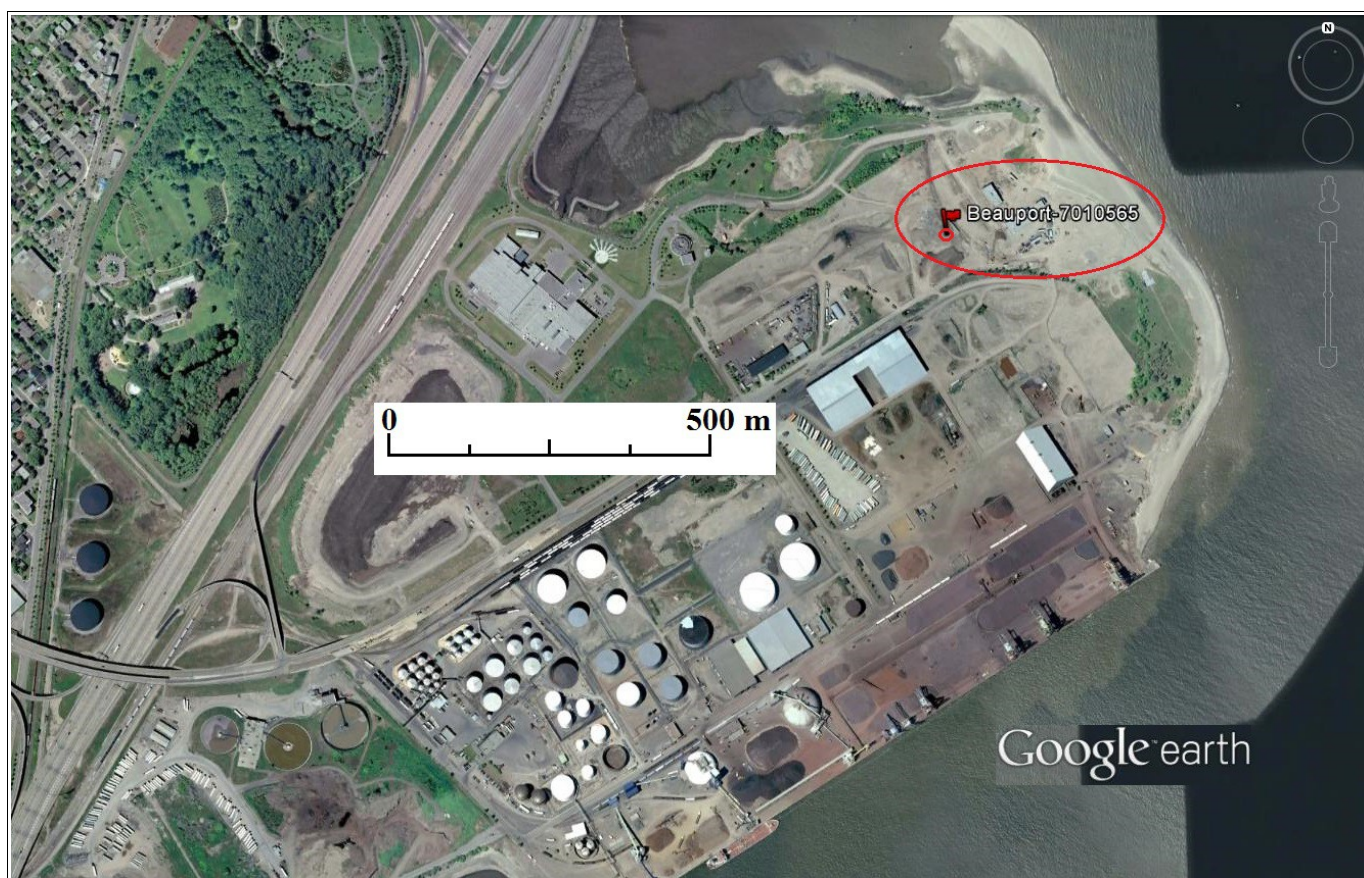


Figure 3.1 Localisation de la station météorologique de Beauport (Google Earth™)

La station météorologique de Beauport est relativement bien située pour étudier les vagues les plus fortes (celles du secteur Est) qui affectent la stabilité de la plage de Beauport. Par contre, cette station n'est pas très bien située pour ce qui est des vents du secteur sud-ouest, affectés par la topographie (cap Diamant) et les différentes infrastructures qui se trouvent sur les terrains du Port.

La base de données de cette station de Beauport présente plusieurs trous. Les vagues et les niveaux d'eau étant très importants dans l'évaluation de l'impact d'une tempête sur une plage (surtout avec un marnage de près de six mètres), il a fallu compléter la base de données de vents à Beauport.

Pour être en mesure de reconstituer les différentes tempêtes et de les dater, une base de données « complétée » a ainsi été créée en interpolant linéairement les valeurs de direction et de vitesse de vent lorsque les trous ne duraient que quelques heures et que la direction des vents ne variait que de quelques degrés. Par contre, en cas d'interruption prolongée de fonctionnement de la station, les trous ont été comblés par des « zéros » (pas de vent) de façon à simplement conserver l'horloge en marche et être en mesure de dater les tempêtes suivantes. Ce travail a permis de relier les séries temporelles de tempêtes dont les vents ont été enregistrés à la station de Beauport aux niveaux d'eau qui se sont produits lors de ces tempêtes dans la région de Québec.

3.2 Données de vent à Beauport

La figure 3.2 présente la rose des vents de la station de Beauport.

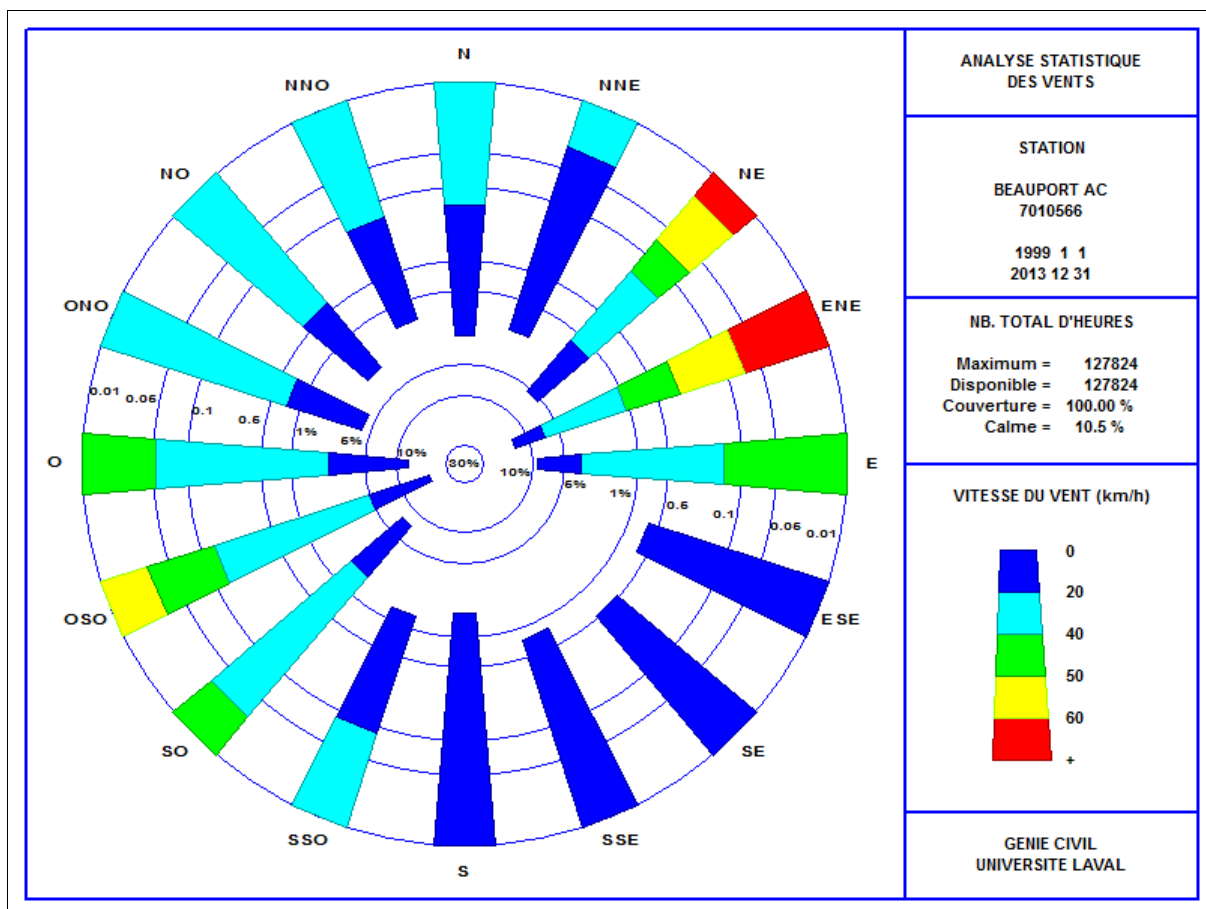


Figure 3.2 Rose des vents de la station de Beauport (1999-2013)

Les vents des secteurs ENE et NE dominent largement la rose des vents de cette station en vitesse et en fréquence. Les vents du secteur OSO viennent ensuite.

Les vents horaires présentant les plus grandes vitesses de cette base de données proviennent du secteur ENE et ont soufflé à 80 km/h (vitesse moyenne sur une heure – les vitesses des vents en rafales ne sont pas disponibles dans cette base de données d'Environnement Canada).

4 Vagues devant Beauport

4.1 Contexte de l'étude de vagues

Une étude de prédiction des vagues a été effectuée dans le cadre de l'étude de la plage de Beauport. En l'absence de données de vagues appropriées, celles-ci sont établies à l'aide d'un modèle mathématique sur ordinateur, à partir des enregistrements de vent à une station météorologique avoisinante. La station météorologique la plus proche du secteur à l'étude est celle de Beauport (voir chapitre 3).

4.2 Fetchs

Les fetchs sont les distances d'eau libre sur lesquelles les vents peuvent soulever les vagues dans une direction donnée. Les fetchs permettant de calculer la hauteur des vagues ont été déterminés à partir des radiales mesurées tous les trois degrés (3°) sur la carte marine.

Plusieurs points d'origine des fetchs servant à prédire les vagues dans le secteur de Beauport ont été utilisés lors de cette étude. La figure 4.1 localise les quatre points de calculs qui ont été considérés.

- Les points BB1 et BB2 sont surtout destinés à bien identifier les vagues du secteur Est.
- Le point BB3 vise à bien identifier les vagues du secteur Sud-Ouest.
- Le point BB4 a été positionné de façon à identifier les vagues du secteur Ouest qui pouvaient être générées dans le « Rentrant Sud-Ouest » (baie située au nord-ouest de la plage de Beauport).

Les radiales et les fetchs utilisés dans les prévisions de vague suivant les directions d'intérêt ont été calculés à partir des quatre points indiqués sur la figure 4.1. À noter que le fetch effectif utilisé correspond à la moyenne plus un demi écart-type.

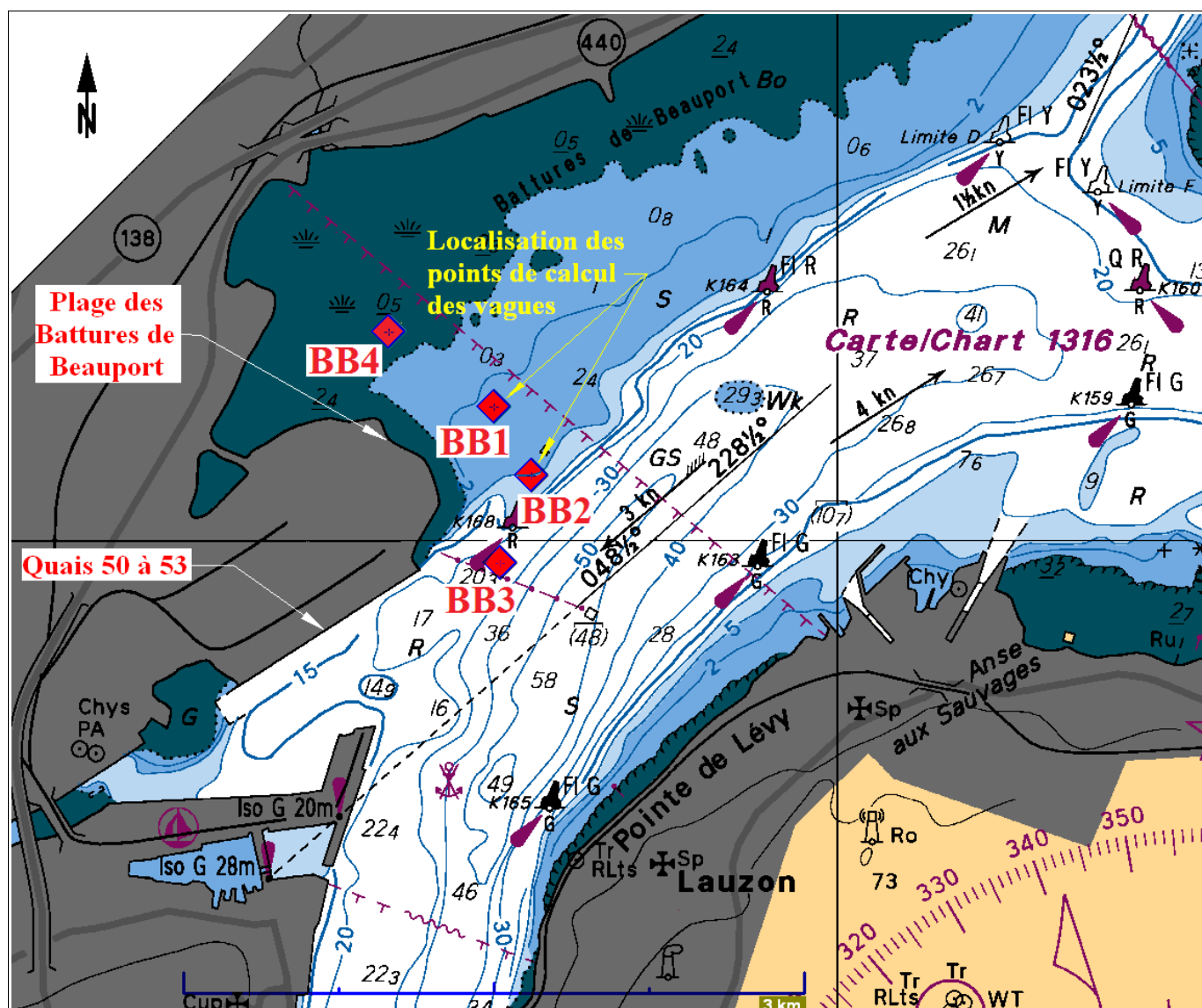


Figure 4.1 Position des points de calcul des radiales et fetchs devant Beauport (carte marine 1316)

Les figures 4.2 et 4.3 représentent graphiquement les séries de radiales (km) selon une rose pour les points BB1 et BB3.

Trois méthodes de calcul ont été utilisées pour calculer les fetchs effectifs. La méthode retenue ($\text{Moy} + \text{Std}/2$) est celle qui représente le mieux les longs fetchs qui caractérisent ce secteur du fleuve et produisent une évaluation sécuritaire des hauteurs de vagues.

La figure 4.4 représente les trois séries de fetchs (km) selon une rose pour le point BB1.

La figure 4.5 représente les fetchs effectifs retenus (km) pour les quatre points de calcul BB1, BB2, BB3 et BB4.

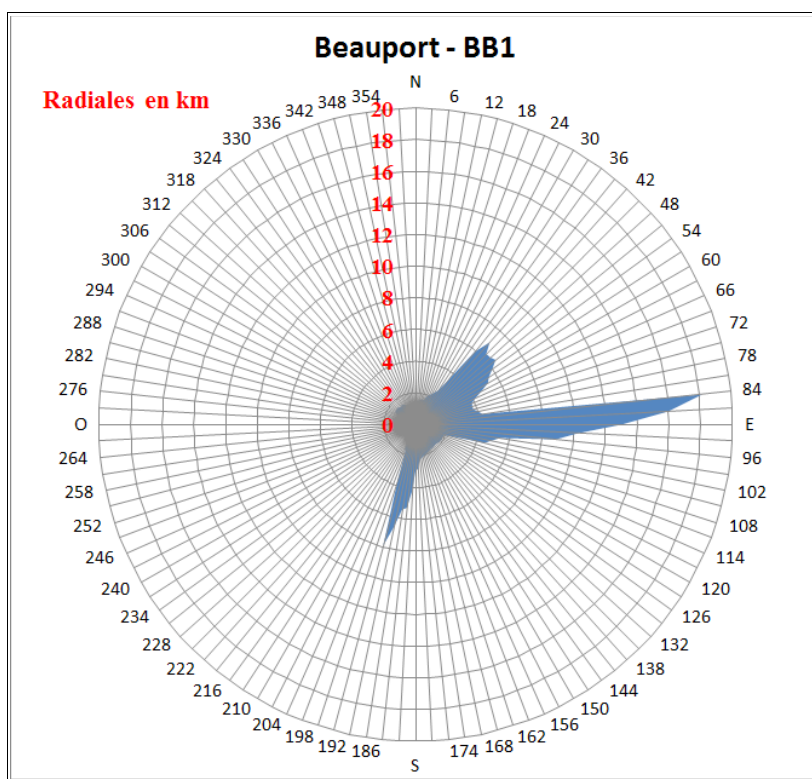


Figure 4.2 Rose des radiales pour les points BB1

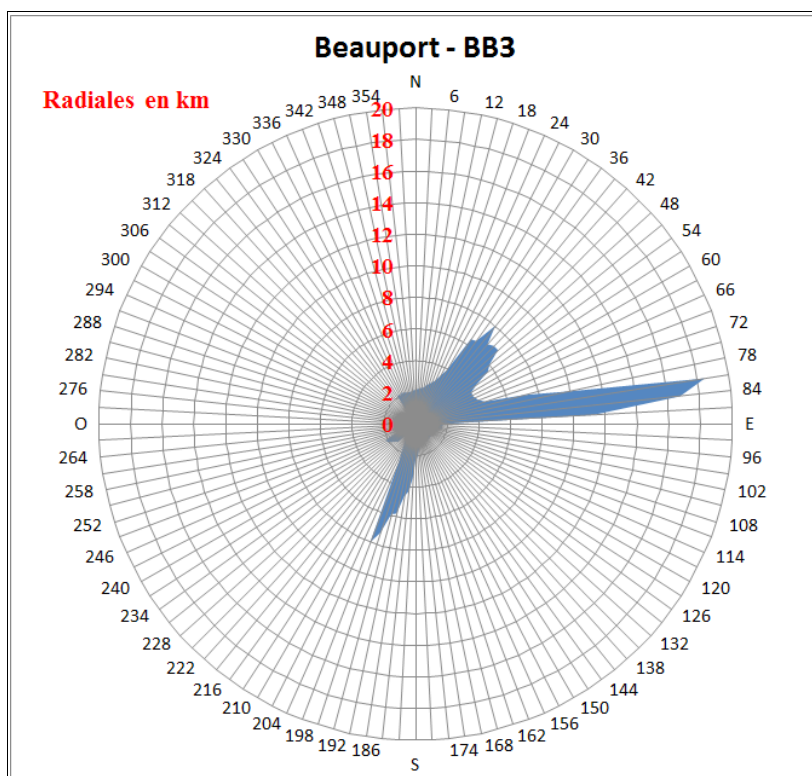


Figure 4.3 Rose des radiales pour les points BB3

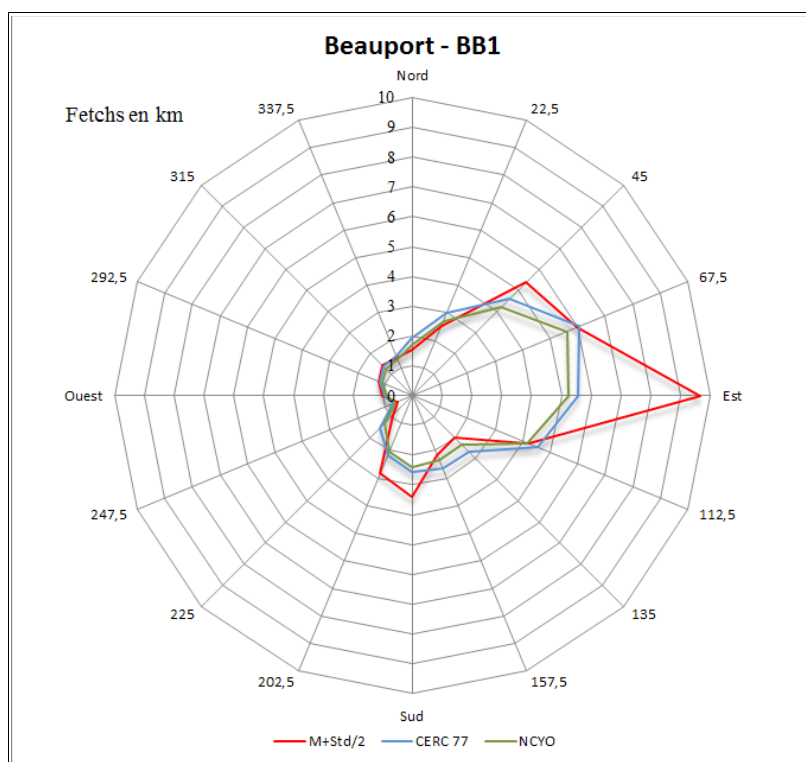


Figure 4.4 Rose des fetchs pour le point BB1

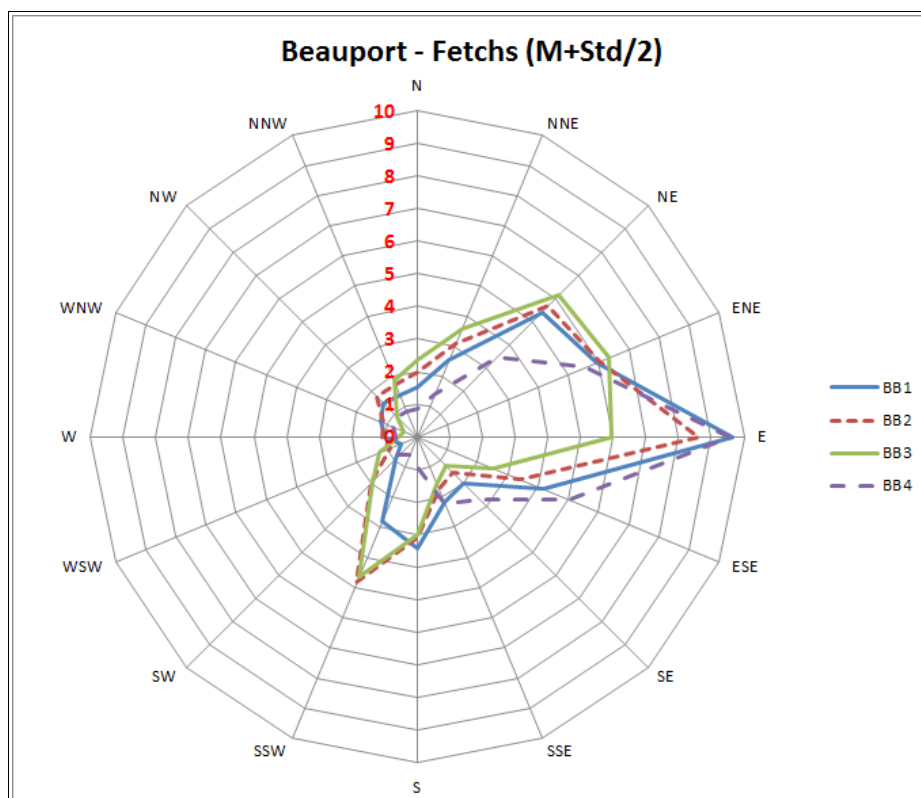


Figure 4.5 Rose des fetchs effectifs retenus pour les points BB1, BB2, BB3 et BB4

Le tableau 4.1 donne les séries de valeurs numériques des fetchs effectifs (km) obtenus et utilisés pour les calculs des hauteurs de vagues respectivement pour les points BB1, BB2, BB3 et BB4.

Tableau 4.1 Valeurs numériques des fetchs effectifs (km) selon les directions aux points BB1 à BB4

Point	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
BB1	1,5	2,5	5,4	6	9,6	4,2	2	2,2	3,4	2,8	0,9	0,6	1	1,2	1,5	1,4
BB2	2	3,1	5,7	6	8,6	3,4	1,5	1,7	3,1	4,8	2	0,9	1,1	1,1	1,7	1,7
BB3	2,3	3,6	6,1	6,3	5,9	2,5	1,3	1,6	3	4,7	1,9	1,2	0,6	0,4	0,8	1,9
BB4	0,9	1,4	3,5	5,6	9,6	5	2,7	2,2	0,9	0,6	0,8	0,8	0,7	0,8	0,9	0,9

4.3 Génération des vagues devant Beauport

À l'aide d'un modèle paramétrique sur ordinateur (GENER³, développé à l'université Laval), les données de vent de la station de Beauport ont été utilisées pour la reconstitution des vagues au large de la plage de Beauport de 1999 à 2013. Un facteur d'amplification de 1,1 a été appliqué aux vitesses du vent pour tenir compte du fait que la station de Beauport est située sur terre et non au-dessus de l'eau. Des enregistrements de vagues près du site seraient requis pour valider ce facteur.

Le modèle GENER applique la méthode S.M.B. (Shore Protection Manual, 1984) de façon séquentielle aux données horaires du vent pour obtenir les statistiques des vagues en un point au large de Beauport. Les données du vent sont préalablement lissées pour éliminer le plus possible les irrégularités présentes dans les données de ce genre. C'est la méthode du Shore Protection Manual 1977 (SPM 77) qui a été retenue pour le calcul des vagues. Par défaut, une profondeur d'eau de 100 m a été retenue dans les calculs pour éviter de sous-estimer les hauteurs de vagues prédites.

4.4 Vagues prédites devant Beauport – Point BB1 à BB4

Les figures 4.6 (point BB1), 4.7 (point BB2), 4.8 (point BB3) et 4.9 (point BB4) présentent les roses de vagues produites à partir des vents de la station météorologique de Beauport (facteur de 1,1) de 1999 à 2013.

Les quatre roses présentent quelques variations, en particulier en ce qui concerne les vagues du secteur sud-ouest, mais sont très cohérentes pour ce qui est des vagues du secteur est-nord-est.

³Desjardins & Ouellet 1984 – Université Laval

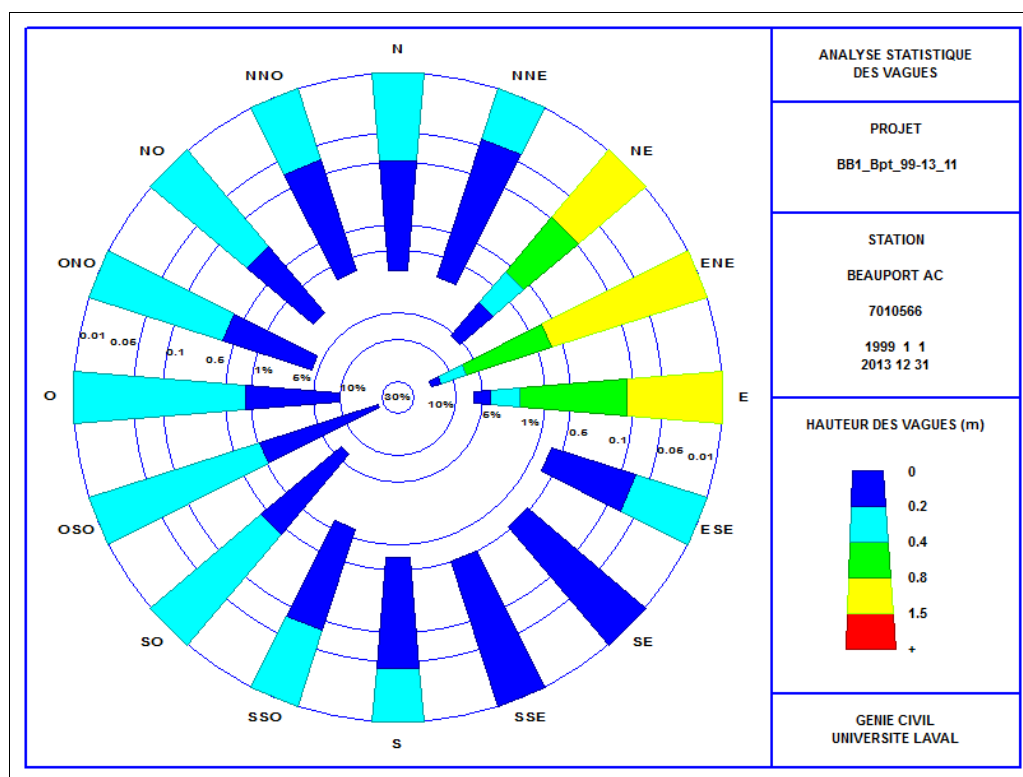


Figure 4.6 Rose des vagues au point BB1 - Données Beauport - 1999 à 2013

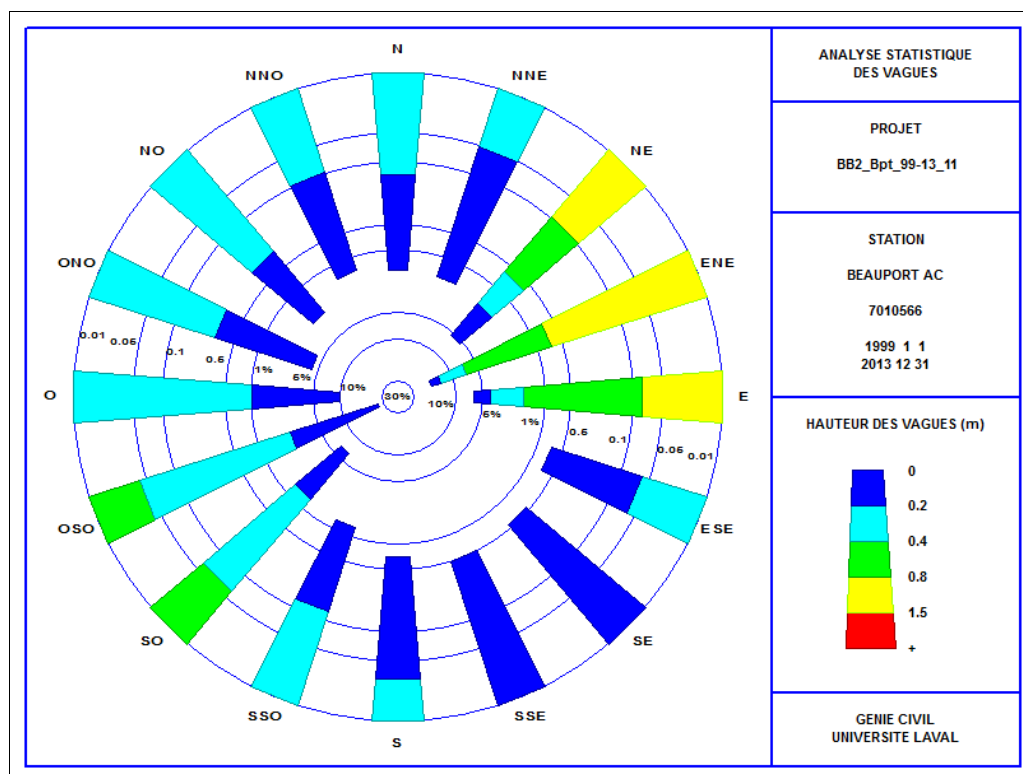


Figure 4.7 Rose des vagues au point BB2 - Données Beauport - 1999 à 2013

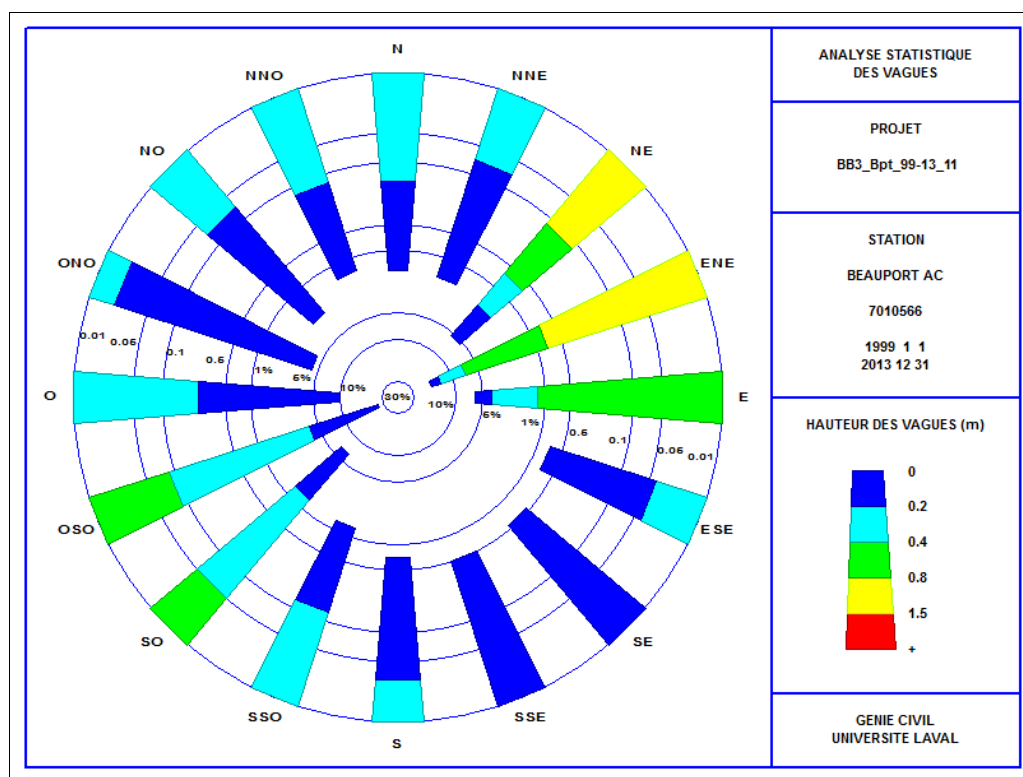


Figure 4.8 Rose des vagues au point BB3 - Données Beauport - 1999 à 2013

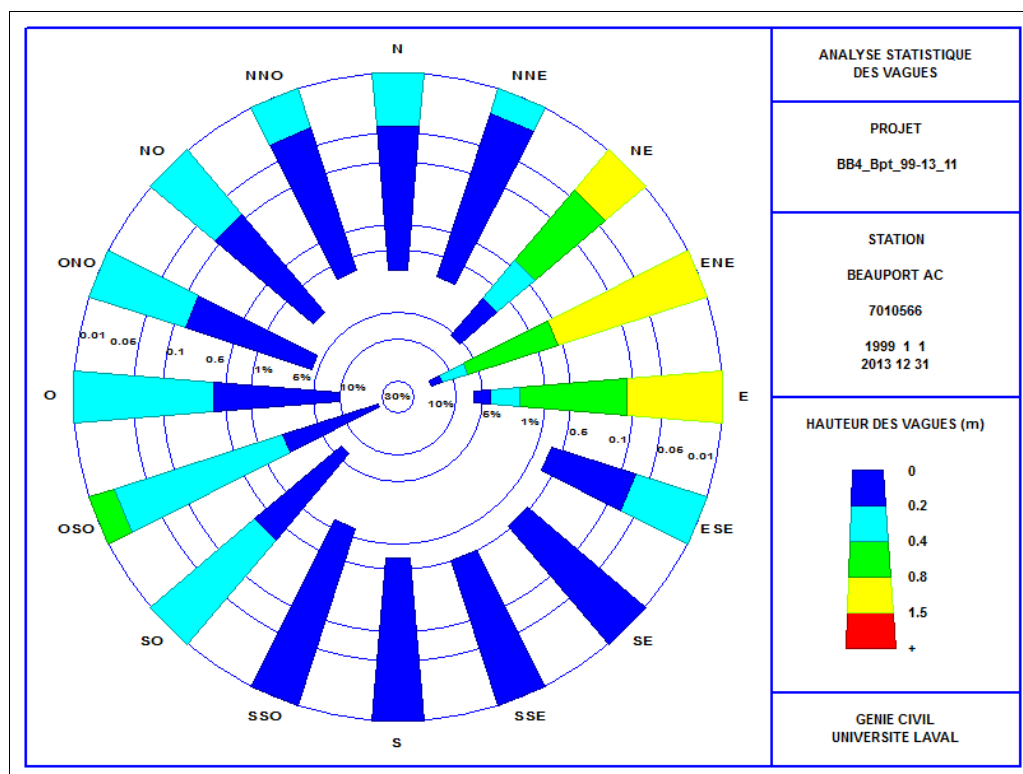


Figure 4.9 Rose des vagues au point BB4 - Données Beauport - 1999 à 2013

4.5 Hauteur des vagues de dimensionnement à Beauport

Les vagues qui se produisent au site de Beauport ont été analysées en utilisant la série temporelle développée au point BB1 avec les vents de la station de Beauport de 1999 à 2013 (facteur de 1,1 appliqué aux vitesses de vent). La figure 4.10 illustre la relation statistique obtenue sur les grandes hauteurs de vagues modélisées (régression logarithmique).

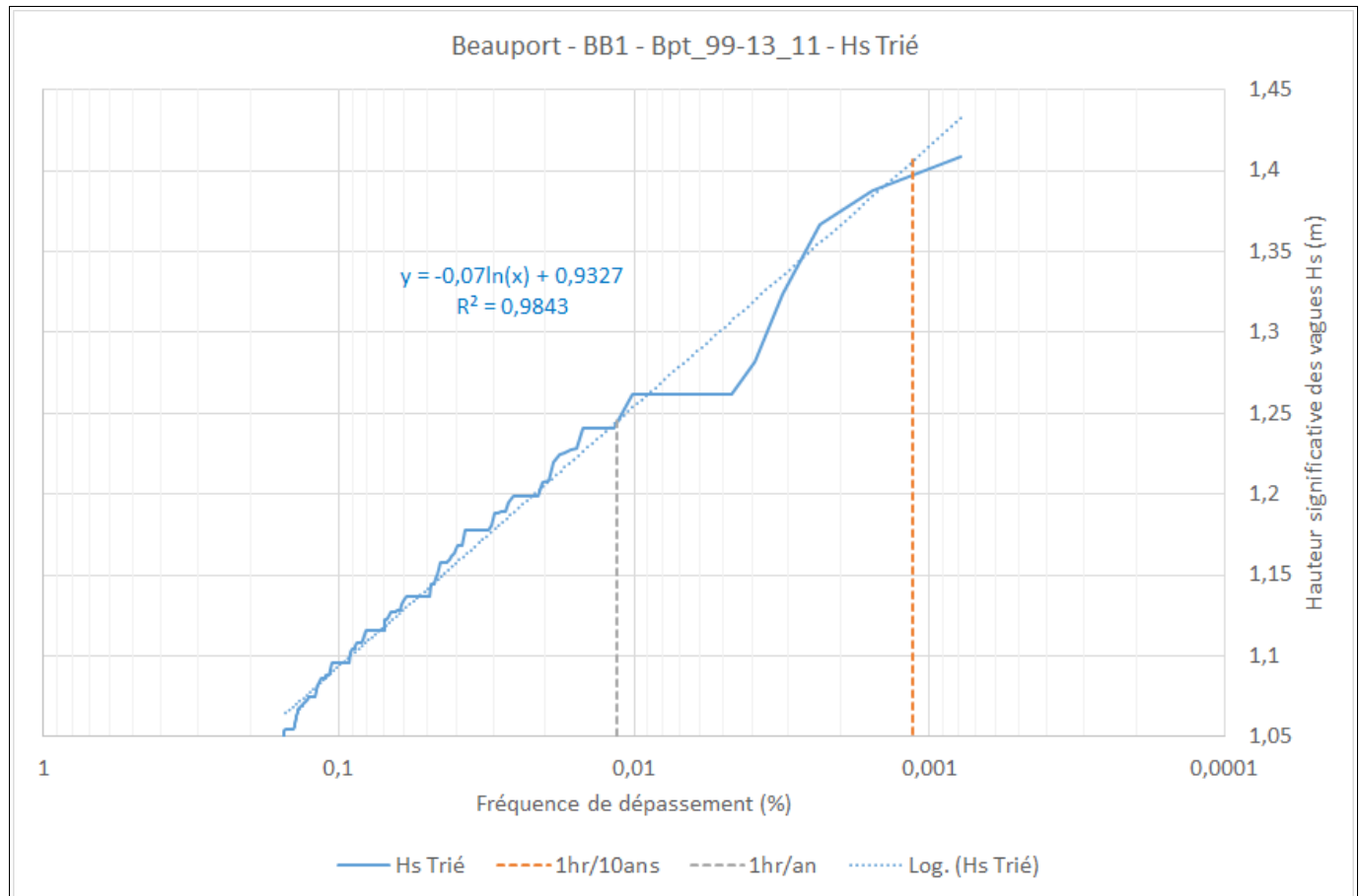


Figure 4.10 Fréquence de dépassement des hauteurs de vagues – Point BB1

En appliquant l'équation de régression logarithmique obtenue, on obtient une hauteur significative de vagues Hs de :

- 1,48 m pour une période de retour de 50 ans,
- 1,52 m pour une période de retour de 100 ans.

4.6 Tempêtes du secteur est-nord-est à Beauport

Les tempêtes du secteur est-nord-est sont les plus sévères pour la stabilité de la plage dans le secteur de Beauport. De plus, ces tempêtes s'accompagnent souvent d'une hausse du niveau d'eau (onde de tempête ou surcote) qui provoque une érosion du haut de plage.

Les figures suivantes illustrent l'évolution chronologique de trois paramètres (hauteur significative des vagues H_s en m, niveaux d'eau enregistrés à Lauzon en m ZC et vitesse du vent en dizaines de km/h) pour quelques unes des tempêtes ayant frappé la plage de Beauport et pour lesquelles ces paramètres étaient disponibles.

Le premier exemple de tempête sévère du secteur est-nord-est (figure 4.11) est celle du 9 mai 2000. Le vent du secteur est-nord-est s'est levé et a rapidement atteint les 70 km/h vers 06h00 HNE le 9 mai 2000. Il s'est maintenu au-dessus de 50 km/h jusqu'à minuit. Le vent s'est ensuite maintenu au-dessus de 40 km/h pendant encore une journée le 10 mai 2000. Les hauteurs de vagues modélisées ont rapidement dépassé le mètre de hauteur significative et se sont maintenues pendant 27 heures entre 1,2 m et 0,8 m. La marée haute de 11h00 le 9 mai (voir chapitre 5) a pratiquement atteint 6,0 m ZC mais les marées hautes suivantes ont été plutôt moyennes.

Le deuxième exemple de tempête sévère du secteur est-nord-est (figure 4.12) est celle du 6 décembre 2003. Le vent a régulièrement augmenté pendant 24 heures pour pratiquement atteindre 70 km/h et s'est maintenu un autre six heures au-dessus de 50 km/h. Les vagues ont suivi la montée du vent jusqu'à dépasser le mètre de hauteur significative. Le plus remarquable de cette tempête est cependant la surcote qui s'est produite le 7 décembre 2003 vers 17h00 alors que la marée aurait dû être moyenne. Cette surcote a fait que le niveau d'eau a probablement dépassé d'un mètre le niveau prédit.

Le troisième exemple de tempête sévère du secteur est-nord-est (figure 4.13) est celle du 15 octobre 2003. Le vent a été relativement violent (maximum près de 70 km/h), mais n'a pas persisté plus de 5 heures au-dessus de 50 km/h. La synchronisation des grandes hauteurs de vagues et de la marée haute a cependant pu affecter la plage.

Toutes les tempêtes modélisées du secteur est-nord-est s'étant produites en-dehors de la période d'englacement à Beauport entre 1999 et 2013 sont illustrées à l'annexe A.

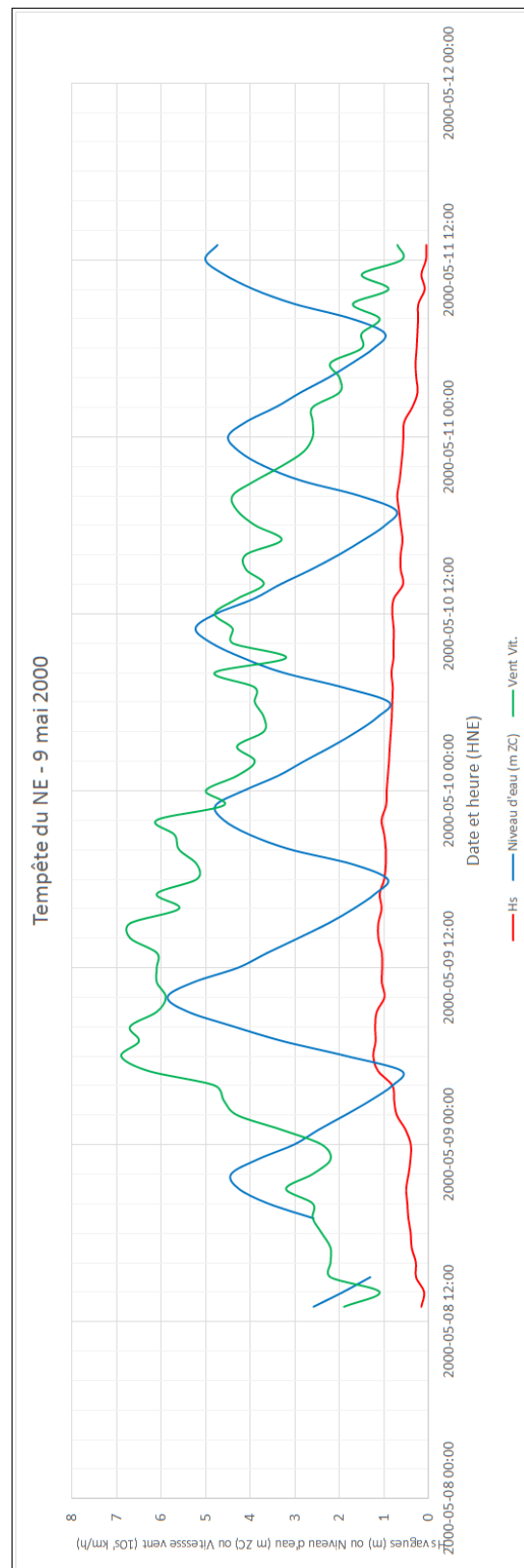


Figure 4.11 Tempête du secteur ENE - 9 mai 2000

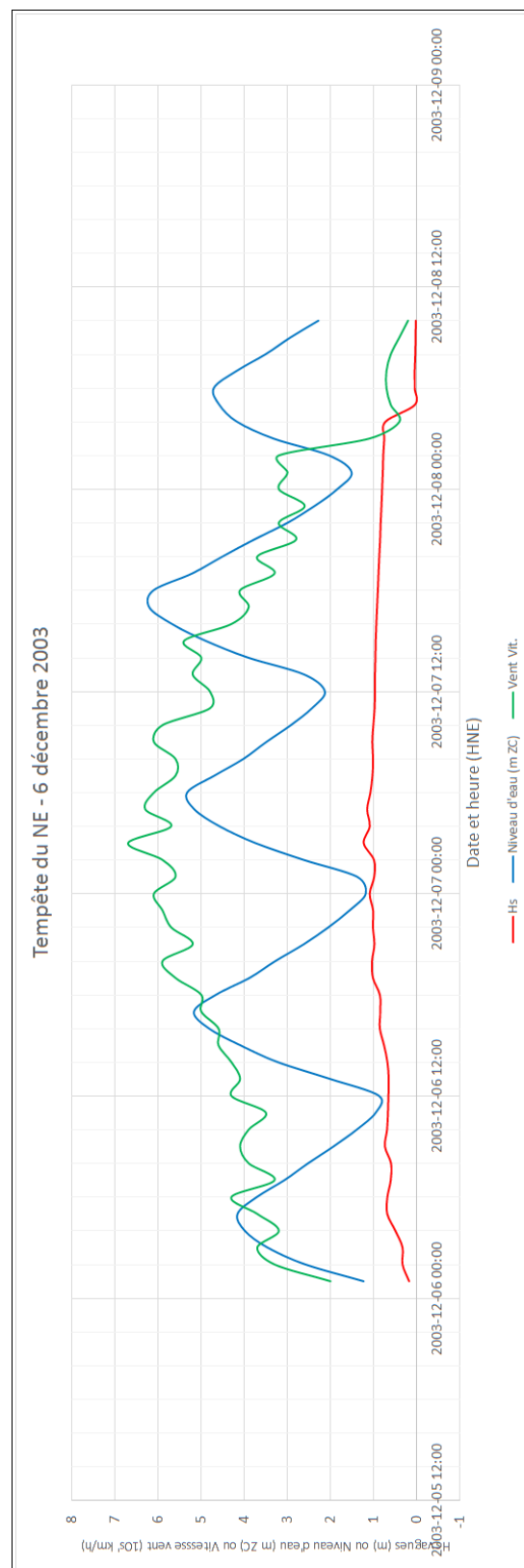


Figure 4.12 Tempête du secteur ENE – 6 décembre 2003

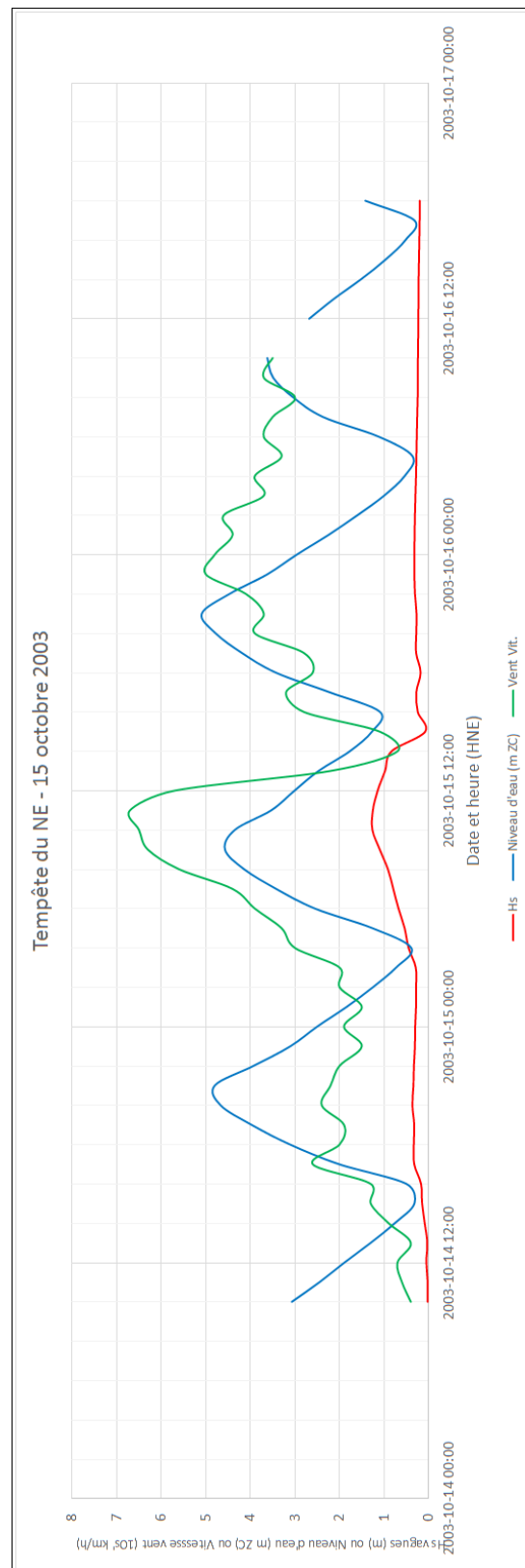


Figure 4.13 Tempête du secteur ENE – 15 octobre 2003

4.7 Tempêtes du secteur ouest-sud-ouest à Beauport

Les tempêtes du secteur ouest-sud-ouest sont nettement moins sévères pour la stabilité de la plage dans le secteur de Beauport. Leur direction fait en sorte que les vagues n'atteignent pas directement la plage principale. Ces tempêtes ne s'accompagnent généralement pas de surcote.

Par contre, ce sont les vagues qui affecteront la face nord de la nouvelle plage (secteur de kitesurf) et il est important de s'assurer de leur impact sur cette partie de la plage.

L'exemple de la tempête du 18 décembre 2000 (figure 4.14) montre un vent qui est rapidement monté à 70 km/h levant des vagues de l'ordre de 0,7 m de hauteur significative au point BB3. Cette tempête a duré environ une quinzaine d'heures. Le pic de vent s'est produit à marée basse mais le vent s'est maintenu assez fort jusqu'à la haute marée suivante.

Toutes les tempêtes modélisées du secteur ouest-sud-ouest s'étant produites en-dehors de la période d'englacement à Beauport sont illustrées à l'annexe B.

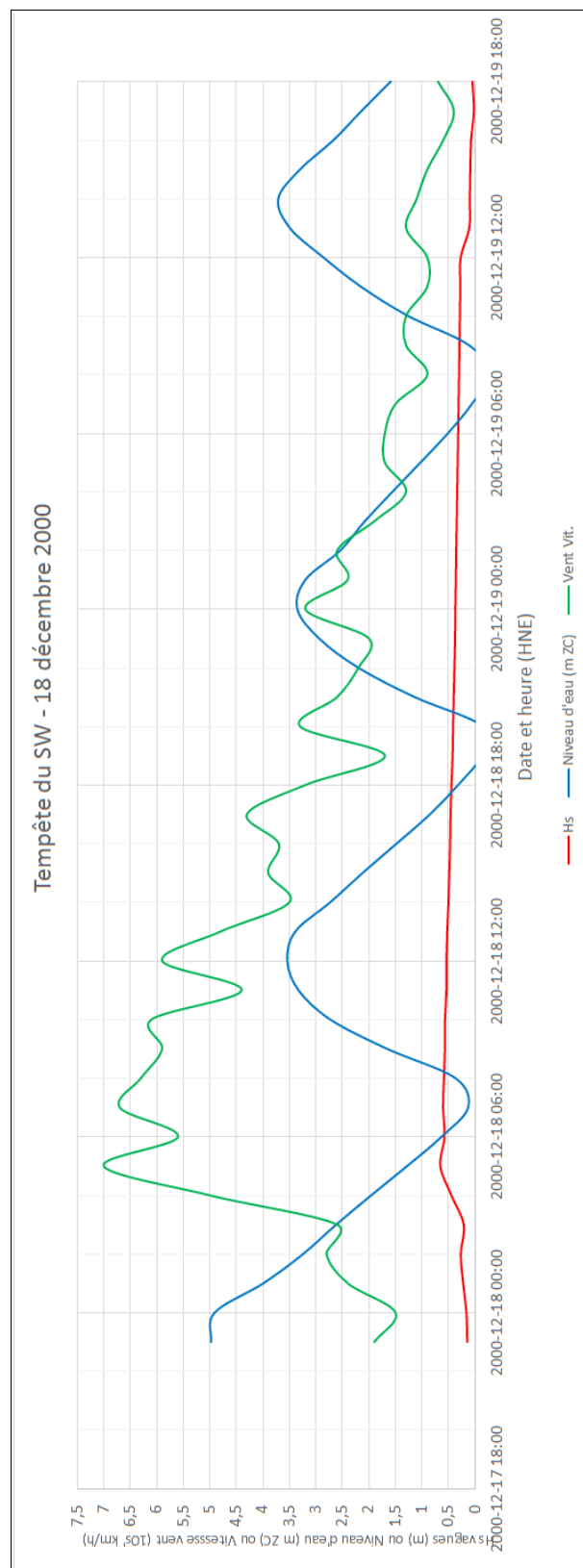


Figure 4.14 Tempête du secteur SO – 18 décembre 2000

5 Niveaux d'eau

5.1 Sources de l'information

La Gestion des données scientifiques intégrées (GDSI) du ministère des Pêches et Océans Canada (MPO) met à la disposition du public les niveaux d'eau enregistrés à ses stations sur Internet⁴.

Des stations de la GDSI sont disponibles à proximité du secteur Beauport :

- La station de référence de Lauzon⁵ (N° 3250) pour laquelle des données horaires sont disponibles en 1896 et 2012 (environ 527 000 valeurs horaires recueillies entre 1950 et 2012),
- La station du Vieux-Québec (N° 3248) qui opère depuis 2009 et qui a remplacé la station de Lauzon depuis 2012 (près de 30 000 données horaires).

Les données des deux stations du Service hydrographique du Canada (SHC) à Québec ont été utilisées pour illustrer les niveaux d'eau qui se sont produits à Beauport lors des tempêtes.

Le SHC donne une différence de 1,958 m entre le Zéro des cartes marines (ZC) et le Niveau moyen des mers (NMM-CGVD28) pour Lauzon, le ZC se situant sous le NMM à Québec.

5.2 Données du SHC

Le Service hydrographique du Canada (SHC) fournit les informations générales suivantes pour la marée à Québec (Lauzon). Un niveau caractéristique important pour définir l'impact de la marée sur les plages est la Pleine mer supérieure de grande marée (PMSGM).

⁴<http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/isdm-gdsi/index-fra.html>

⁵<http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/isdm-gdsi/twl-mne/inventory-inventaire/sd-ds-fra.asp?no=3250&user=isdm-gdsi®ion=LAU&ref=maps-cartes>

Tableau 4.1 Données du SHC pour Lauzon (m ZC)

Localité		Lauzon	
Port de référence		Lauzon	
Carte marine no		1317	
Type de marées		Semi-diurne	
Marnage	Marée moyenne	4,4 m	
	Grande marée	5,9 m	
Hauteur	Pleine mer supérieure	Marée moyenne	4,9 m
		Grande marée	6,1 m
	Basse mer inférieure	Marée moyenne	0,5 m
		Grande marée	0,2 m
Extrêmes enregistrés	Extrême de pleine mer		7,1 m
	Extrême de basse mer		-1,3 m
Niveau moyen de l'eau			2,6 m

5.3 Base de données de la station de Lauzon

L'évaluation des fréquences de dépassement des niveaux d'eau enregistrés à la station de Lauzon a été faite entre 1950 et 2012. La figure 5.1 illustre cette analyse pour les « extrêmes hauts » observés pendant cette période.

D'après la base de données disponibles et en utilisant la régression logarithmique obtenue avec cette base de données, les niveaux d'eau ont été calculés pour les récurrences suivantes :

- Une heure par 50 années : +6,94 m ZC ou +4,98 m NMM
- Une heure par 30 années : +6,86 m ZC ou +4,90 m NMM
- Une heure par 10 années : +6,68 m ZC ou +4,72 m NMM
- Une heure par 5 années : +6,57 m ZC ou +4,61 m NMM
- Une heure par 2 années : +6,42 m ZC ou +4,46 m NMM
- Une heure par année : +6,30 m ZC ou +4,34 m NMM
- Douze heures par année : +5,90 m ZC ou +3,94 m NMM
- Une journée par année : +5,79 m ZC ou +3,83 m NMM

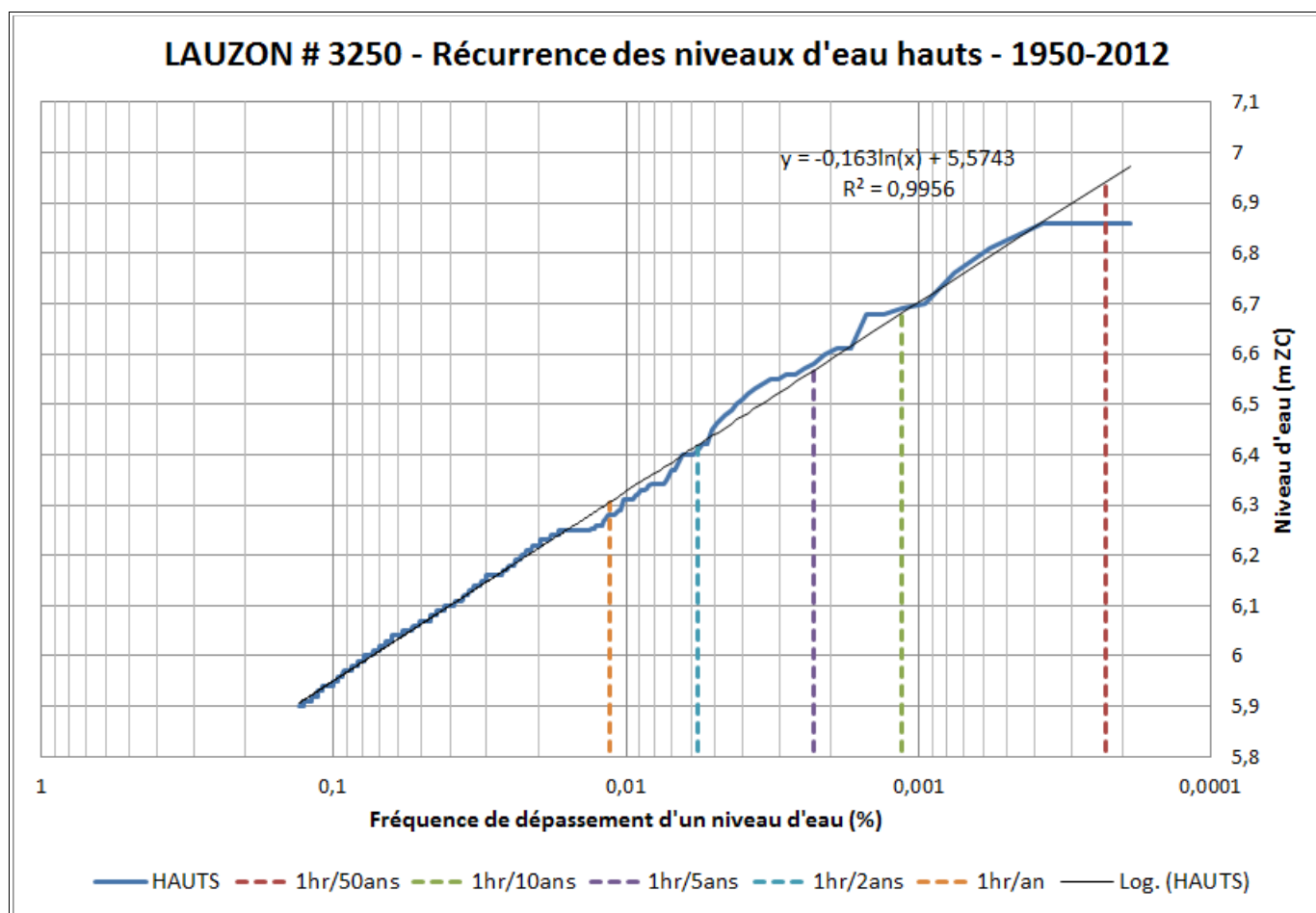


Figure 5.1 Fréquences de dépassement des niveaux d'eau hauts à Lauzon (1950 et 2012)

5.4 Influence des changements climatiques sur les niveaux d'eau hauts

Le rapport du GIEC 2012⁶ indique page 179 : « *An estimate [of Sea Level Rise] of 0.8 m by 2100 that included increased ice dynamics was considered most plausible* ». La figure 5.2 propose l'évolution de la hausse du niveau d'eau (ligne continue bleue) basée sur cette information. La ligne pointillée rouge correspond à la hausse des niveaux d'eau selon le taux de relèvement actuel du niveau moyen des océans (3,1 mm/an).

⁶IPCC-2012 « Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation »
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml#SREX

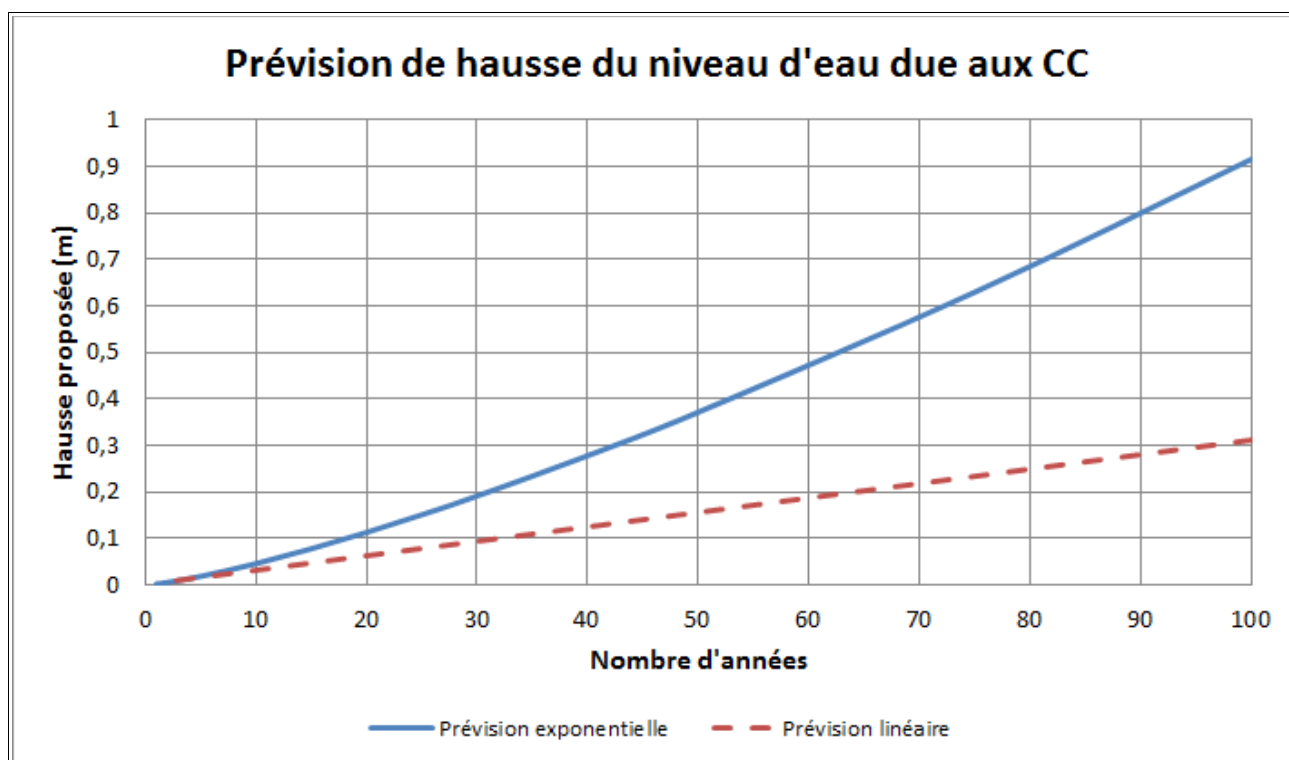


Figure 5.2 Hausse proposée du niveau moyen de l'eau en fonction des changements climatiques

Selon ces informations, les valeurs suivantes de niveaux d'eau devraient actuellement être considérées à Québec pour des périodes de retour données.

- Une heure par 50 années : +7,31 m ZC ou +5,35 m NMM
- Une heure par 30 années : +7,05 m ZC ou +5,09 m NMM
- Une heure par 10 années : +6,73 m ZC ou +4,77 m NMM
- Une heure par année : +6,30 m ZC ou +4,34 m NMM

6 Pente de stabilité de la plage

6.1 Granulométrie du matériel de recharge

Le Coastal Engineering Manual (CEM) du U.S. Army Corps of Engineers propose une équation permettant de calculer la géométrie d'une plage à partir des caractéristiques du matériel la constituant. Il s'agit d'une relation très simplifiée ne faisant intervenir que le diamètre médian D_{50} des matériaux de la plage et l'équation ne peut que donner une idée du profil d'équilibre probable de la plage. Une plage réelle est nettement plus complexe que cette idéalisation (voir figure 6.2). Cette équation est la suivante :

$$h = A y^{2/3} \quad [\text{Équation III-3-14}]$$

où h est l'élévation et y la distance en mètres calculée à partir de l'intersection du niveau moyen de l'eau et de la plage. « A » est un paramètre dépendant des caractéristiques géométriques (diamètre médian D_{50}) du sédiment utilisé pour la recharge de plage et parfois des vagues.

La figure 6.1 présente l'une des deux relations proposées dans le CEM entre le coefficient « A » et le diamètre D_{50} du matériel de la plage. Il s'agit d'une méthode simple d'évaluer la pente d'équilibre d'une plage qui a par contre l'inconvénient de ne pas faire intervenir les caractéristiques des vagues.

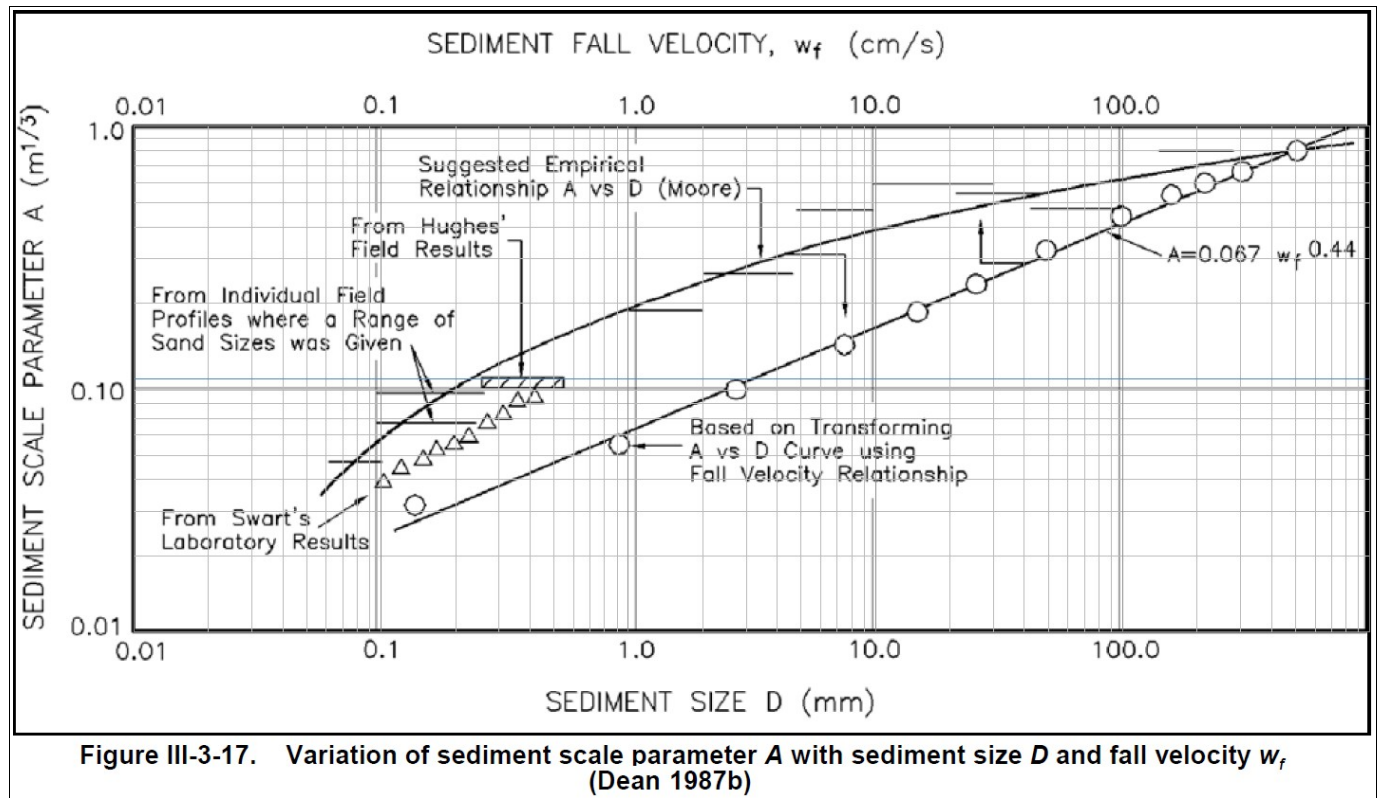


Figure 6.1 Relation entre le paramètre « A » et le diamètre médian du matériel de recharge

Le CIRIA⁷ propose une autre façon d'évaluer le paramètre « A », nettement plus compliquée à mettre en œuvre, mais qui fait intervenir la hauteur des vagues et la vitesse de chute des sédiments dans l'eau en fonction de leur taille. Compte tenu de l'exposition modérée des plages de Beauport aux vagues de tempête et des imprécisions quant à la hauteur de ces vagues, la méthode simplifiée du CEM sera retenue pour cette évaluation préliminaire du projet de plage.

Delft Hydraulics a développé un modèle numérique d'après les travaux de Van der Meer, 1998. Ce modèle permet de prédire la déformation du profil de plage en fonction des vagues qui le frappent. Le profil initial de la plage de la figure 6.2 était de 1:5. Ce modèle a cependant l'inconvénient de ne pas tenir compte de la marée (de forte amplitude à Québec) qui tend à régulariser le profil de la plage.

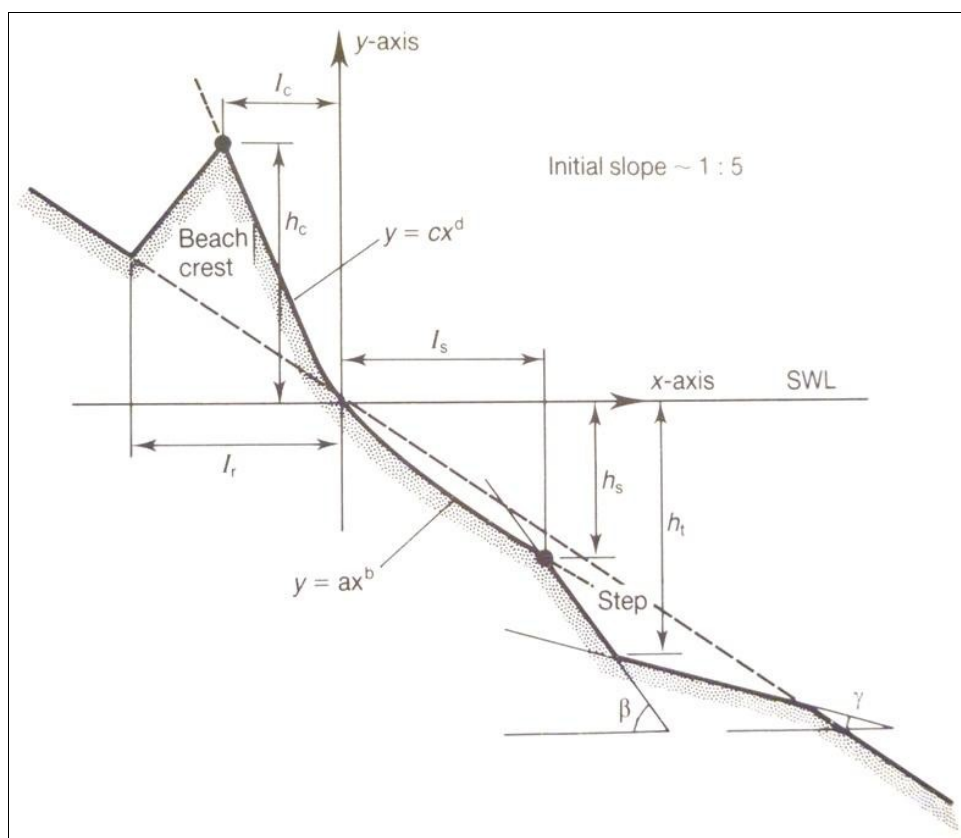


Figure 8.2 Évolution d'un profil de plage de galet (CIRIA – figure 145 page 245)

6.2 Profil d'équilibre de la plage actuelle

La première chose qui a été faite avec l'équation du CEM a été de déterminer par analogie de pente le D_{50} des sédiments constituant la plage actuelle de Beauport.

⁷Construction Industry Research and Information Association – Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering, 1991

La figure 6.3 localise les transects qui ont fait l'objet de cette évaluation.

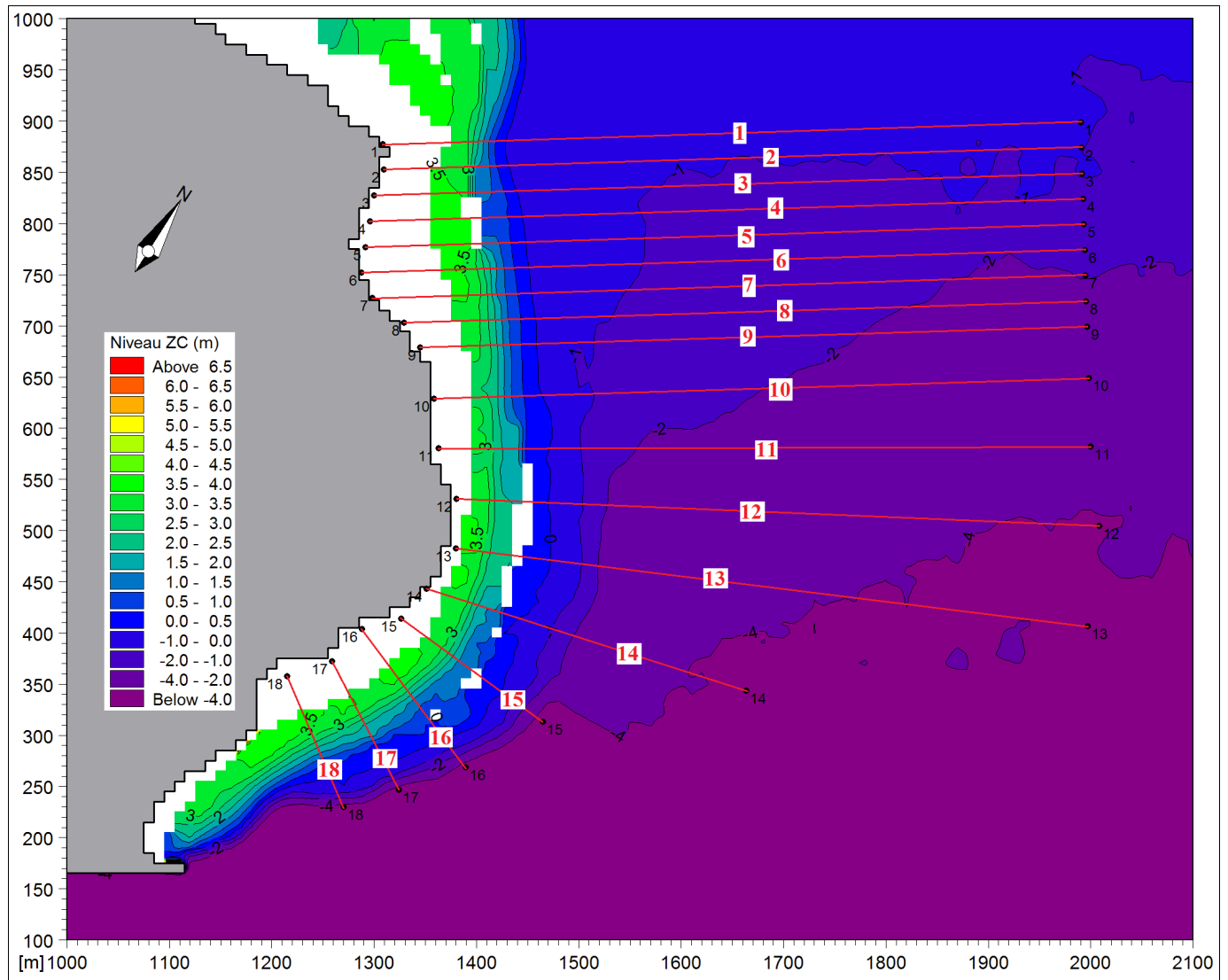


Figure 6.3 Localisation des transects évalués en termes de pente de stabilité et D_{50} équivalent

Le niveau moyen de l'eau considéré dans les calculs de pente théorique de plage a été le niveau extrême actuel (+5,0 m NMM ou +7,0 m ZC).

Les 18 transects sont tous représentés à l'annexe C pour référence.

La figure 6.4 illustre le transect T05 avec les profils tirés des données topo-bathymétrique de 2009 (courbe bleue) et 2013 (courbe rouge), la pente théorique de la plage correspondant au diamètre caractéristique retenu (courbe pointillée verte), la PMSGM (+6,1 m ZC) et les niveaux d'eau extrêmes actuels (+6,94 m ZC) et futurs (+7,31 m ZC). La détermination de l'équivalence de diamètre caractéristique s'est effectuée sur la partie supérieure de la plage. Le D_{50} équivalent obtenu par cet exercice est de 0,6 mm, soit pratiquement le D_{50} caractéristique de 0,5 mm des sédiments qui seront dragués pour construire la plage.

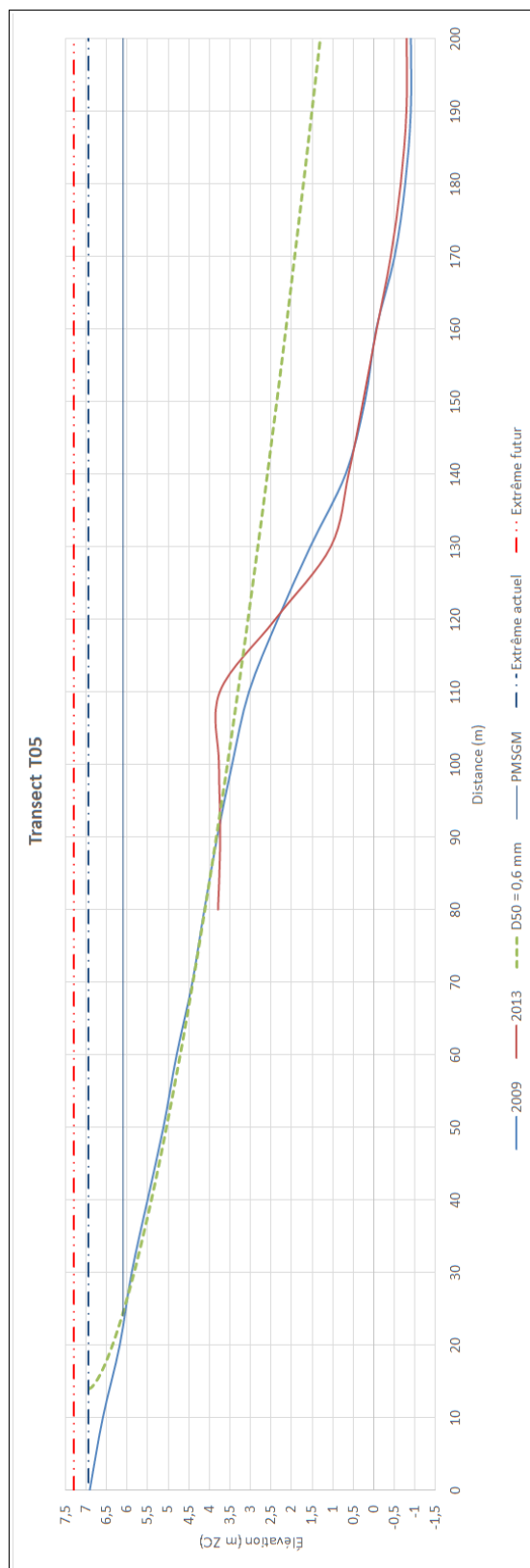


Figure 6.4 Transect T05

La figure 6.5 illustre le transect T09. La détermination de l'équivalence de diamètre caractéristique s'est encore effectuée sur la partie supérieure de la plage, mais la divergence entre le profil théorique et le profil du bas de plage est moins prononcée que pour le profil T05. Le D_{50} équivalent obtenu par cet exercice est de 5 mm, soit dix fois le D_{50} caractéristique de 0,5 mm des sédiments qui seront dragués pour construire la plage. Cette information est cohérente avec le transfert de la partie fine des sédiments qui s'est effectué du sud vers le nord sur la moitié nord de la plage de Beauport (voir figures 6.8 et 6.9).

La figure 6.6 illustre le transect T13. La détermination de l'équivalence de diamètre caractéristique s'est effectuée sur la partie supérieure de la plage. Contrairement aux profils précédents où le bas de plage se trouvait sous le profil théorique, à partir du profil T10, le bas de plage se retrouve au-dessus du profil théorique. Le D_{50} équivalent obtenu par cet exercice est de 20 mm, soit quarante fois le D_{50} caractéristique de 0,5 mm des sédiments qui seront dragués pour construire la plage, ce qui confirme si besoin était le changement de granulométrie des sédiments d'une extrémité de la plage à l'autre.

Il est impossible sur la plage actuelle de Beauport de représenter l'ensemble de la pente de la plage avec un seul diamètre caractéristique. L'influence de la marée perturbe cette relation entre les vagues, la granulométrie des sédiments et la pente de la plage. La pente d'équilibre du haut de plage ne suit pas celle du bas de plage. L'hypothèse la plus plausible est que la pente du haut de plage est sous l'influence prépondérante des vagues alors que la pente du bas de plage est plus influencée par les courants (vagues et marée). Il existe aussi une variabilité de la granulométrie des sédiments entre la partie supérieure et la partie inférieure des profils de plage ainsi que d'un profil à l'autre, ce qui influence la pente.

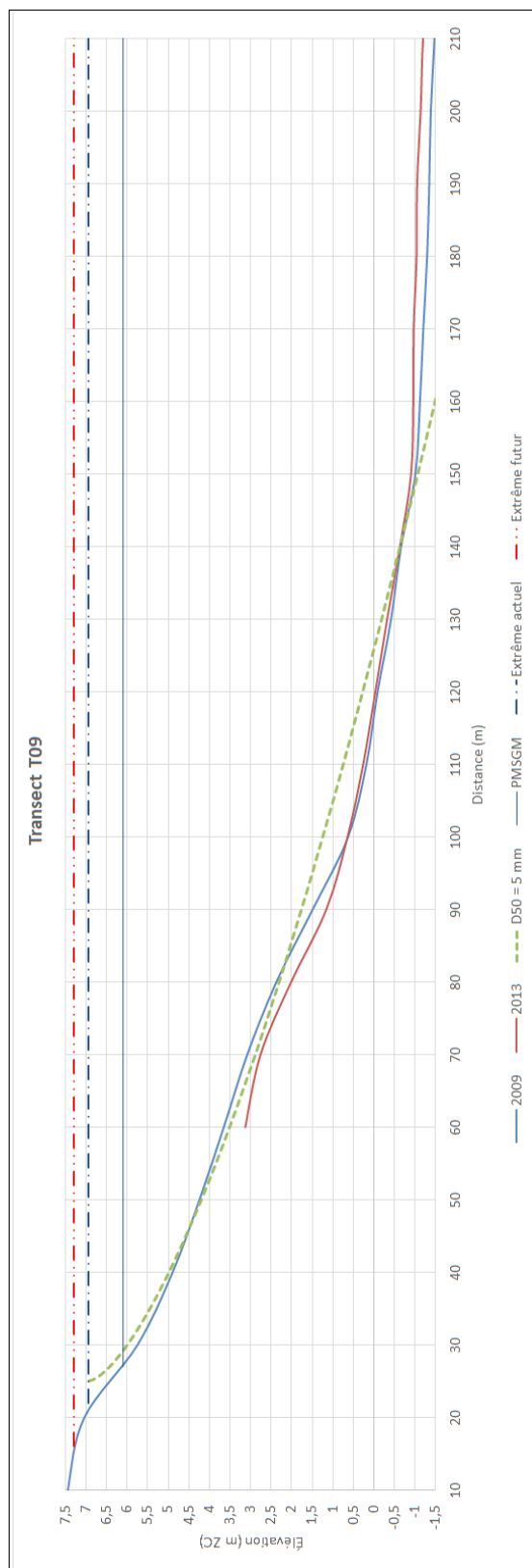


Figure 6.5 Transect T09

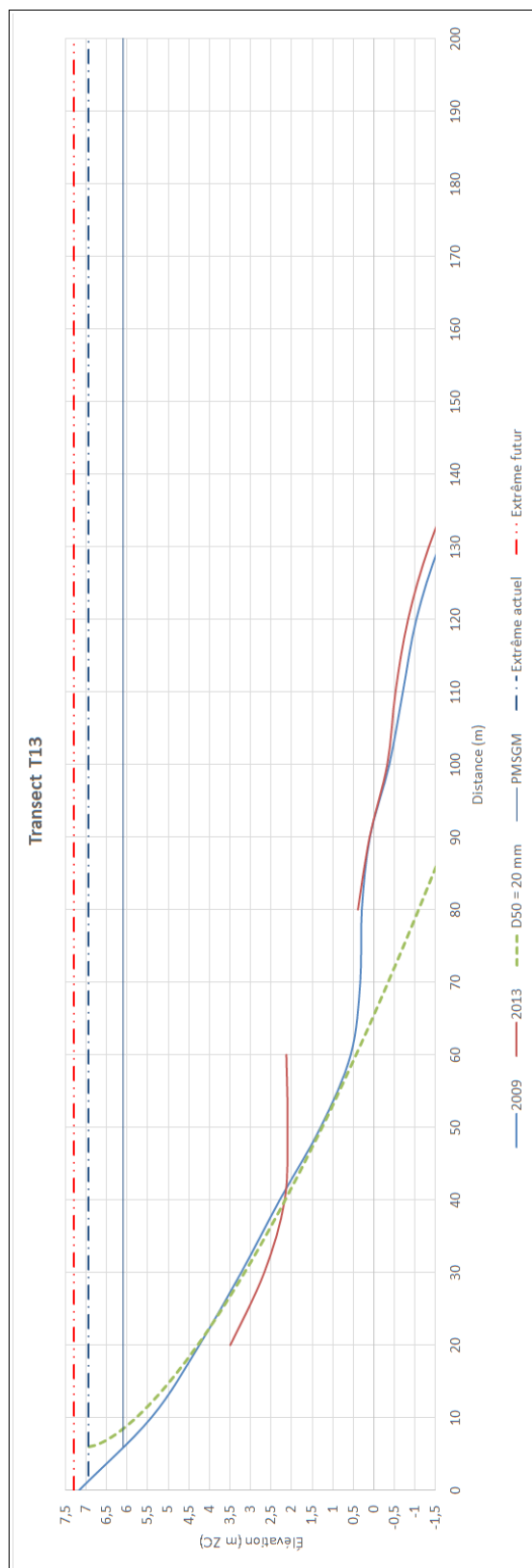


Figure 6.6 Transect T13

La figure 6.7 montre qu'il faut faire l'hypothèse d'un matériel ayant un D_{50} de l'ordre de 0,5 mm à 20 mm pour que les profils de plage sur la face Est et Sud-Est de la zone de Beauport se comparent aux profils d'une plage en équilibre selon les informations du CEM. Le diamètre D_{50} équivalent a tendance à augmenter du nord vers le sud (numéros de profil croissant).

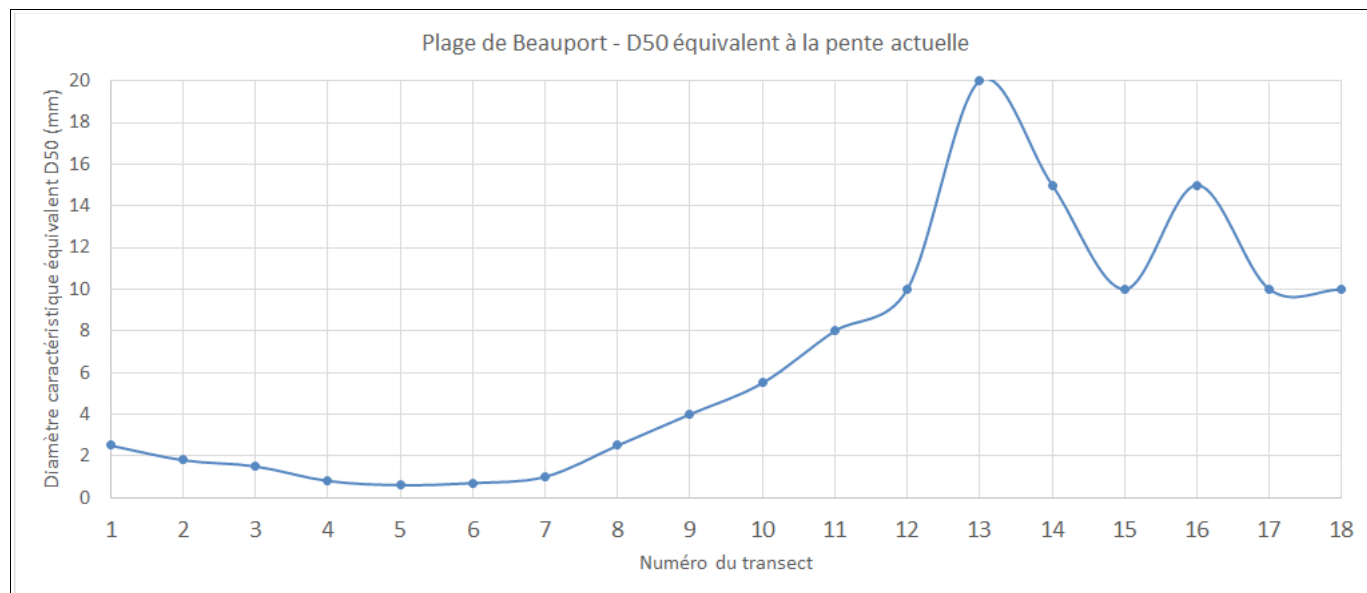


Figure 6.7 Diamètre médian D_{50} obtenu par comparaison des profils de la plage actuelle de Beauport

Cette variation de granulométrie est visible sur le site, la partie de plage située en zone récréotouristique présentant une granulométrie beaucoup plus fine que la partie de la plage située près des installations industrielles du Port. Les photos des figures 6.8 et 6.9 (prises en 2003) illustrent cette variabilité de la granulométrie des sédiments sur la plage actuelle.



Figure 6.8 Secteur nord de la plage de Beauport en 2003



Figure 6.9 Secteur sud de la plage de Beauport en 2003

Les principes qui guident le concept de la future plage principale de Beauport sont que :

- la pente d'équilibre transversale de la plage ressemblera au bout de quelques années à celle de la zone correspondant aux transects T04 à T06, soit la zone dont le diamètre caractéristique actuel des sédiments se rapproche le plus du diamètre caractéristique des sédiments qui serviront à construire la nouvelle plage,
- la géométrie d'ensemble de la plage et la présence du brise-lames au nord de la plage procureront une stabilité latérale globale des sédiments (avec mouvements alternatifs possibles au gré des tempêtes).

Ce sont ces deux aspects que la modélisation hydrodynamique du Lasalle|NHC s'attache à démontrer.

Les principes de base du concept de développement des nouvelles plages du secteur Beauport sont illustrés sur la figure 6.10 :

- Une nouvelle **plage principale** construite au large de la plage actuelle,
- Cette plage est délimitée au sud par l'enrochement protégeant l'extension portuaire et au nord par un **brise-lames**,
- Une plage destinée aux adeptes du **kitesurf** placée au nord de la nouvelle plage principale.

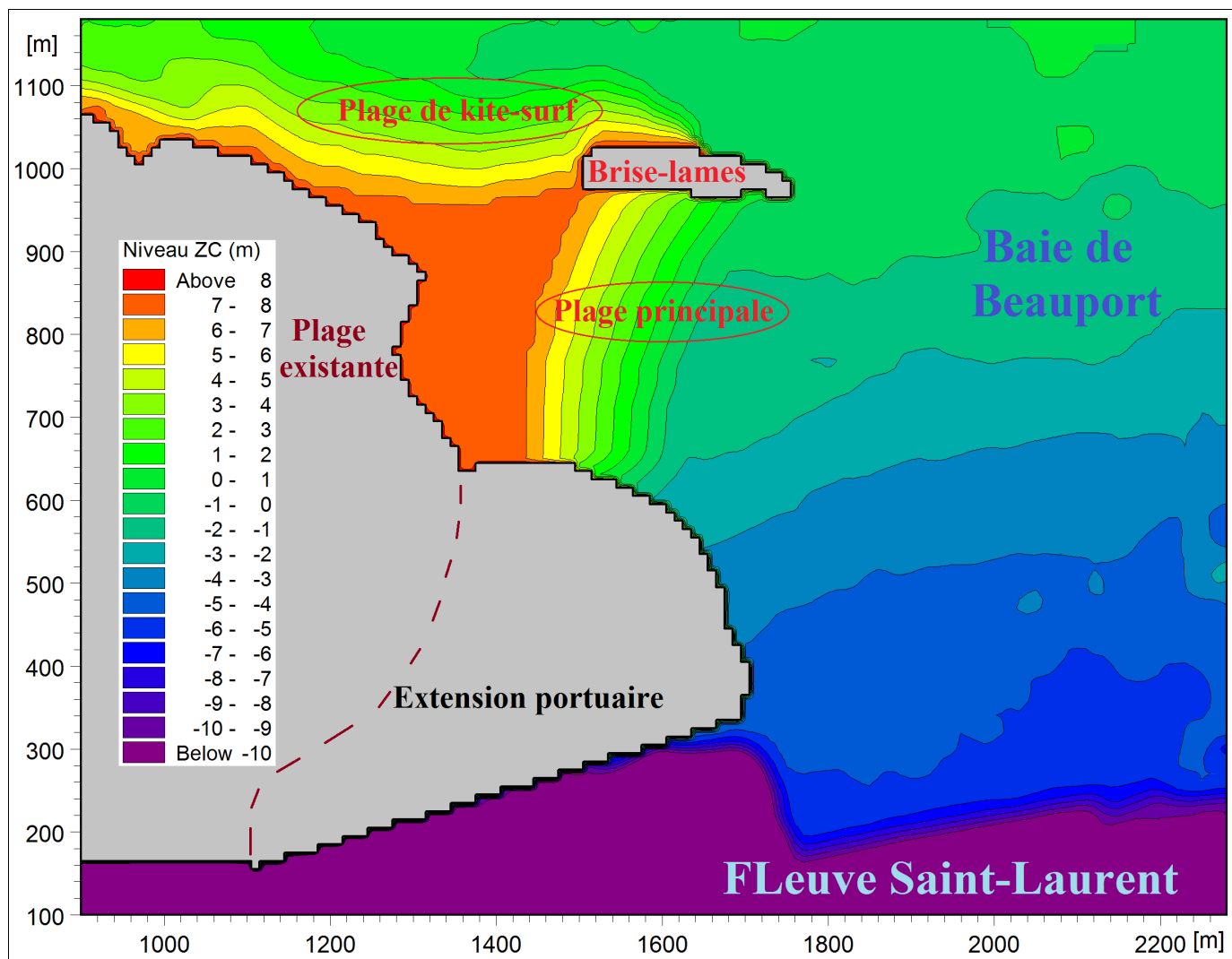


Figure 6.10 Vue en plan du principe de développement des nouvelles plages de Beauport

7 Dimensionnement transversal de la plage

7.1 Généralités

Le dimensionnement de la plage de Beauport doit se faire par étapes qui traitent chacune d'aspects spécifiques de cette plage.

La première étape de dimensionnement (chapitre 7) touche la géométrie transversale de la plage, sa pente, son élévation en crête.

La deuxième étape de dimensionnement (chapitre 8) touche la géométrie en plan de la plage, son orientation par rapport aux vagues dominantes et aux courants. Cette partie a été réalisée en collaboration étroite avec Lasalle|NHC⁸ à travers l'utilisation du modèle hydrodynamique MIKE 21⁹.

Une troisième étape (chapitre 9) a été consacrée au dimensionnement de l'enrochement qui sert à contrôler la géométrie de la plage à son extrémité nord.

7.2 Définition des événements de dimensionnement

Avant d'être en mesure de dimensionner la plage et les autres infrastructures qui s'y rattachent, il a fallu définir les caractéristiques des événements combinés de haut niveau d'eau et de vagues correspondant à des périodes de retour pertinentes. La base de données de vagues modélisées est malheureusement insuffisante pour être en mesure de faire l'analyse de cette récurrence à partir de séries temporelles synchrones (vagues / niveaux d'eau) d'une durée en rapport avec la vie utile des infrastructures évaluées (idéalement au moins une trentaine d'années). Il a fallu se rabattre sur l'hypothèse d'indépendance statistique des événements de niveaux d'eau hauts et des événements de vagues fortes. En fonction de cette hypothèse, la récurrence d'un événement combiné (vagues / niveaux d'eau) se calcule en multipliant les récurrences de chacun des événements.

La figure 7.1 illustre le résultat de l'application de cette hypothèse au cas de Beauport (niveaux d'eau enregistrés à Lauzon et hauteurs des vagues calculées au point BB1). La courbe bleue correspond à une période de retour de 50 ans et la courbe rouge à une période de retour de 100 ans.

⁸Denault, C. et Villeneuve, M. (2014). "Port de Québec- Extension du secteur portuaire - Mise au point de la variante finale des plages - Modélisation des conditions hydrosédimentologiques". Rapport LaSalle|NHC R.1873, janvier 2014, préparé pour l'Administration portuaire de Québec

⁹<http://www.mikebydhi.com/Products/CoastAndSea/MIKE21.aspx>

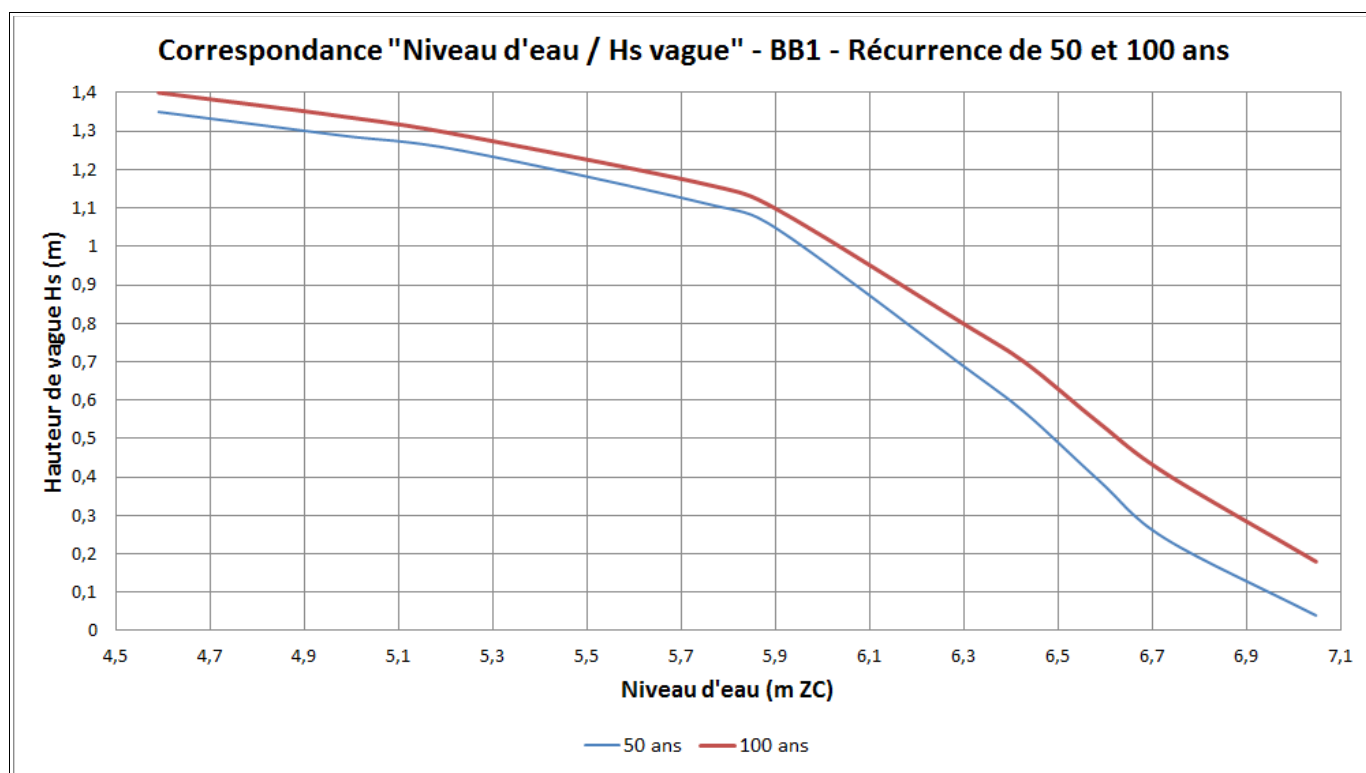


Figure 7.1 Combinaison de niveau d'eau et de hauteur de vagues correspondant à une période de retour de 50 ans ou de 100 ans pour Beauport – Point de calcul des vagues BB1

Pour respecter la relation définissant la période de retour, de très hauts niveaux d'eau sont associés à de petites hauteurs de vagues et, inversement, de grandes vagues sont associées à des niveaux d'eau bas.

7.3 Remontée des vagues sur la plage

La remontée des vagues sur la future plage principale de Beauport a été calculée à l'aide des équations paramétriques de remontée des vagues sur une plage du Coastal Engineering Manual.

Les calculs arrivent à la recommandation de placer l'élévation de la crête de plage à +7,15 m ZC pour une période de retour de 50 ans et à +7,3 m ZC pour une période de retour de 100 ans.

C'est l'**élévation de crête de plage à +7,3 m ZC** qui a été retenue compte tenu de la faible différence entre les deux résultats et du risque de submersion que poserait un événement catastrophique qui combinerait de très hauts niveaux d'eau avec des vagues. De plus, cette élévation correspond au niveau d'eau de récurrence 50 ans en considérant l'effet des changements climatiques (chapitre 5.4).

7.4 Profils d'équilibre de la nouvelle plage principale

Le chapitre 6.2 a mis en évidence les variations de pente de la plage actuelle. La variabilité de la granulométrie des sédiments en surface de la plage et celle de l'exposition / orientation de la plage par rapport aux vagues et aux courants expliquent ces variations de pente.

Le concept envisagé (figure 6.10), qui inclut un nouveau brise-lames à l'extrémité nord de la plage principale, part du principe que la nouvelle plage principale sera une plage confinée (« pocket-beach » en anglais). Les conditions (d'exposition aux vagues, de granulométrie) sont en ce cas relativement uniformes le long de l'ensemble de la plage principale. Avec cette hypothèse de base, la pente moyenne observée sur les transects T04, T05 et T06 (voir figure 6.3) a été considérée comme étant la pente probable d'équilibre de la future plage.

Une autre hypothèse de base a été de présumer que la pente de construction de la future plage (ce qui va être exigé de l'entrepreneur) serait de 10%. Il est possible de considérer des pentes de constructions plus fortes à condition de s'assurer de placer la même quantité de sédiments par mètre linéaire de plage que celle du concept à 10% de pente. Les seuls inconvénients de cette option d'une pente supérieure à 10% sont que la pente d'équilibre de la plage sera atteinte un peu plus tard qu'avec une pente initiale de 10% et que des efforts supplémentaires seront requis de la part du gestionnaire de cette infrastructure pour régulariser la pente de la zone récréotouristique au début des premières saisons estivales. Par contre, il est déconseillé de viser construire la plage avec une pente significativement inférieure à 10% car cette plage non-consolidée serait fragile face à une tempête importante qui se produirait peu de temps après sa mise en place.

Avec cette pente de construction de 10%, un déplacement des sédiments du haut vers le bas de plage sera observé, surtout lors des premières tempêtes importantes. Cet effet est attendu et normal. Ces mouvements de sédiments contribueront à stabiliser la plage selon un profil « naturel ». Certaines interventions pourraient être requises du point de vue esthétique et fonctionnel pour régulariser le profil de plage au début de la saison touristique. Il est recommandé pour la durabilité de la plage que ces interventions soient limitées au strict minimum et réalisées avec de la machinerie légère.

Le travail de conception de la future plage a entre autres consisté à s'assurer que le profil de construction et le profil d'équilibre anticipé aboutissaient à un équilibre des quantités de sédiments qui seront déplacés du haut de plage vers le bas de plage. Six transects perpendiculaires à la future plage ont été implantés (figure 7.2) et les différentes pentes de plage ont été reproduites (figures 7.3 à 7.8) :

- profil de plage en place (terrain naturel),
- profil d'équilibre anticipé (plage à l'équilibre, moyenne des pentes des transects T04, T05 et T06),
- profil de la plage à construire (pente de 10%),
- profil de plage actuelle au droit du transect considéré, décalé pour correspondre au projet de plage.

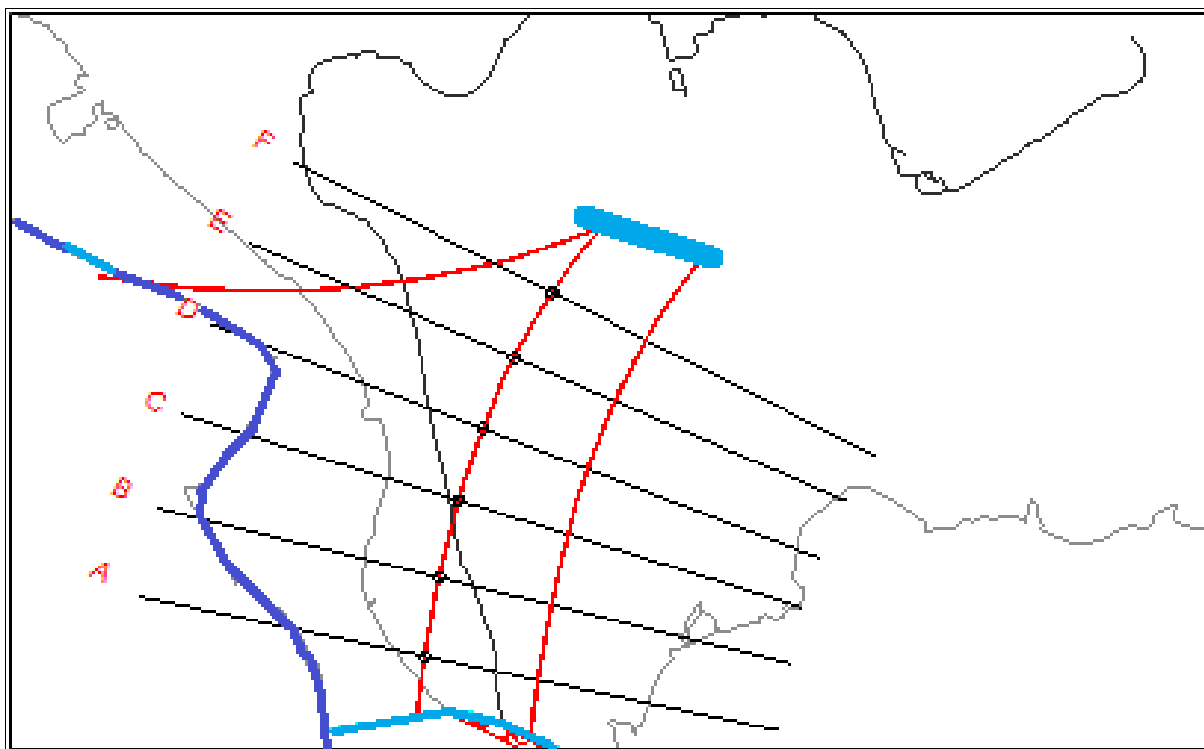


Figure 7.2 Localisation des transects perpendiculaires à la future plage

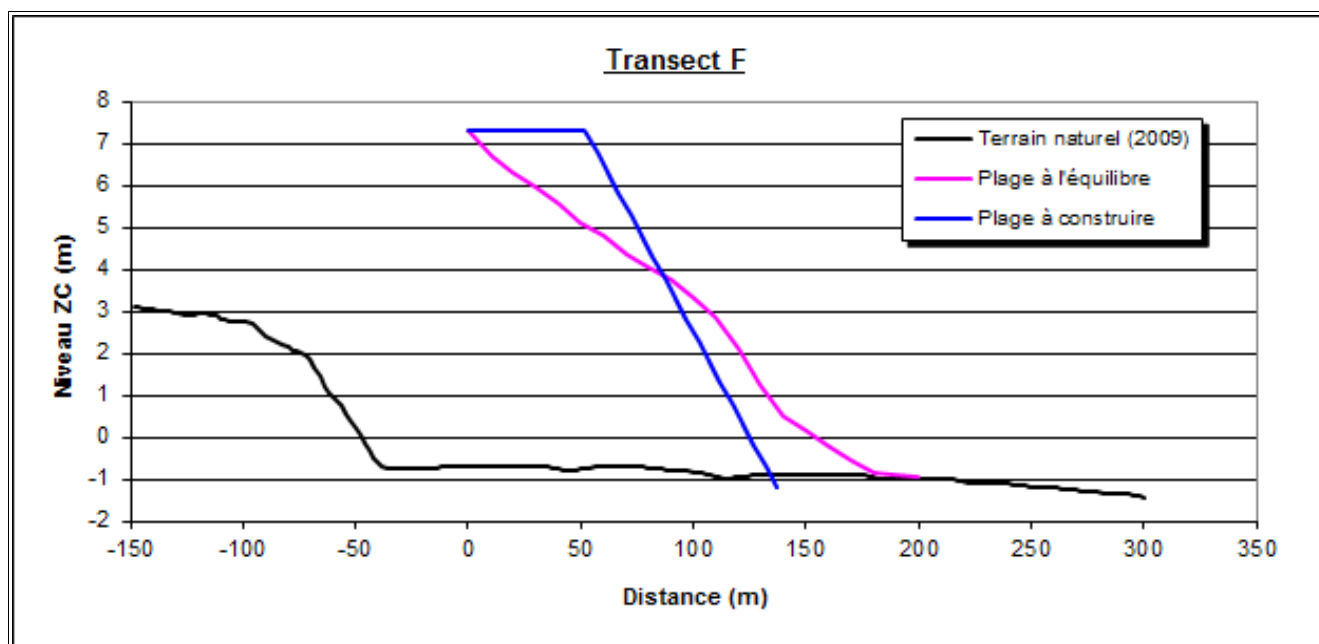


Figure 7.3 Profils de plage au droit du transect « F »

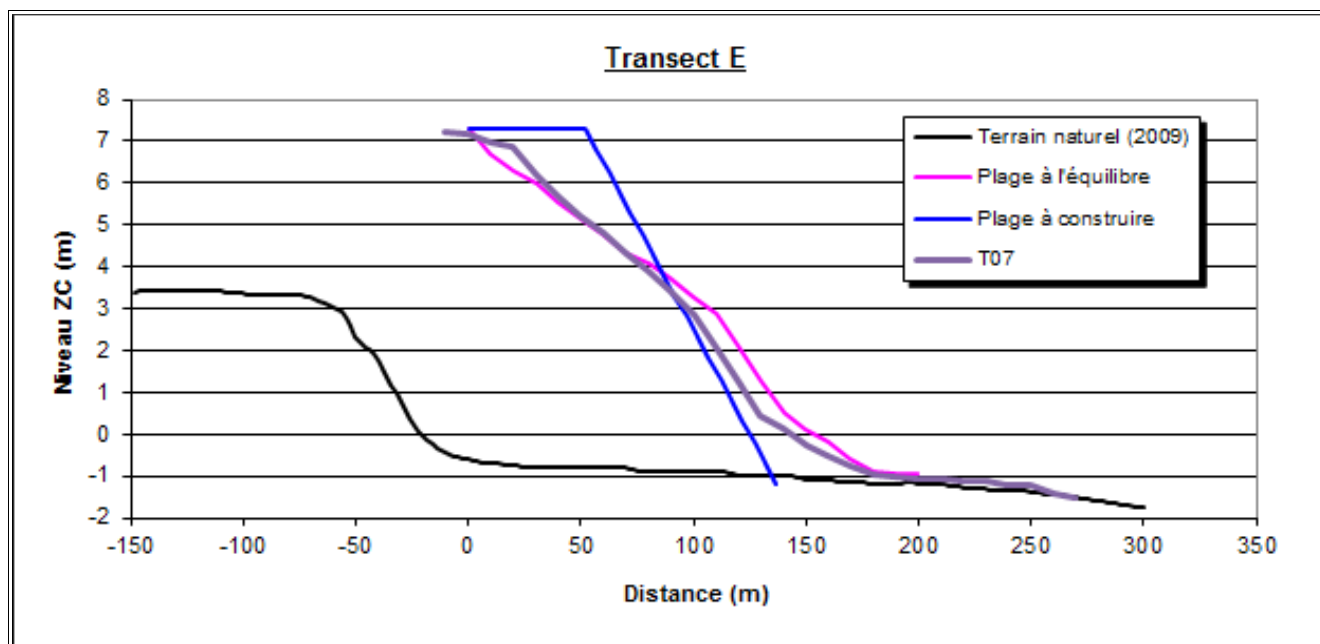


Figure 7.4 Profils de plage au droit du transect « E »

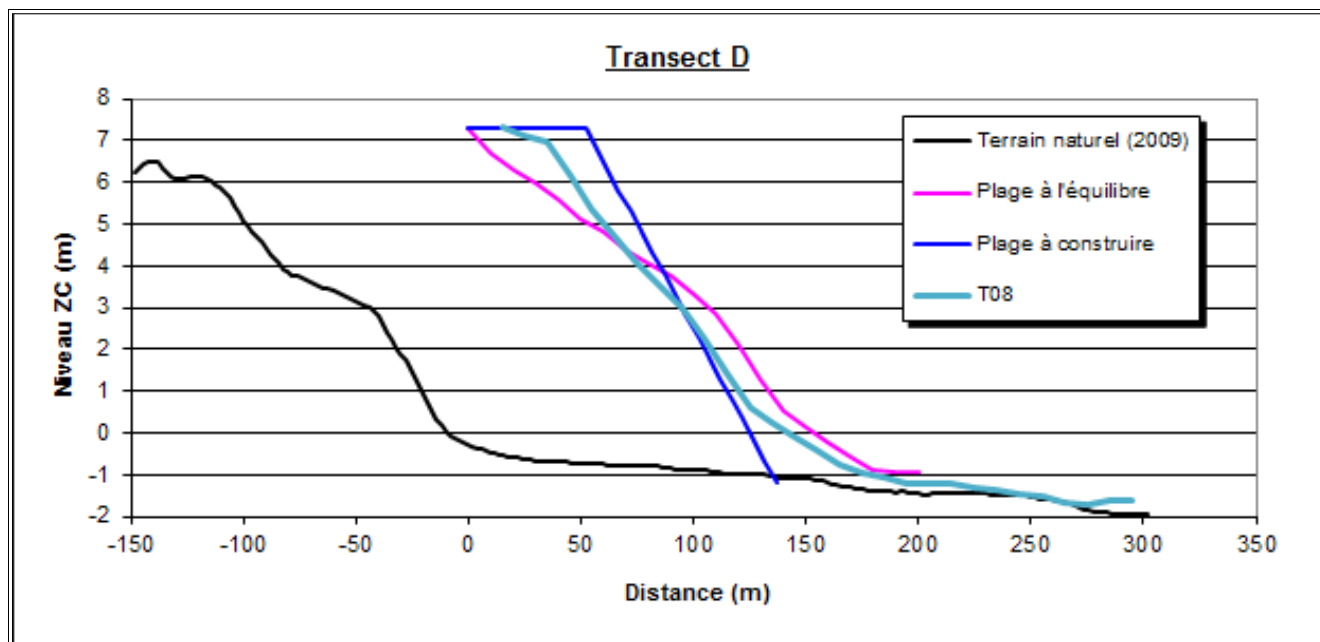


Figure 7.5 Profils de plage au droit du transect « D »

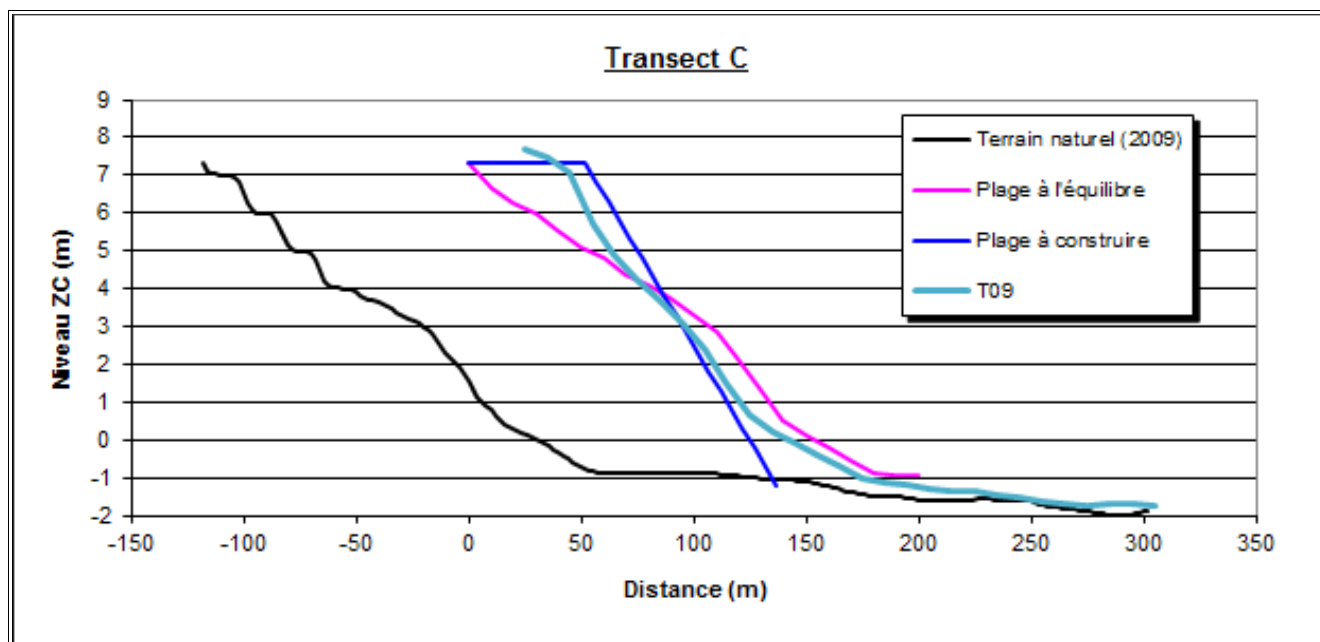


Figure 7.6 Profils de plage au droit du transect « C »

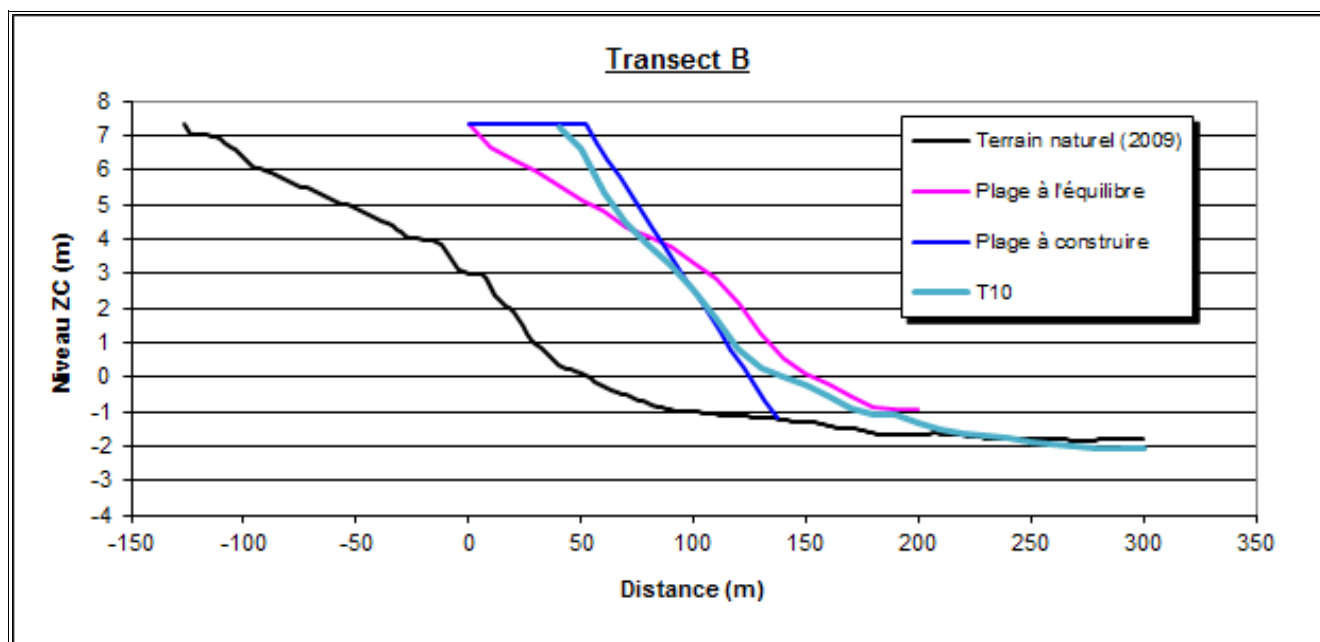


Figure 7.7 Profils de plage au droit du transect « B »

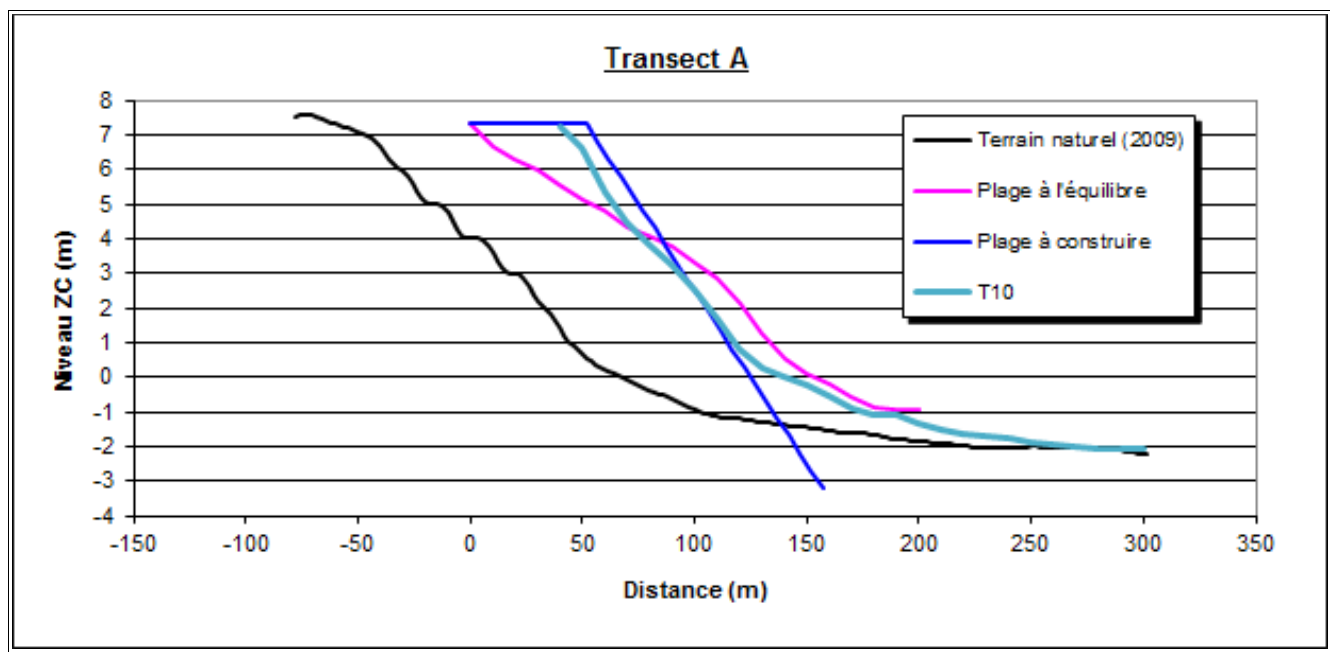


Figure 7.8 Profils de plage au droit du transect « A »

Cet exercice a permis d'une part de s'assurer de la faisabilité du concept en termes de pentes de la plage et d'autre part de positionner en première approximation la crête de la plage à construire, celle qui a servi aux premières modélisations faites par Lasalle|NHC.

8 Dimensionnement en plan de la plage

8.1 Généralités

Lasalle|NHC s'est chargé de faire les modélisations visant à s'assurer de la stabilité globale et de la durabilité du concept de plage proposé dans l'environnement de Beauport (figure 6.10). Le modèle numérique hydrodynamique MIKE 21 a été utilisé pour étudier la remise en mouvement par les vagues et les courants des sédiments mis en place pour créer la plage. Le résultat recherché était de démontrer que la géométrie retenue présentait une stabilité dans le temps et l'absence de mouvements de masse des sédiments qui déstabiliseraient cette plage à long terme.

NOTE IMPORTANTE : la dynamique d'une plage n'est pas uniquement dictée par le déplacement des sédiments qui la constituent, mais également par une dégradation physique des matériaux sous la forme d'une diminution progressive de la taille de ces matériaux (graviers devenant des sables ou sables grossiers devenant des sables fins, par exemple). Cette diminution de taille s'accompagne d'une susceptibilité plus grande des matériaux aux mouvements avec le temps, donc d'une instabilité plus grande de la plage. Il s'agit d'un phénomène se produisant sur des périodes pouvant dépasser plusieurs décennies si la structure des grains est de bonne qualité (quartz pur par exemple) mais qui peut être beaucoup plus rapide si la structure des grains est de mauvaise qualité (matrice schisteuse par exemple). Dans la nature, les plages se maintiennent à long terme par un apport constant de nouveaux matériaux. Ce ne sera pas le cas pour les plages de Beauport. À long terme, des recharges seront requises sur ces plages pour leur permettre de durer. L'expérience de la plage actuelle montre que ces interventions de rechargement ne devraient pas être requises avant plusieurs décennies.

8.2 Options V1, V2 et V3

À partir de la position préliminaire de la crête de la plage obtenue par le processus décrit au chapitre 7, trois premières options ont été étudiées.

La figure 8.1 illustre la position du brise-lames et du haut des plages dans les options V1, V2 et V3. Sur cette figure apparaissent également les configurations proposées en 2007, en 2009 et la configuration proposée par Hatch-Mott-McDonald (HMM) en 2012.

La position du brise-lames est restée la même dans les trois nouvelles options, mais la position de la plage de ces options a varié (translation et rotation) en fonction des résultats de modélisation qui indiquaient une orientation non optimale de la plage par rapport aux vagues principales (ENE).

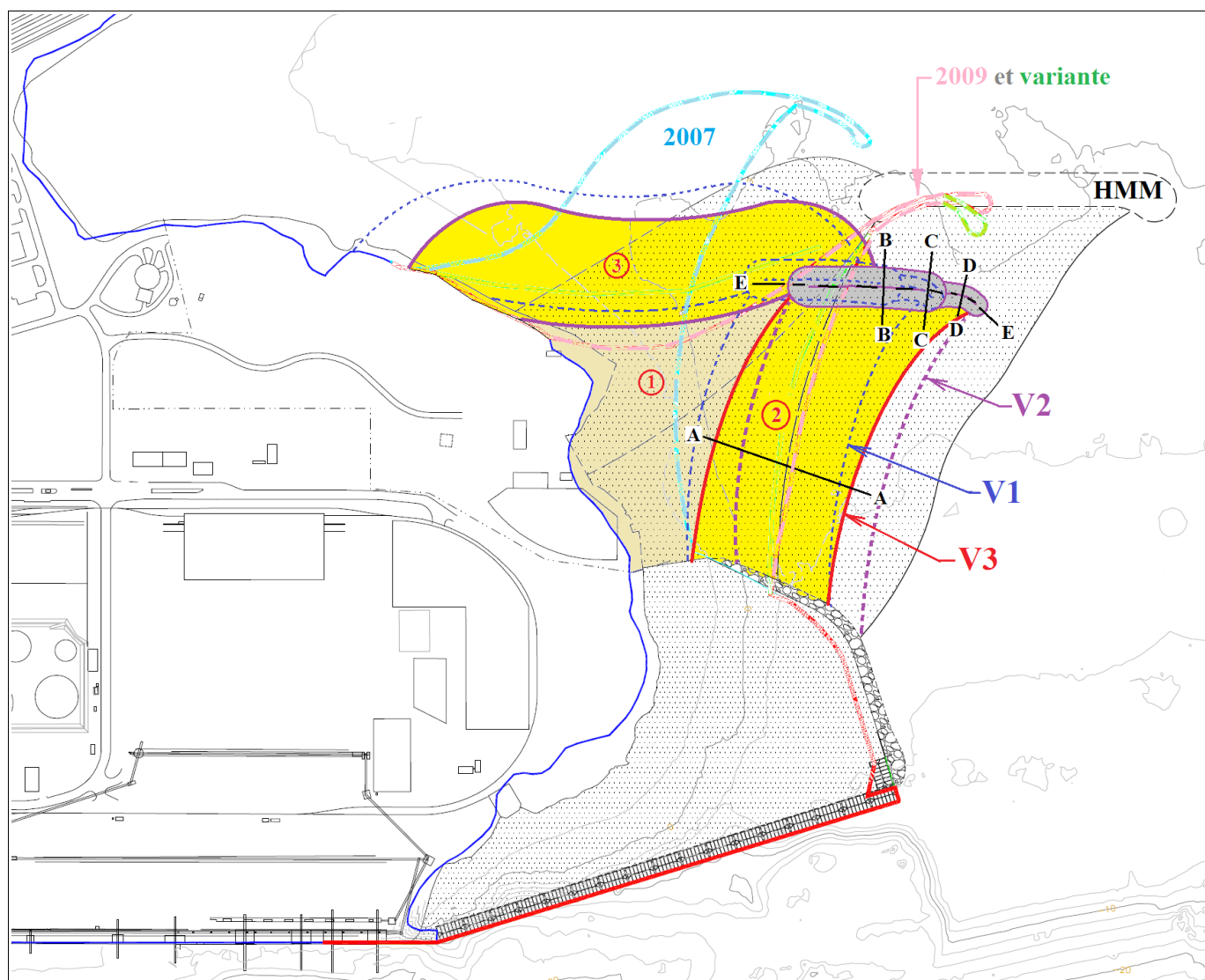


Figure 8.1 Vue en plan des options V1, V2 et V3

8.3 Options V4 et V5

La figure 8.2 illustre la position des options V4 et V5 par rapport à l'option V3.

Dans ces options, par rapport aux options précédentes, le brise-lames a été traduit vers le nord-est et la plage a subi une très légère rotation dans le sens horaire. La plage de kitesurf a également été déplacée vers le nord.

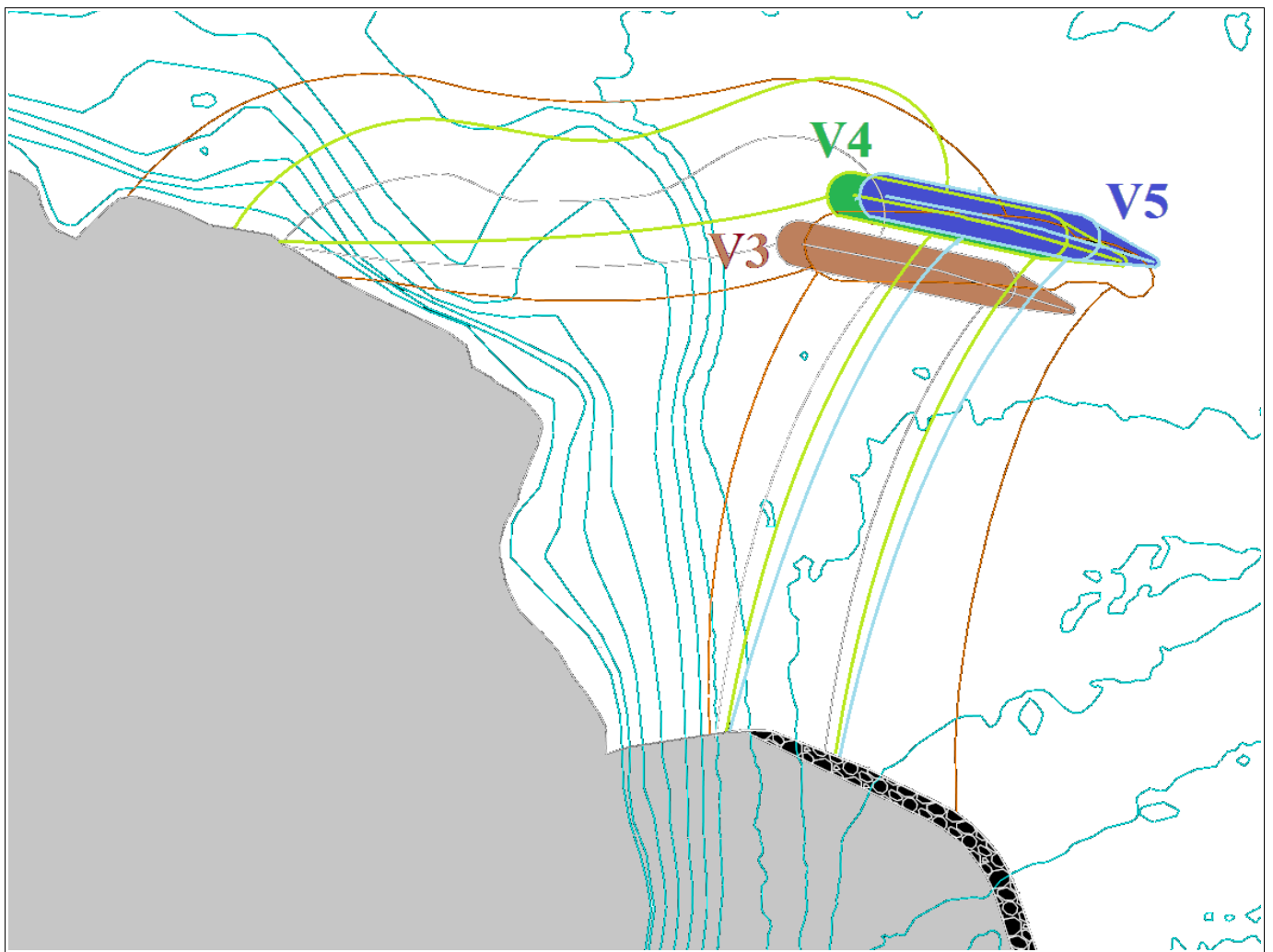


Figure 8.2 Vue en plan des options V4 et V5

8.4 Options V6

Les options V6 présentent des variations minimales par rapport aux options V4 et V5. Un problème d'écoulement accéléré avait été détecté par le modèle hydrodynamique au sud de l'épi, en rapport avec sa géométrie en prolongement direct du brise-lames. La forme courbe de l'épi des options 6 permet de minimiser cet effet qui pourrait nuire à la stabilité de la partie nord de la plage principale.

Les sous-options « V6a » et « V6b » développées à partir de cette option V6 principale touchent la géométrie de la plage de kitesurf, située sur la face nord des aménagements récréotouristiques.

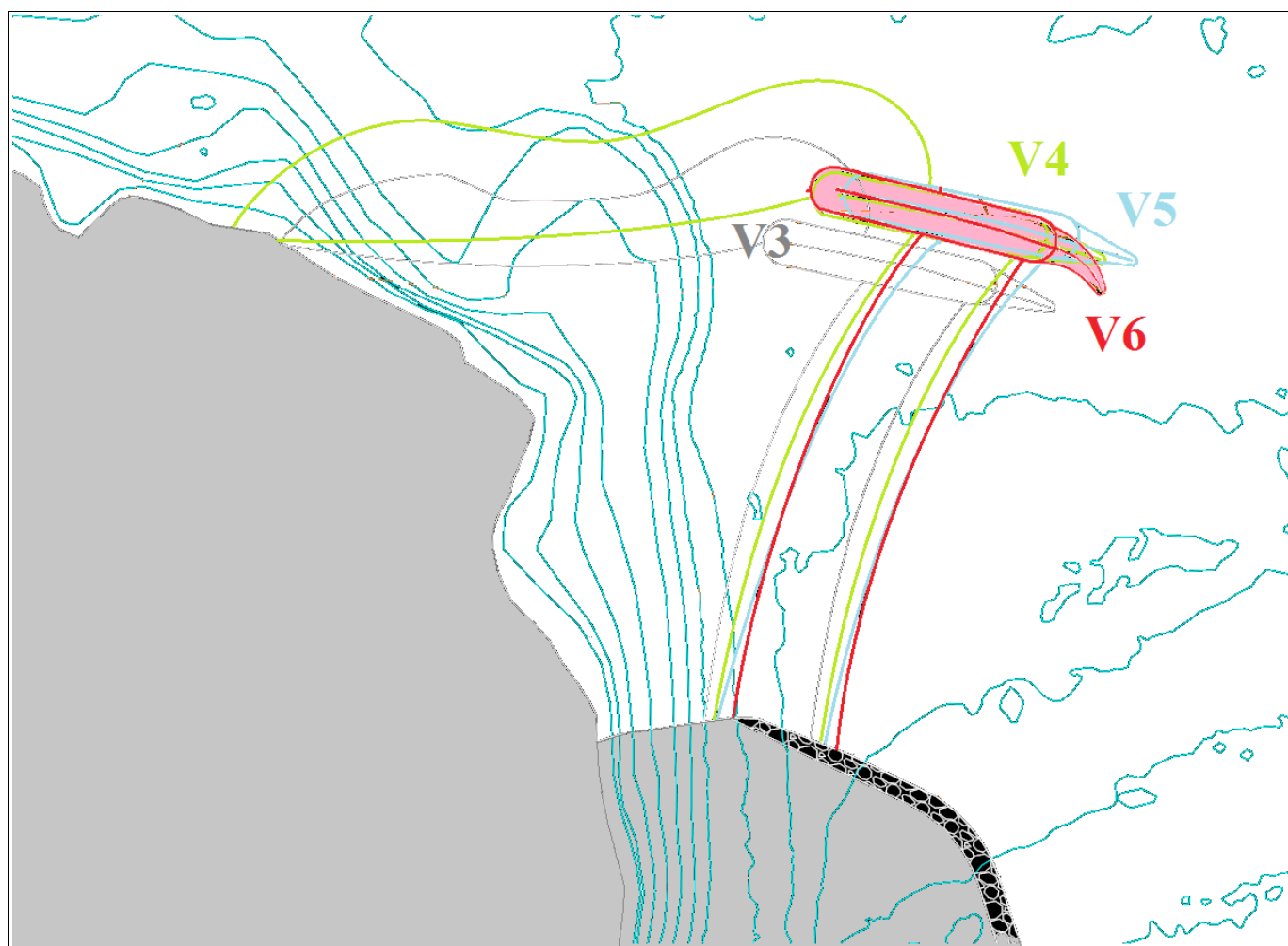


Figure 8.3 Vue en plan de l'option V6

8.5 Options de plage principale 2014-V1 à V5

Les options « 2014-Vx » présentent les options définies à la suite de la modification de quantités de sédiments disponibles pour la recharge (600 000 m³ versus 400 000 m³).

La figure 8.4 illustre différentes variantes de la plage principale, soit :

- la version initiale de l'APQ (bleu foncé),
- la variante de l'offre de services de juin 2014 (V1 en rouge) qui corrigeait le problème d'érosion prévisible de la partie sud-ouest de la zone récréotouristique,
- les variantes V3 et V3.1 (bleu clair) qui font légèrement pivoter la plage principale dans le sens horaire par rapport à V1,
- la variante V5 (vert) qui constituerait l'optimum d'orientation et de courbure de la plage principale.

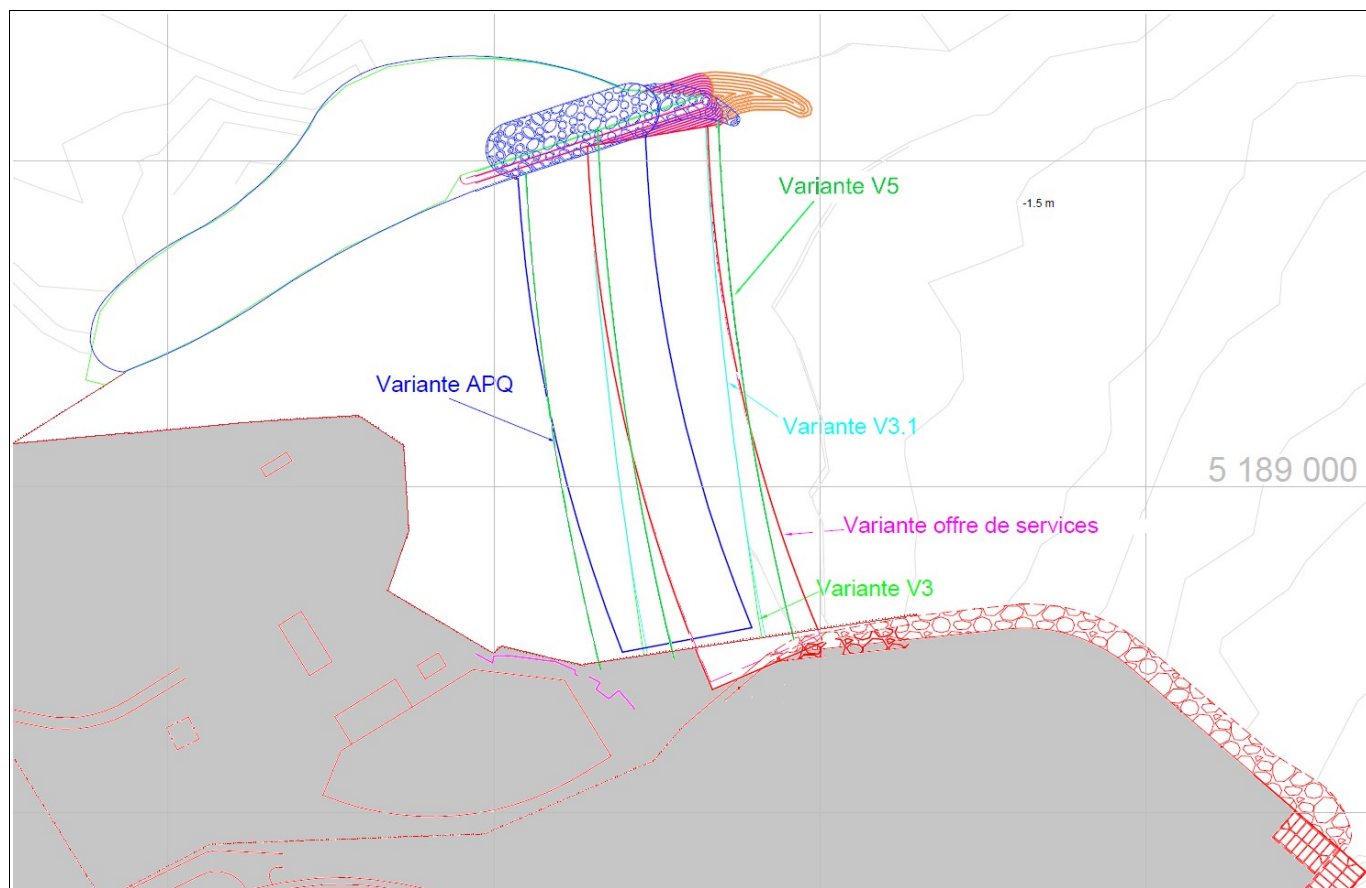


Figure 8.4 Vue en plan des options 2014-V1, V3 et V5

8.6 Options de plage de kitesurf 2014-V6 et V7

Sur la base de l'option 2014-V5, deux variantes de la plage de kitesurf ont été développées suite aux résultats de la modélisation de l'érosion de cette plage par Lasalle|NHC. La modélisation de l'érosion indiquait que les vagues de l'est-nord-est atteignaient trop directement cette plage et provoquaient une migration trop rapide des sédiments pour en assurer la pérennité.

Les variantes 2014-V6 et 2014-V7 proposent deux solutions différentes à cette problématique d'érosion de la plage de kitesurf.

- L'option 2014-V6 modifie radicalement la géométrie du brise-lames en le courbant pour protéger la plage de kitesurf contre l'attaque directe des vagues du secteur est,
- L'option 2014-V7 conserve la géométrie du brise-lames mais ajoute un second brise-lames et épi à l'extrémité du brise-lames principal pour protéger la plage de kitesurf contre les vagues du secteur est.

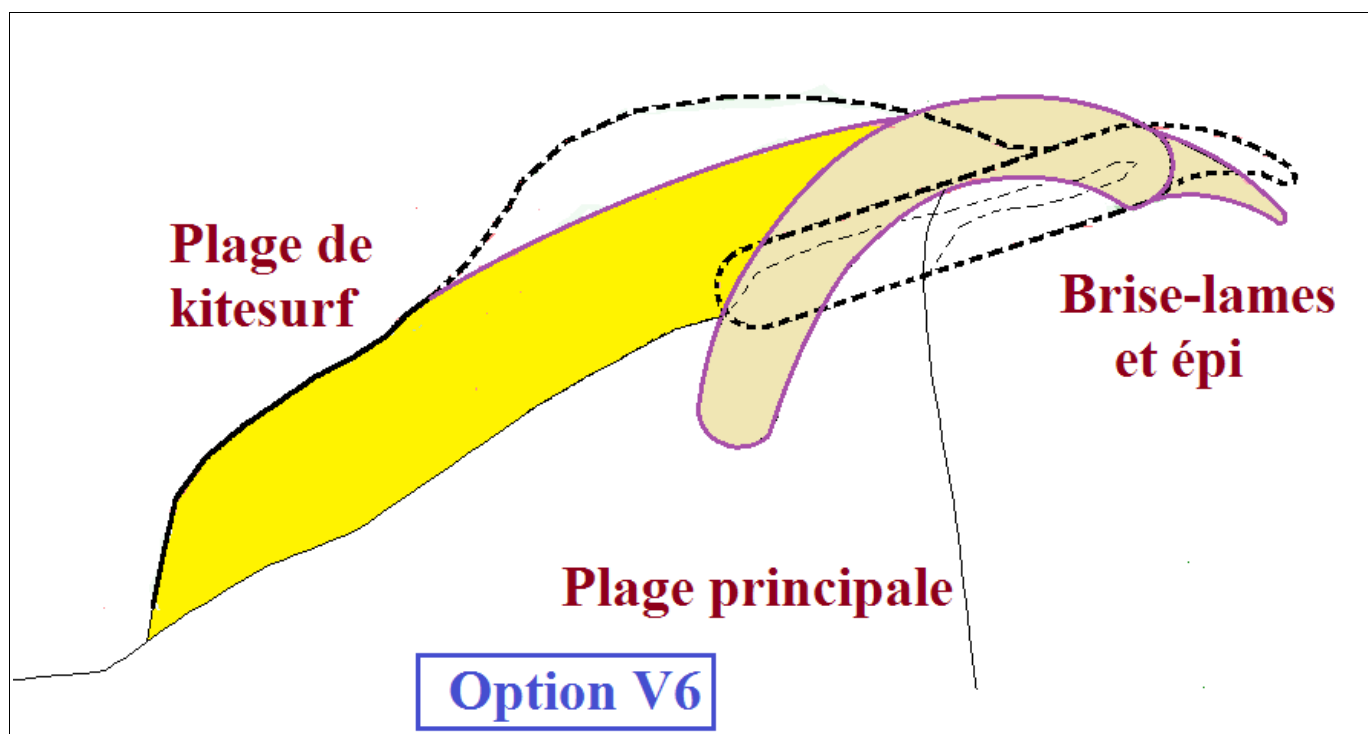


Figure 8.5 Variante 2014-V6 de la plage de kitesurf

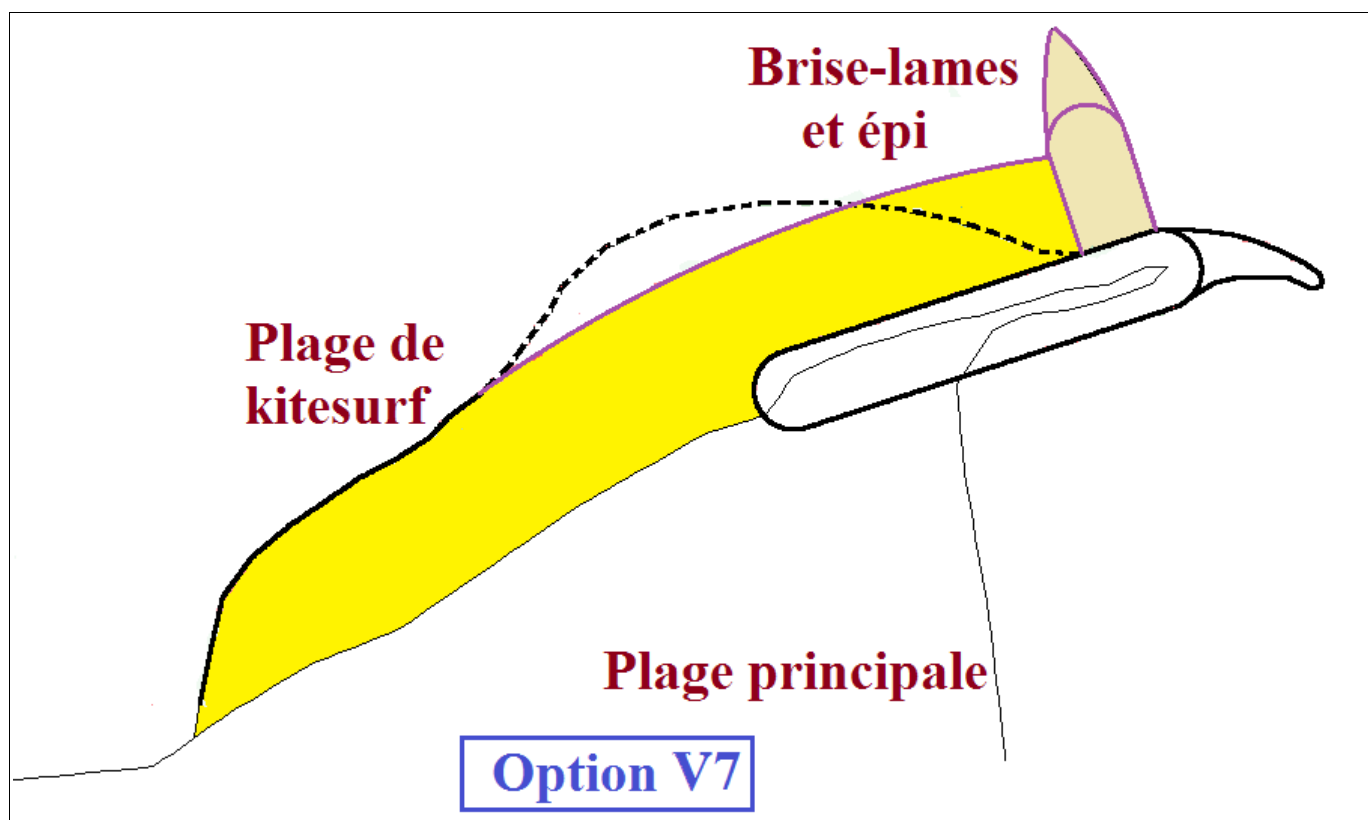


Figure 8.6 Variante 2014-V7 de la plage de kitesurf

L'option 2014-V6 présente l'avantage de ne pas créer d'obstacle aux usagers kitesurf mais ne sera que partiellement plus efficace que l'option 2014-V5 à empêcher l'érosion de la plage de kitesurf par les vagues du secteur est. Une recharge régulière (tous les 10 à 15 ans) de la plage de kitesurf sera requise pour lui conserver une géométrie adéquate pour les adeptes de kitesurf.

L'option 2014-V7 présente l'avantage de protéger plus efficacement que l'option 2014-V6 la plage de kitesurf contre l'érosion par les vagues du secteur est. Les recharges de cette plage pourront être plus espacées (20 à 25 ans). Par contre, le nouvel épi pourrait constituer un obstacle pour les usagers du kitesurf, en plus de probablement être accusé de perturber les vents. De plus, les risques de sédimentation fine (silt et argile) sont augmentés sur cette version de la plage de kitesurf par rapport à celle de l'option 2014-V6.

8.7 Résultats de la première série de modélisations de Lasalle|NHC

Les différents résultats détaillés de la première série de modélisations effectuées par Lasalle|NHC sont présentés dans le rapport Lasalle|NHC 2014¹⁰. La figure 8.7 illustre, pour la variante V6b, les résultats (1^e série de modélisations) des mouvements des sédiments sous forme d'un bilan érosion / déposition après une série de tempêtes de l'ENE avec une vitesse de vent de 23 m/s (80 km/h) soufflant en continu pendant 5 jours (avec variation du niveau d'eau en fonction de la marée), ce qui représente l'équivalent d'environ cinq années de tempêtes de cette direction principale. Une deuxième série de tempêtes (série continue de 49 jours avec variation de la direction du vent et plus grande amplitude des grandes marées) a été faite pour vérifier sur une plus longue période la représentativité de la série de 5 jours de tempêtes. Cette série plus longue représente l'équivalent d'environ une quinzaine d'années de tempêtes du secteur est.

Le résultat le plus frappant de la modélisation concerne la plage principale exposée aux plus fortes vagues. Il s'agit du transfert des sédiments du haut de plage (zone rouge / érosion)) vers le bas de plage (zone verte / dépôt). L'effet de transfert était attendu et le modèle démontre que ce transfert se fait de façon relativement uniforme tout le long de la plage principale, ce qui était le but visé.

On remarque également des mouvements de sédiments plus restreints au sud de la plage principale (érosion à l'est de la zone d'extension portuaire) et au nord (érosion / sédimentation de la plage de kitesurf), mais aucune « fuite » importante de sédiments n'est mise en lumière par le modèle à partir de la plage principale.

Les mouvements de sédiments observés sur la plage de kitesurf sur cette première série de modélisations sont minimes.

¹⁰Denault, C. et Villeneuve, M. (2014). "Port de Québec- Extension du secteur portuaire - Mise au point de la variante finale des plages - Modélisation des conditions hydrosédimentologiques". Rapport LaSalle|NHC R.1873, novembre 2014, préparé pour l'Administration portuaire de Québec

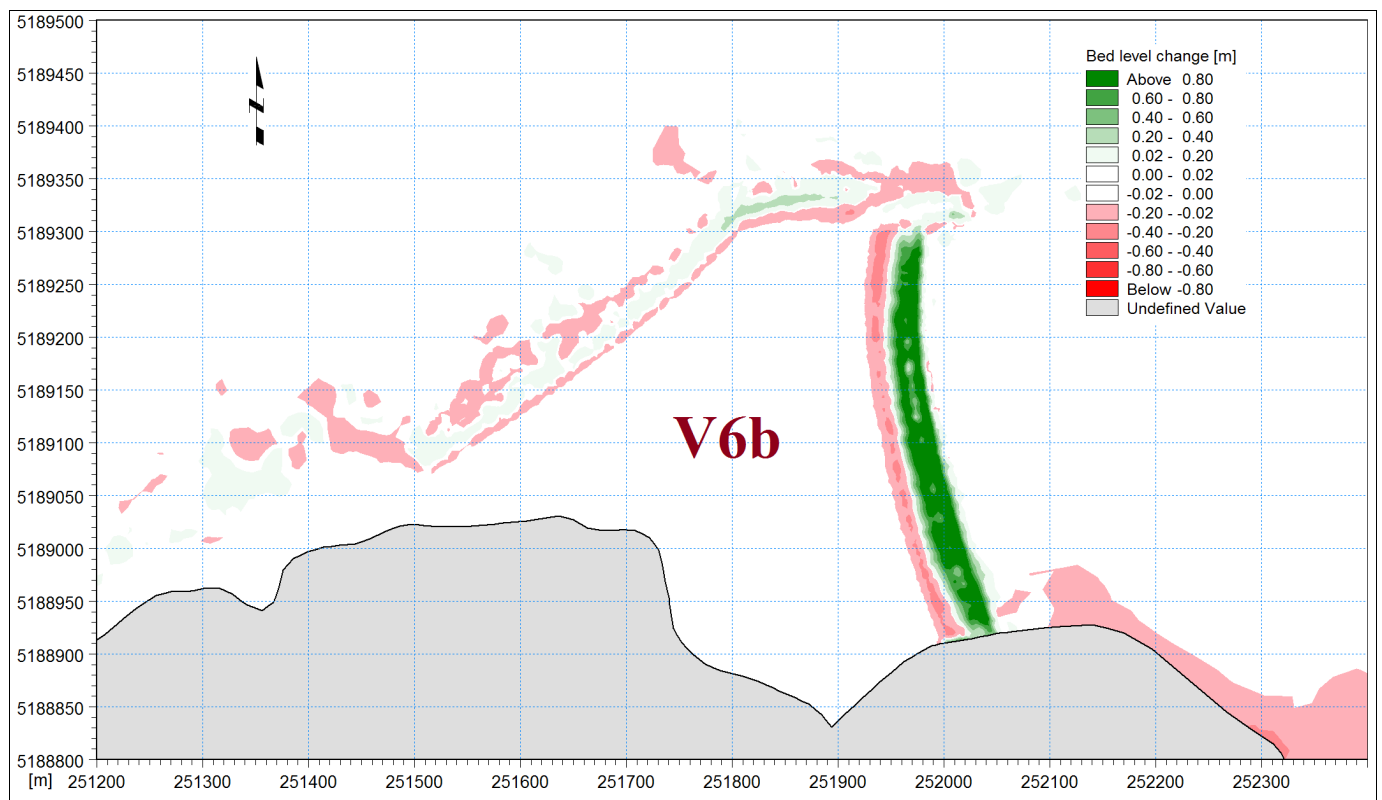


Figure 8.7 Bilan sédimentaire de la variante V6b pour les tempêtes du secteur ENE

D'autres vérifications de la mobilité des sédiments ont également été faites avec des vagues provenant des secteurs Est, Nord-Est et Ouest-Sud-Ouest.

- Les tempêtes de l'Est ont un effet très similaire à celui des tempêtes de l'Est-Nord-Est sur la plage principale, mais pratiquement pas d'effet sur la plage de kitesurf,
- Les tempêtes du Nord-Est ont un effet très similaire à celui des tempêtes de l'Est-Nord-Est sur la plage principale et sur la plage de kitesurf,
- Les tempêtes de l'Ouest-Sud-Ouest n'ont pratiquement aucun effet sur la plage principale. Leur effet sur la plage de kitesurf est de transférer des sédiments de l'ouest vers l'est (figure 8.8).

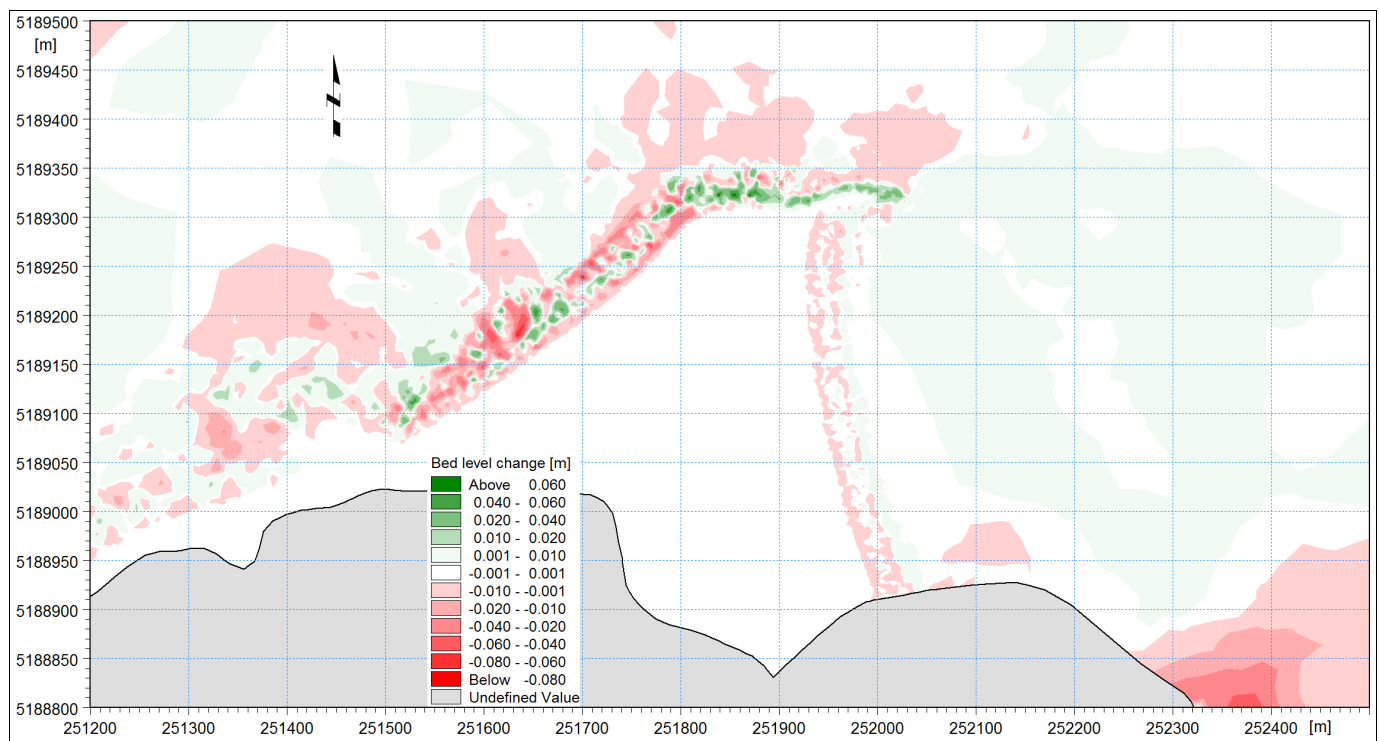


Figure 8.8 Bilan sédimentaire de la variante V6b pour les tempêtes du secteur OSO

8.8 Résultats de la deuxième série de modélisations de Lasalle|NHC

Les différents résultats détaillés de la deuxième série de modélisations effectuées par Lasalle|NHC sont présentés dans le rapport Lasalle|NHC 2014¹¹. La figure 8.9 illustre, pour la variante 2014-V5, les résultats (2^e série de modélisations) des mouvements des sédiments sous forme d'un bilan érosion / déposition après une série de tempêtes du secteur Est soufflant en continu pendant 49 jours (avec variation du niveau d'eau en fonction de la marée), ce qui représente l'équivalent d'environ une quinzaine d'années de tempêtes de cette direction principale.

Le bilan très bien équilibré sur la série de tempêtes à long terme (49 jours) a été obtenu suite aux différentes modifications géométriques qui ont fait passer la géométrie de la plage principale de celle de l'option de l'offre de services (2014-V1) à celle de la variante 2014-V5.

On remarque sur la figure 8.9 l'intensité de l'érosion qui se produit sur la plage de kitesurf en présence des tempêtes du secteur est.

On remarque également un effet potentiel d'érosion de la batture à l'est des enrochements de l'extension portuaire. Cette « érosion » est probablement due à l'hypothèse de granulométrie fine ($D_{50} = 0,2 \text{ mm}$) des sédiments qui a été retenue dans cette modélisation. Il est probable que la granulométrie réelle des

¹¹Denault, C. et Villeneuve, M. (2014). "Port de Québec- Extension du secteur portuaire - Mise au point de la variante finale des plages - Modélisation des conditions hydrosédimentologiques". Rapport LaSalle|NHC R.1873, novembre 2014, préparé pour l'Administration portuaire de Québec

sédiments dans ce secteur à l'est des enrochements de l'extension portuaire soit plus grossière que dans l'hypothèse de modélisation et, dans ce cas, l'érosion sera plus modeste que ce que montre la figure 8.9.

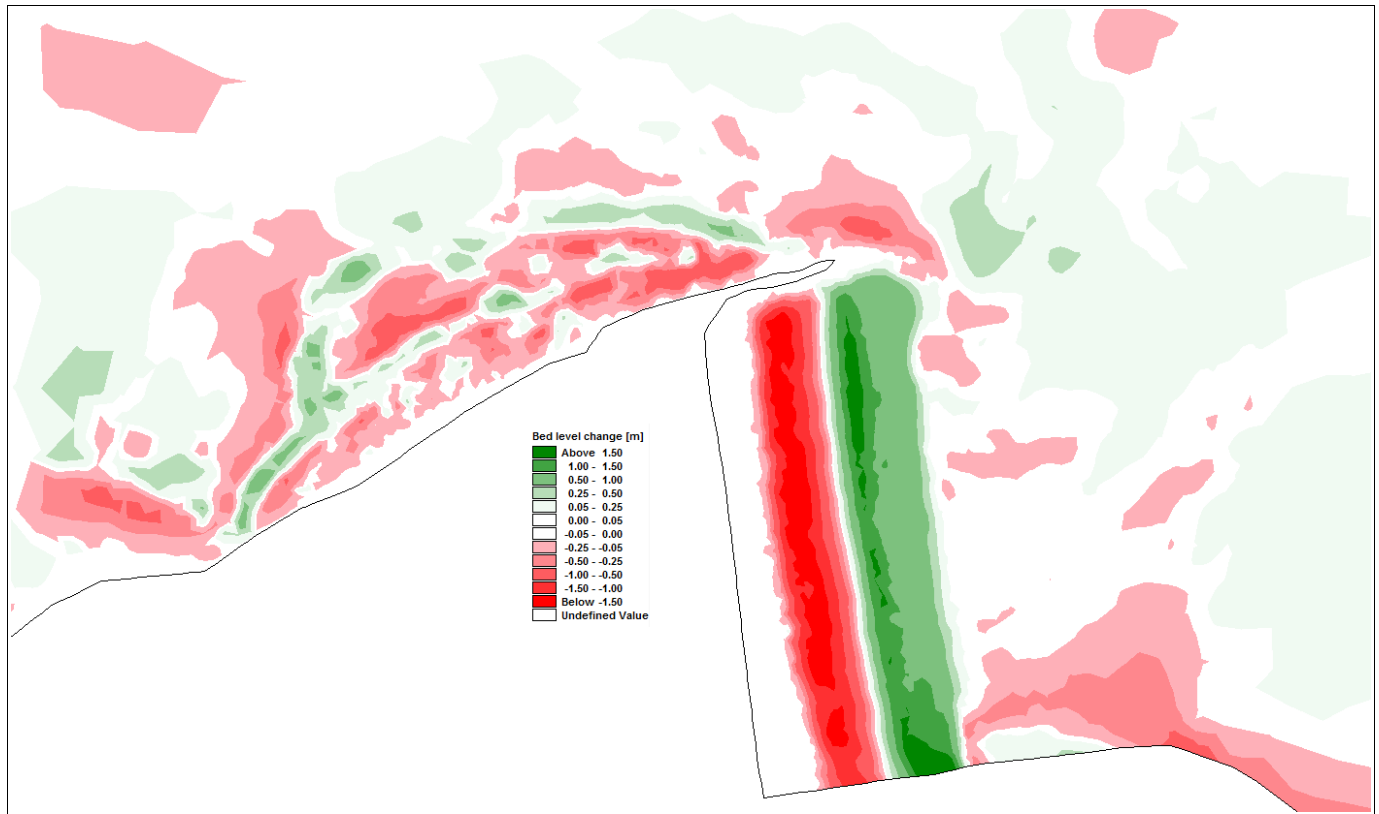
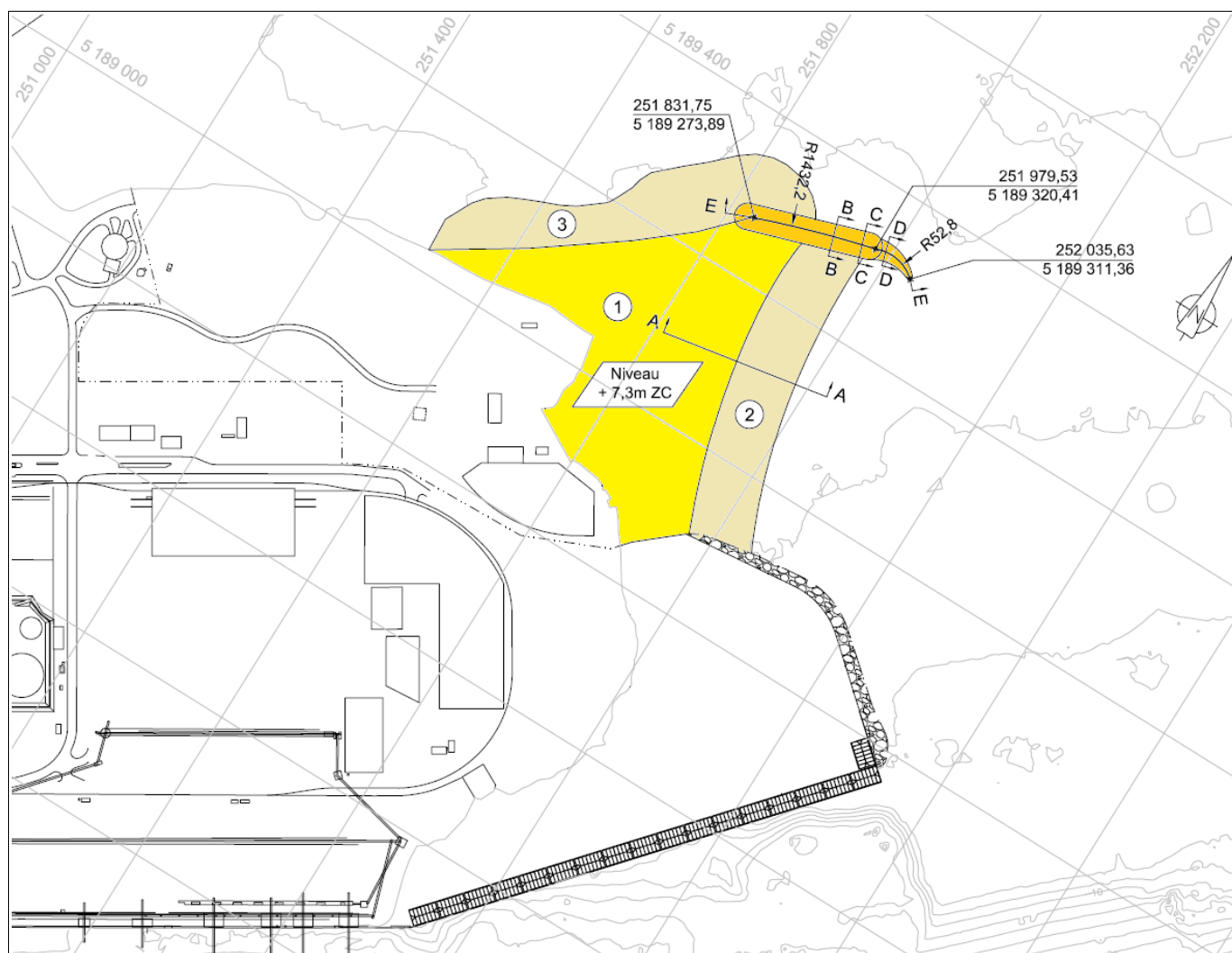


Figure 8.9 Bilan d'érosion/sédimentation – Variante 2014-V5 – 49 jours

8.9 Configuration de plage principale recommandée – 600 000 m³

La figure 8.10 illustre la géométrie de plage principale recommandée en fonction des études décrites dans les chapitres précédents pour un volume de sédiments disponible de l'ordre de 600 000 m³.

La configuration de la variante V6b prévoit qu'une quantité d'environ 652 000 m³ de sédiments sera requise. Afin de valider cette quantité basée sur des informations datant de 2013, des relevés plus récents de la topographie et de la bathymétrie de la zone couverte par le projet seraient recommandés.



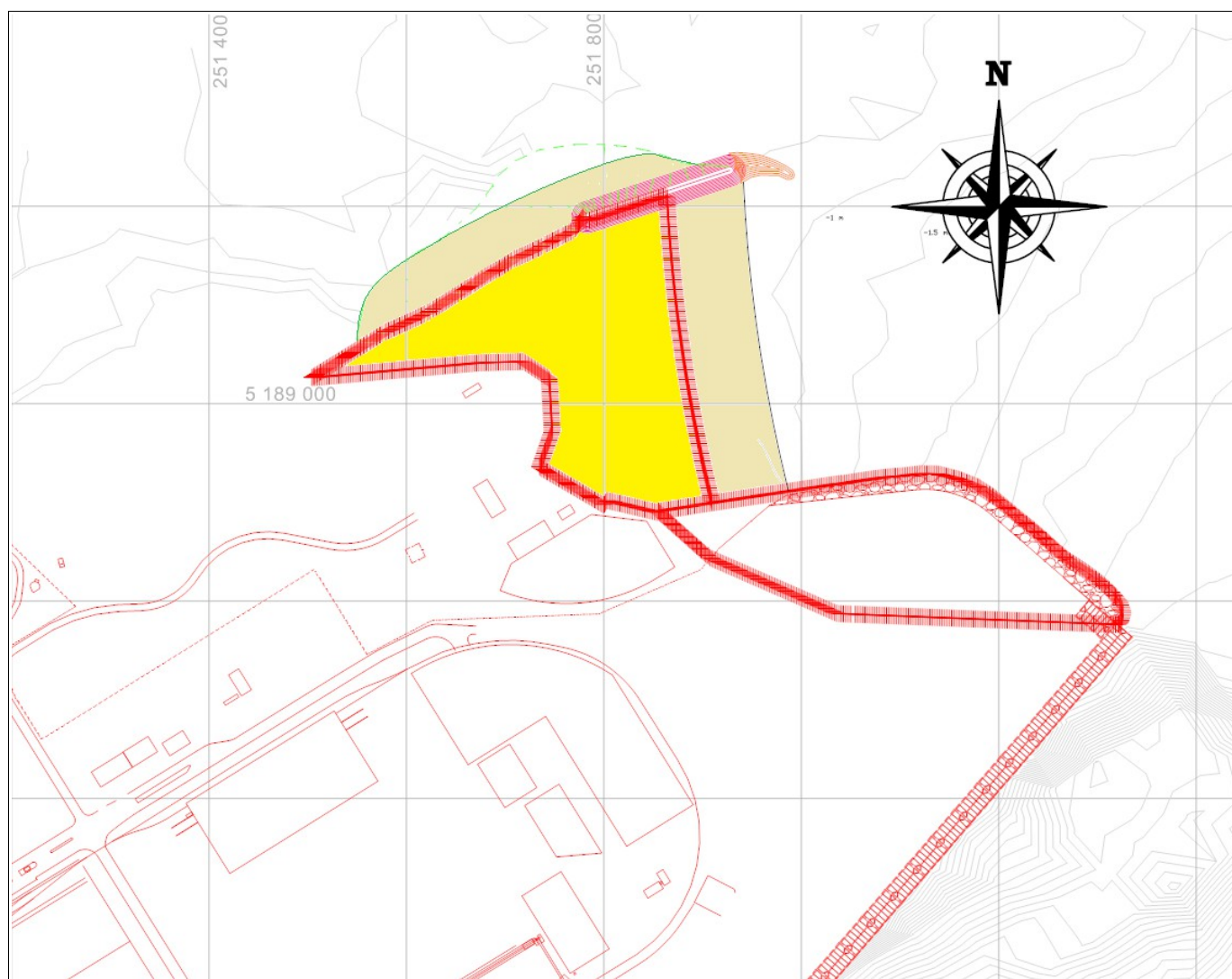


Figure 8.11 Vue en plan de la configuration de plage principale recommandée – 400 000 m³ (option 2014-V5)

8.11 Configuration de plage de kitesurf recommandée

La figure 8.12 illustre la géométrie de plage de kitesurf recommandée en fonction des études décrites dans les chapitres précédents. Cette configuration n'est pas la plus efficace pour protéger la plage de kitesurf contre l'érosion provoquée par les vagues de tempêtes du secteur est, mais elle sera probablement beaucoup mieux acceptée par la clientèle visée (kitesurf) à cause de l'absence de l'obstruction que provoquerait l'épi de la variante 2014-V7. De plus, elle ne présente pas les risques de sédimentation fine auxquels est exposée la plage de kitesurf de la variante 2014-V7.

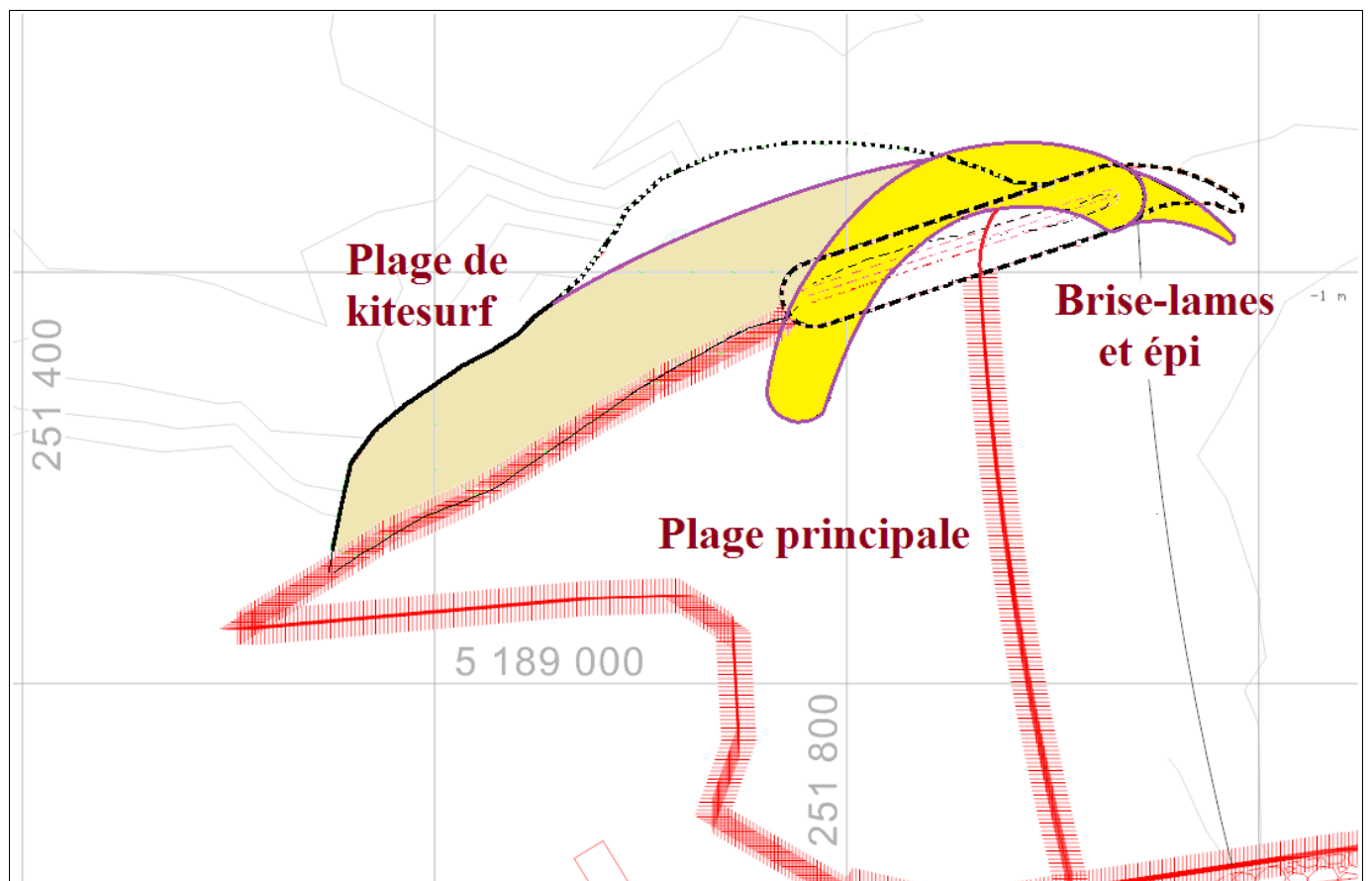


Figure 8.12 Vue en plan de la configuration de plage de kitesurf recommandée (option 2014-V6)

9 Dimensionnement de l'enrochement

9.1 Remontée des vagues sur l'enrochement

Les relations entre les niveaux d'eau et la hauteur des vagues établies au chapitre 7 ont été utilisées pour calculer l'élévation de la crête d'un enrochement placé à l'extrémité nord de la future plage de Beauport.

Les résultats de ces calculs sont illustrés sur la figure 9.1 pour une période de retour de 50 ans et sur la figure 9.2 pour une période de retour de 100 ans. Trois valeurs de « runup » ont été retenues, soit 2%, 10% et 33%. Les chiffres correspondent au pourcentage de vagues qui réussissent à atteindre cette élévation de crête dans un train de vagues de tempête. Compte tenu de la fonction du brise-lames, du fait qu'il ne protège pas directement d'infrastructures stratégiques et qu'il peut se permettre, moyennant certaines précautions, de subir un peu de franchissement, c'est la valeur de 10% qui sera retenue pour le dimensionnement de la crête du brise-lames.

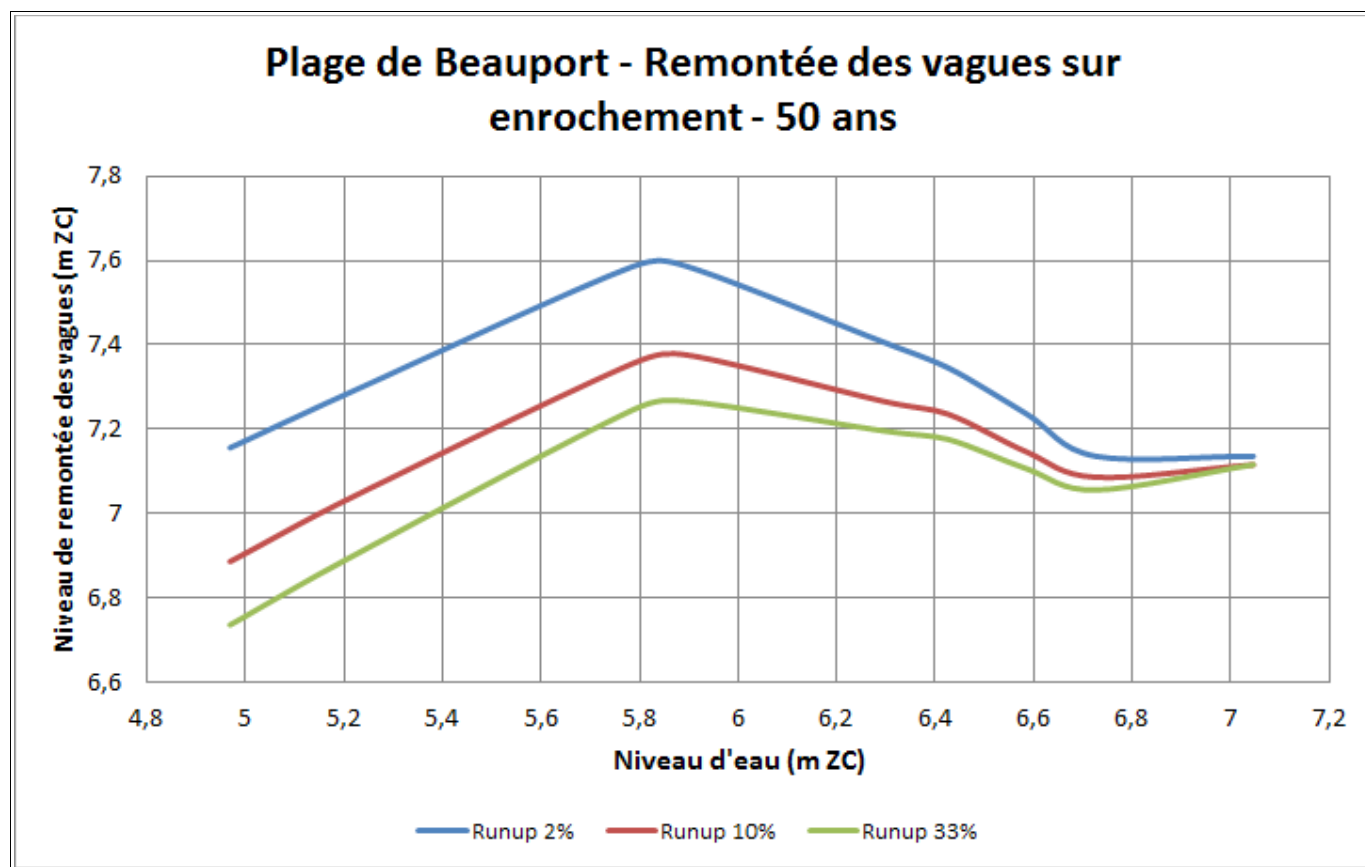


Figure 9.1 Remontée des vagues sur la crête de l'enrochement – Période de retour de 50 ans

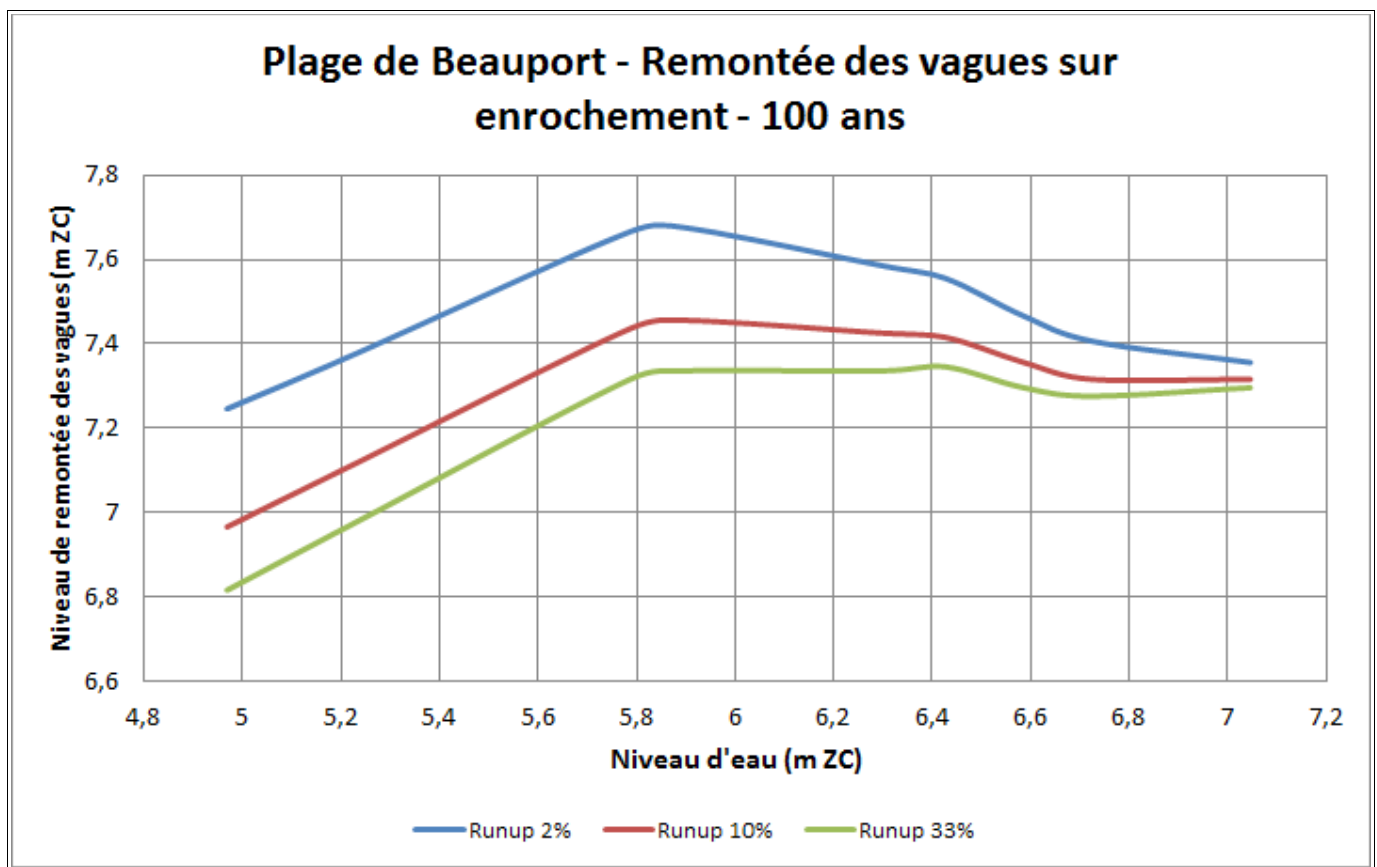


Figure 9.2 Remontée des vagues sur la crête de l'enrochement – Période de retour de 100 ans

C'est l'élévation de crête du brise-lames de +7,5 m ZC qui a été retenue.

9.2 Dimension des enrochements de protection

Le dimensionnement des pierres de carapace de l'enrochement s'est fait à l'aide des équations du CEM¹² 2003. Le dimensionnement des pierres de carapace des enrochements de carapace a été fait en fonction des résultats de l'étude de vagues en considérant une période de retour de l'ordre de 100 ans. Les valeurs qui ont été retenues (équation de Hudson – Shore Protection Manual du US Army Corps of Engineers 1984) sont :

- Hauteur significative des vagues H_s de 1,52 m
- Pente extérieure de 1,5 / 1
- Densité de la pierre de 2,6 t/m³
- Densité de l'eau de 1,0 t/m³
- Coefficient K_D de stabilité de 1,9 pour le musoir et de 2,0 pour le tronc (vagues déferlantes)

¹²Coastal Engineering Manual, U.S. Army Corps of Engineers

Ces valeurs aboutiraient pour le **musoir** à la recommandation de placer de la pierre de carapace de 0,6 à 1,0 tonne. Par contre, ce musoir est exposé à la glace et la recommandation est plutôt de placer de la **pierre de carapace de 1 à 2 tonnes** (800 à 1100 mm de diamètre équivalent) sur deux couches. L'épaisseur de cette protection serait de 1,7 m et la largeur minimale de la crête serait de 2,6 m.

La pierre-filtre à placer sous cette pierre de carapace serait de la pierre de 100 à 200 kg (400 à 500 mm) sur une épaisseur de 0,9 m. Cette pierre-filtre pourrait être installée soit sur une couche de pierre 0 à 100 kg (0 à 400 mm) dans laquelle la granulométrie serait contrôlée, soit sur un géotextile empêchant les matériaux fins (sable, silt et argile) du noyau et de la plage de migrer à travers la pierre-filtre et la pierre de carapace.

Le **tronc du brise-lames** est moins exposé aux combinaisons de vagues et de glace. La recommandation est de placer de la **pierre de carapace de 0,5 à 1 tonne** (650 à 800 mm de diamètre équivalent) sur deux couches. L'épaisseur de cette protection serait de 1,4 m et la largeur minimale de la crête serait de 2,1 m.

La pierre-filtre à placer sous cette pierre de carapace serait de la pierre de 50 à 100 kg (300 à 400 mm) sur une épaisseur de 0,8 m.

9.3 Coupe-types de l'enrochement

Les figures 9.3 et 9.4 illustrent respectivement les coupes-types du musoir et du tronc de l'enrochement stabilisant l'extrémité nord de la plage. La localisation des coupes se retrouve sur la figure 8.6.

La méthode de travail de l'entrepreneur et l'échéancier des travaux n'étant pas encore établis à ce stade des études, il est indiqué sur les coupes-types que l'enrochement devra être ancré de 0,8 à 1 m dans le terrain en place par le biais d'une excavation pour assurer une protection contre l'affouillement du pied de pente du brise-lames.

La méthode de travail de l'entrepreneur pourrait rendre inutile cette protection contre l'affouillement dans certaines parties du brise-lames, en particulier celles qui seront recouvertes par les sédiments dragués. La méthode de travail retenue pourrait éventuellement permettre de remplacer une partie non-négligeable de la carapace et de la pierre-filtre par du tout-venant. Ces modifications pourraient diminuer le coût du brise-lames. Par contre, avant toute modification de la géométrie du brise-lames, il faudra être sûr que ces modifications ne fragiliseront pas l'infrastructure à court ou long terme.

Il est important de noter que la coupe-type finale du brise-lames devra tenir compte de la méthode de travail de l'entrepreneur en charge de la mise en place des sédiments et de la nécessité d'éviter une migration trop intense des sédiments de la plage à travers le brise-lames. La mise en place d'une membrane géotextile et/ou l'utilisation de plusieurs types de pierre-filtre pourraient devoir être envisagées pour répondre à l'ensemble des critères de dimensionnement du brise-lames et de pérennité de la plage.

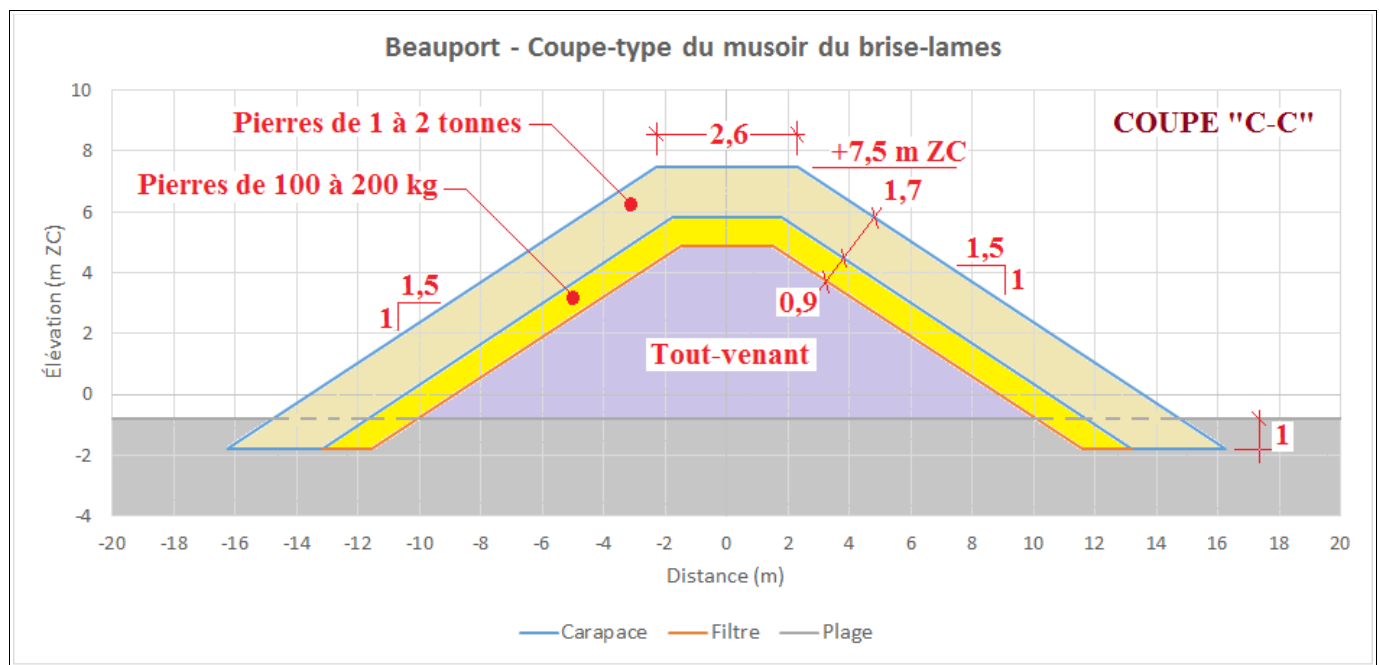


Figure 9.3 Coupe-type du musoir de l'enrochement

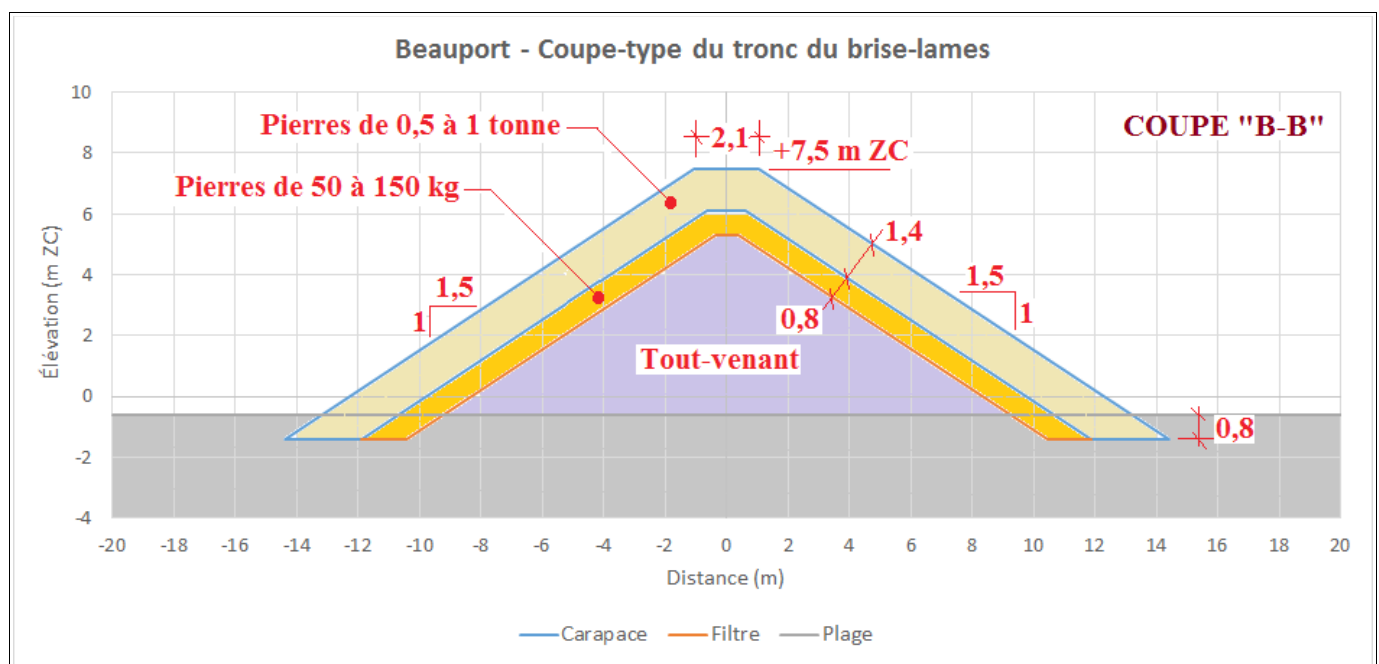


Figure 9.4 Coupe-type du tronc de l'enrochement

9.4 Musoir en rip-rap.

En cours d'étude de stabilité de la plage, il est apparu nécessaire de prolonger le brise-lames par une infrastructure moins massive et moins propice à l'accélération des vitesses de courant à son extrémité orientale qu'un musoir traditionnel. La solution d'un épi constitué de pierres de relativement petit calibre

s'est imposée comme une solution potentiellement intéressante, surtout après le visionnement des résultats de la modélisation hydrodynamique.

Le principe de l'épi est de placer ces pierres de petit calibre selon des pentes plus faibles que celles du brise-lames de façon à limiter leur vulnérabilité aux glaces et aux vagues.

Le calcul de la grosseur des pierres s'est effectué selon le principe du « rip-rap » (CEM¹³).

La recommandation est de placer de la pierre de 50 à 800 kg (300 à 750 mm) respectant un poids médian de 200 kg (500 mm). La figure 9.5 illustre la coupe-type en travers de cet épi et la figure 9.6 illustre la coupe-type longitudinale de cet épi.

Une certaine dégradation de cet épi est prévisible à cause du mouvement des glaces avec la marée et les courants. Un entretien régulier devra être fait sur cet épi.

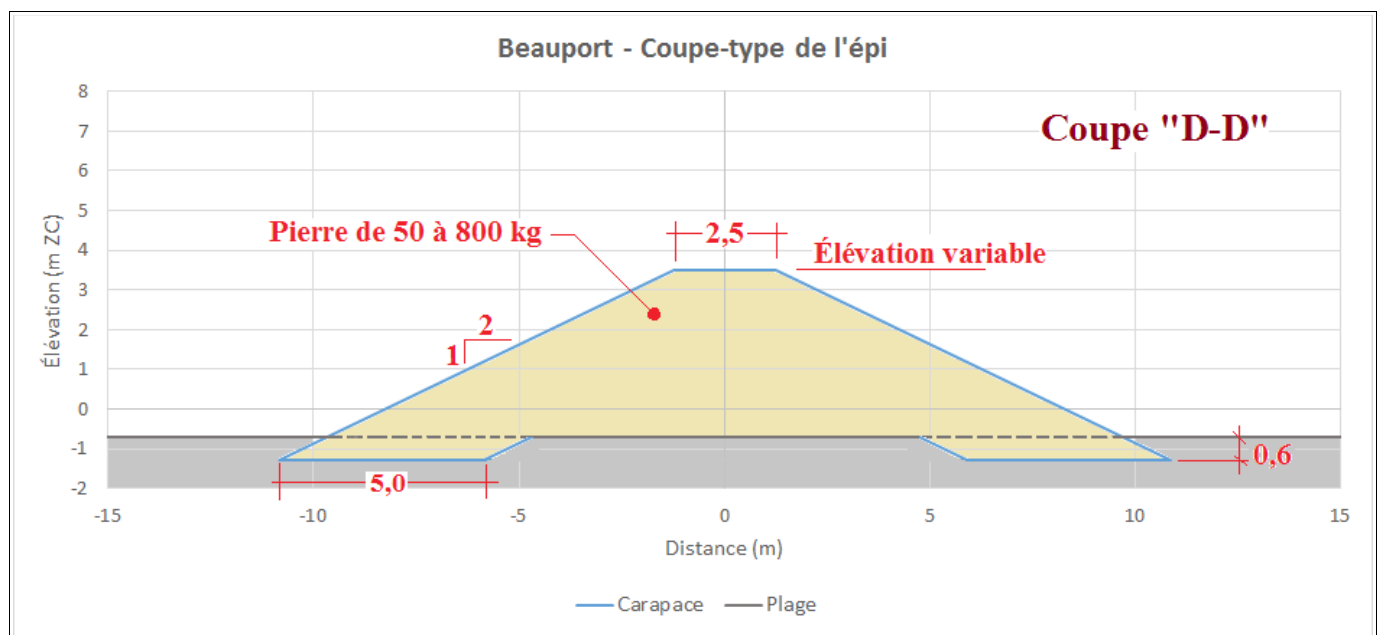


Figure 9.5 Coupe type transversale de l'épi

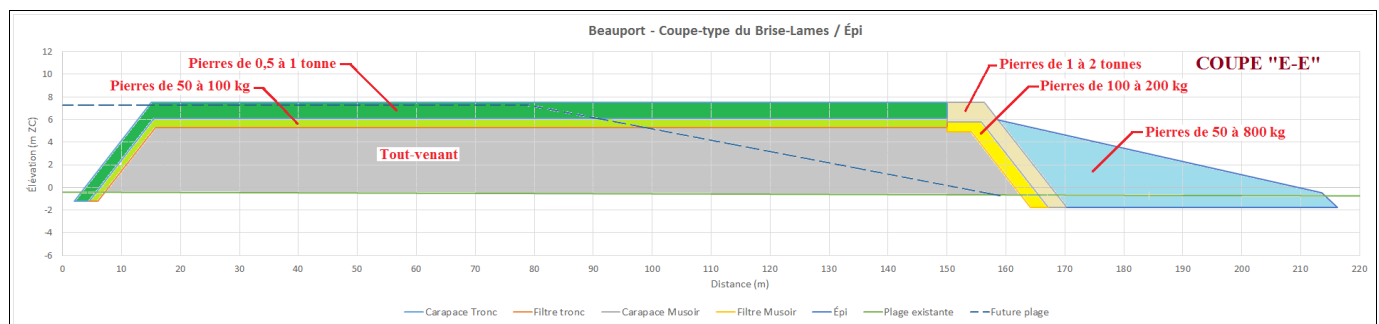


Figure 9.6 Coupe-type longitudinale du brise-lames et de l'épi

¹³Coastal Engineering Manual - Chap.VI-5-3-7 page VI-5-84 – U.S. Army Corps of Engineers

10 Conclusion et recommandations

10.1 Conclusion

Une évaluation paramétrique de la faisabilité et une analyse à l'aide d'un modèle numérique hydrodynamique (MIKE 21 - Lasalle|NHC) de la stabilité d'un projet de nouvelles plages ont été réalisées pour le compte de l'Administration portuaire de Québec dans le cadre de la conception de nouvelles plages sur le site à l'est du secteur de Beauport à Québec.

Ces études se sont appuyées sur une définition la plus précise possible des paramètres physiques qui influencent la stabilité des plages, soit la granulométrie des sédiments dont elles seront constituées, les vagues (hauteurs, directions et fréquence d'occurrence) et les variations de niveau d'eau (amplitudes ordinaires et exceptionnelles).

Les études hydrodynamiques ont été réalisées en étroite collaboration avec Lasalle|NHC (Catherine Denault, Nicolas Galant et Marc Villeneuve) qui a produit un rapport spécifique à cette partie du mandat.

Les études entreprises ont démontré que le concept de plage principale recommandé (option 2014-V5 – figure 8.12) répondait aux différentes exigences de stabilité et de durabilité d'une plage située dans un tel environnement. Ce concept respecte les quantités de sédiments prévues pour sa construction (400 000 m³).

Deux concepts de plage de kitesurf ont été envisagés pour contrer le phénomène d'érosion de cette plage que provoquent les tempêtes du secteur Est. Bien qu'étant moins efficace du point de vue de l'érosion, c'est la variante 2014-V6 qui serait recommandée à cause de son interférence nettement moins grande que celle de la variante 2014-V7 avec l'utilisation du plan d'eau par les usagers du kitesurf et à cause des risques de sédimentation fine que pose la variante 2014-V7. Il resterait à valider l'hypothèse de l'interférence du brise-lames auprès des usagers.

10.2 Recommandations

Une plage est un milieu dynamique et, dans un contexte naturel en équilibre, un récepteur continu de nouveaux sédiments qui lui permettent de conserver ses caractéristiques. Les nouvelles plages du secteur de Beauport seront des plages artificielles sans source naturelle de nouveaux matériaux et, à long terme, elles exigeront l'apport de sédiments sous forme de **recharges de plage** pour perdurer. L'exemple de la plage actuelle permet cependant de penser que ces recharges ne seront pas requises avant plusieurs décennies sur la nouvelle plage principale de Beauport.

Le concept présenté a été développé sans informations en provenance de l'équipe en charge des infrastructures portuaires. L'échéancier de réalisation des travaux et les méthodes de travail de l'entrepreneur ne sont pas connues. Il est plausible et envisageable que certains paramètres ayant guidé la

conception des infrastructures (plage et brise-lames) soient, dans une certaine mesure, modifiés en vue de la réalisation du projet. Ces modifications ne peuvent cependant pas se faire sans en valider les impacts qui pourraient se révéler catastrophiques pour la stabilité et la durabilité du concept de plages présenté. Les éléments qui pourraient être touchés par des demandes de modifications éventuelles sont la pente de construction des futures plages et les coupes-types du brise-lames.

Un déplacement des sédiments du haut vers le bas de plage sera observé après la construction, surtout lors des premières tempêtes importantes. Cet effet est attendu et normal. Ces mouvements de sédiments contribueront à stabiliser la plage selon un profil « naturel ». Certaines interventions pourraient être requises du point de vue esthétique et fonctionnel pour régulariser le profil de plage au début de la saison touristique. Il est recommandé pour la durabilité de la plage que ces interventions soient limitées au strict minimum et réalisées avec de la machinerie légère.

De nouveaux relevés topographiques et bathymétriques seront nécessaires pour valider les quantités de matériaux requis pour la construction des plages.

Des hypothèses ont été faites en ce qui concerne la variation anticipée des niveaux d'eau extrêmes dans le cadre des changements climatiques en cours. Il est recommandé de réévaluer ces informations au fur et à mesure de l'évolution de l'état des connaissances à ce sujet.

Préparé par :



Yann Ropars, ing., M. Sc.

Consultants Ropars, Inc.

yann_ropars@videotron.ca

Téléphone : (418) 998-6224

ANNEXE A

Tempêtes du secteur Est-Nord-Est près de Beauport

Chaque figure présente l'évolution temporelle de trois paramètres, soit :

- La hauteur des vagues calculées au point BB1 (m)
- Le niveau d'eau (m ZC)
- La vitesse des vents à la station météorologique de Beauport (en dizaines de km/h)

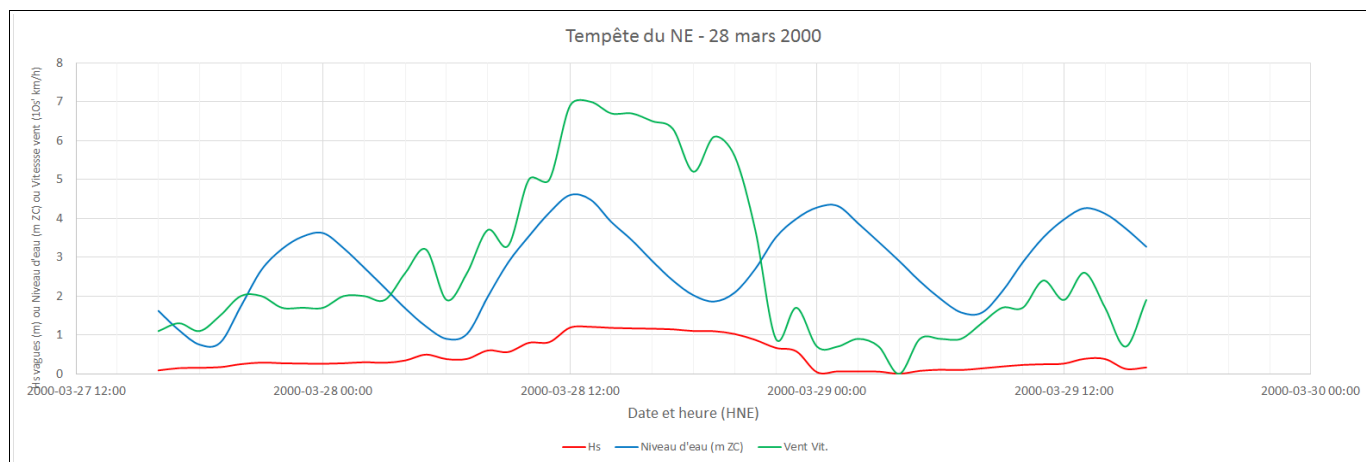


Figure A1 Tempête du secteur Est-Nord-Est du 28 mars 2000

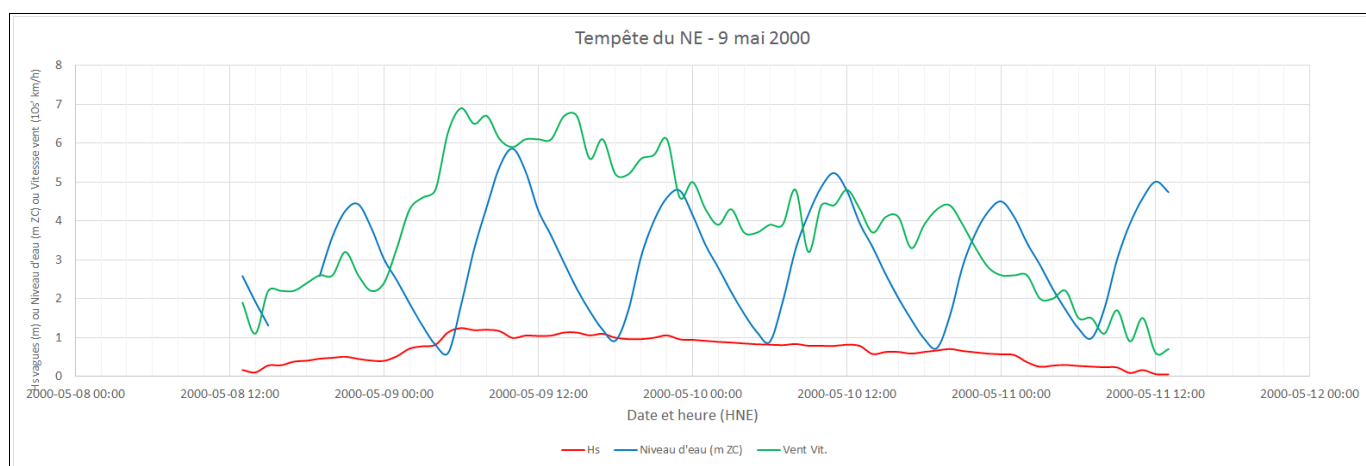


Figure A2 Tempête du secteur Est-Nord-Est du 9 mai 2000

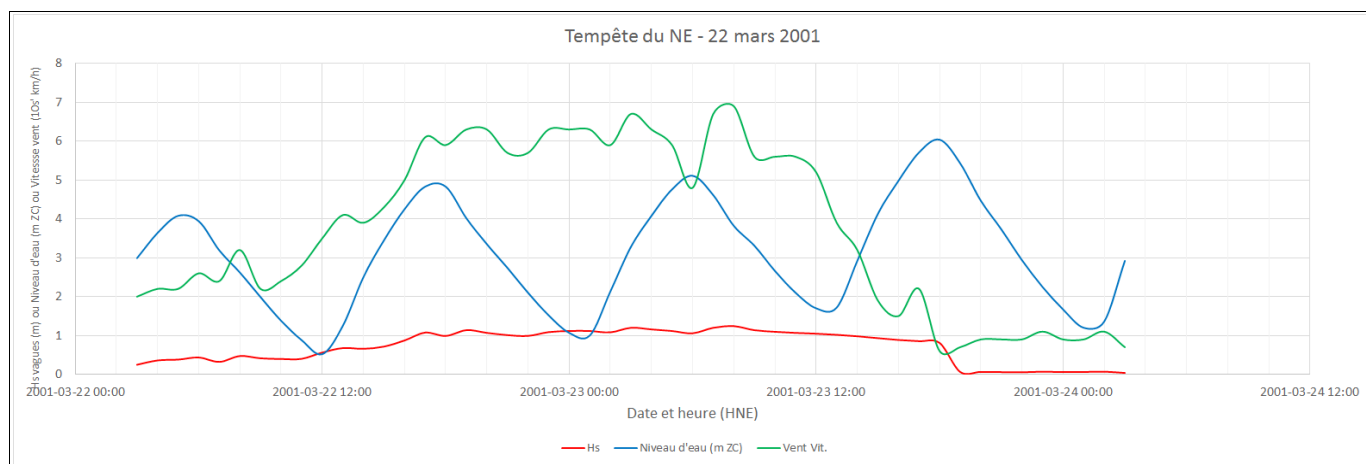


Figure A3 Tempête du secteur Est-Nord-Est du 22 mars 2001

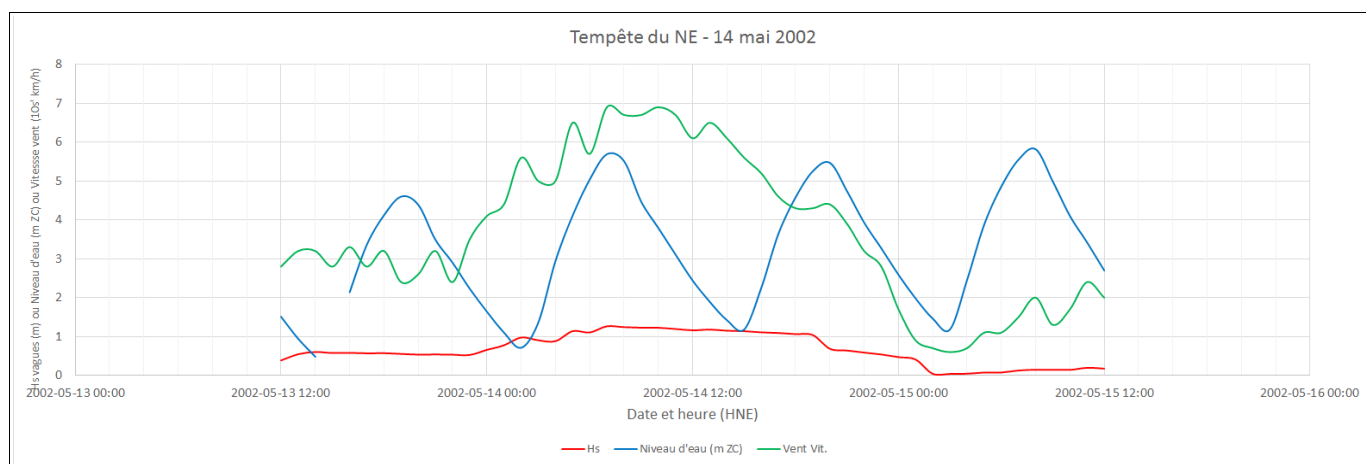


Figure A4 Tempête du secteur Est-Nord-Est du 14 mai 2002

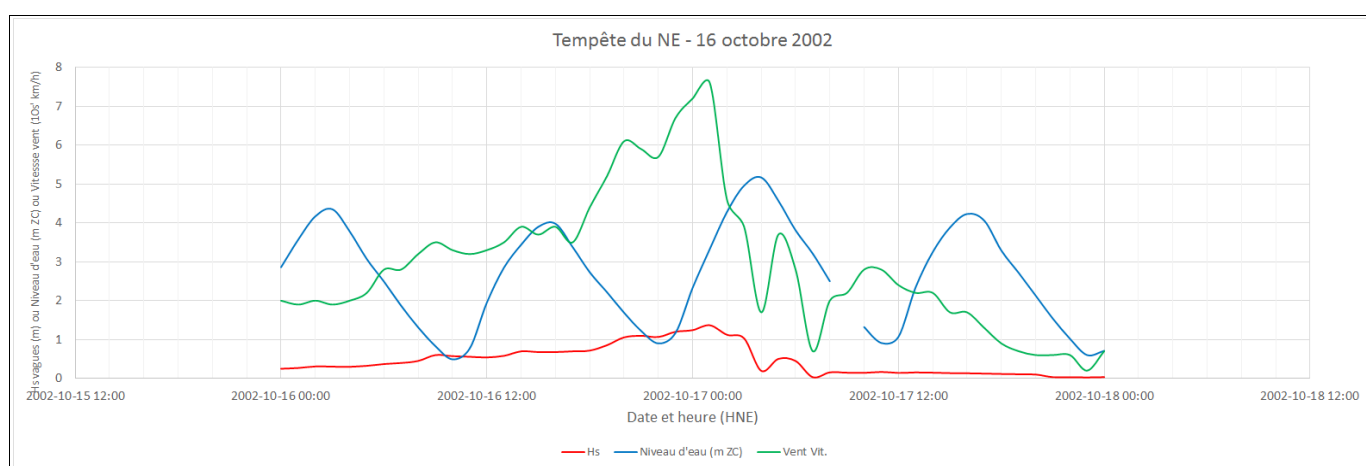


Figure A5 Tempête du secteur Est-Nord-Est du 16 octobre 2002

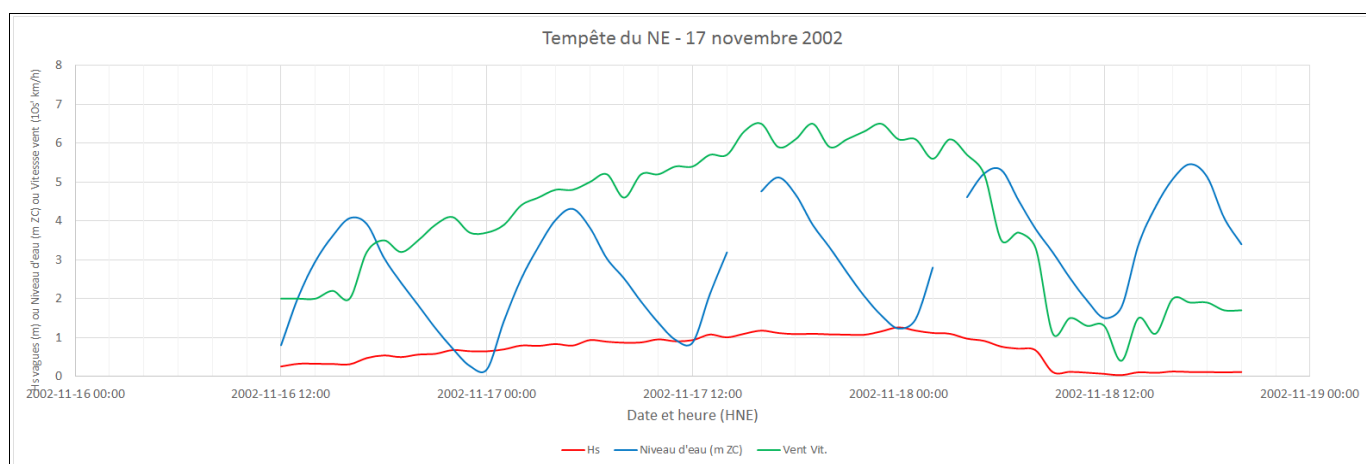


Figure A6 Tempête du secteur Est-Nord-Est du 17 novembre 2002

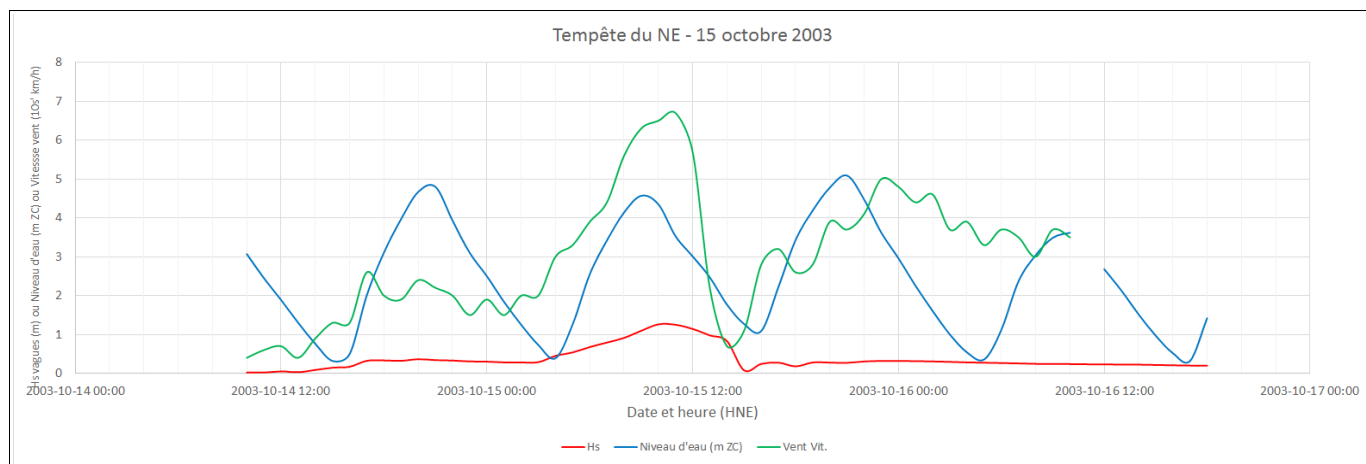


Figure A7 Tempête du secteur Est-Nord-Est du 15 octobre 2003

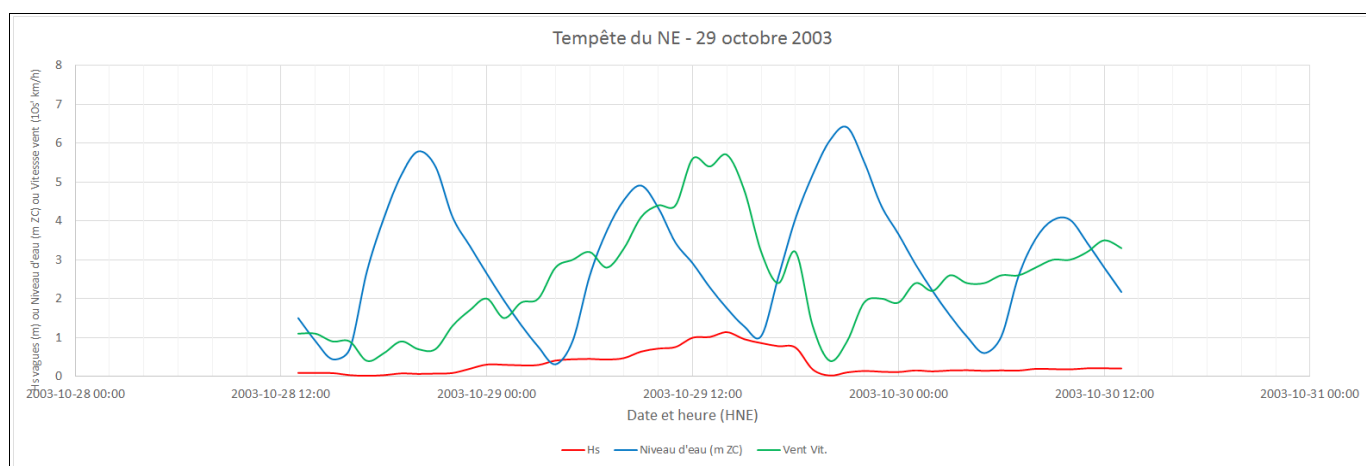


Figure A8 Tempête du secteur Est -Nord-Est du 29 octobre 2003

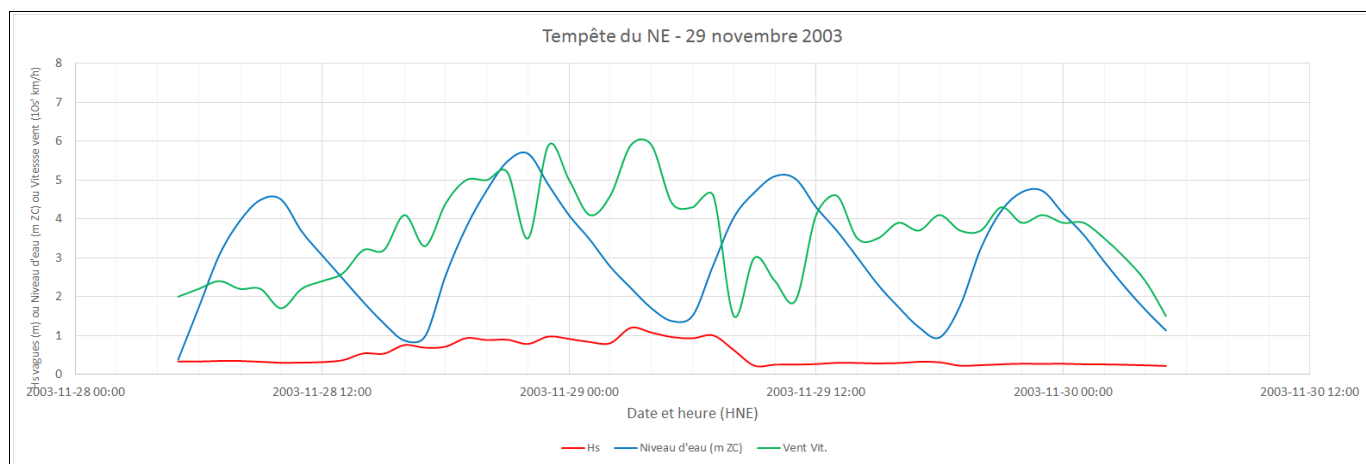


Figure A9 Tempête du secteur Est-Nord-Est du 29 novembre 2003

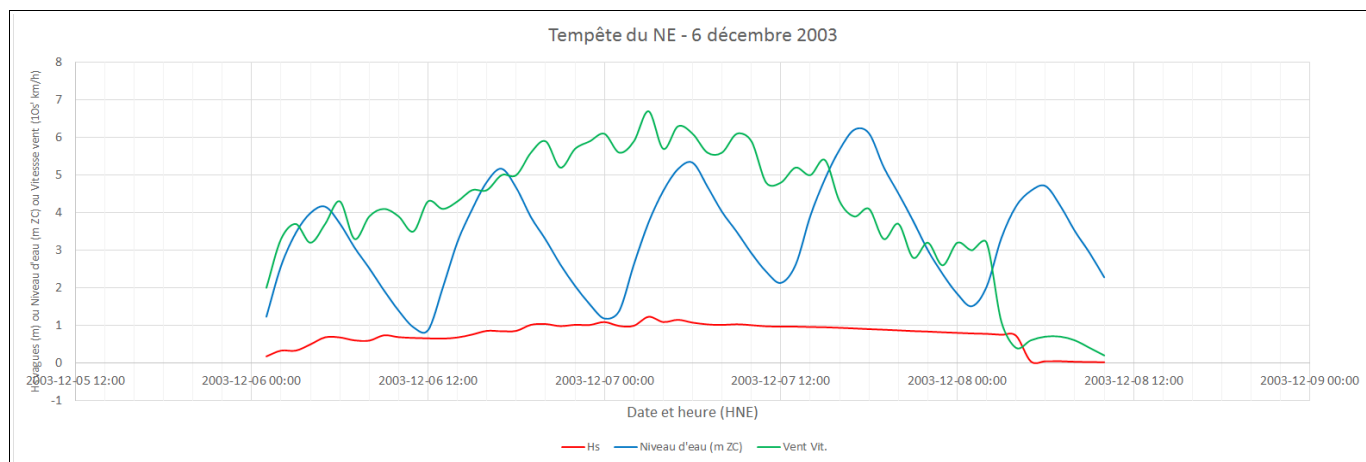


Figure A10 Tempête du secteur Est-Nord-Est du 6 décembre 2003

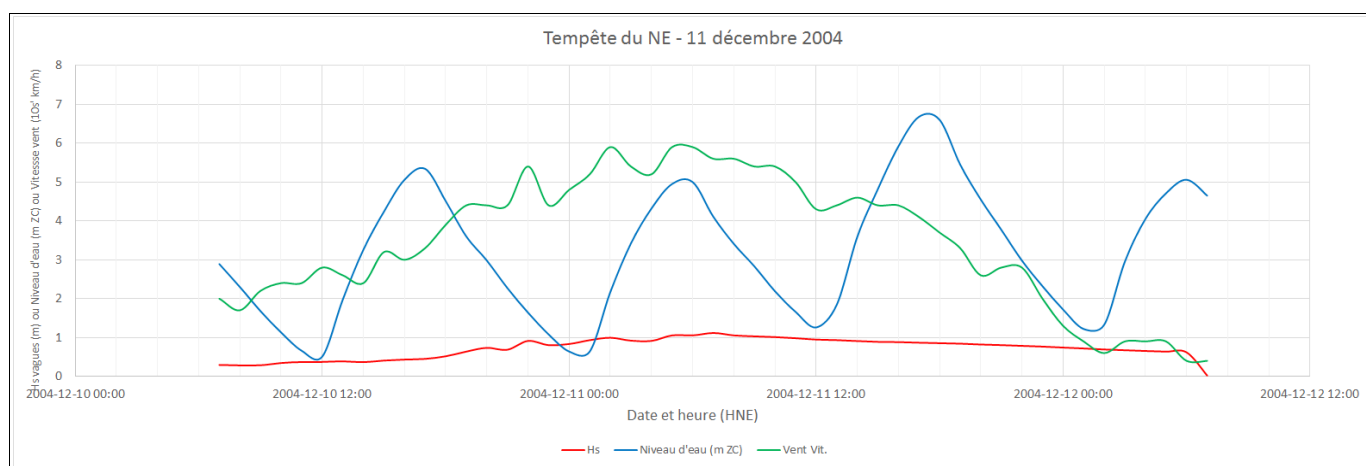


Figure A11 Tempête du secteur Est-Nord-Est du 11 décembre 2004

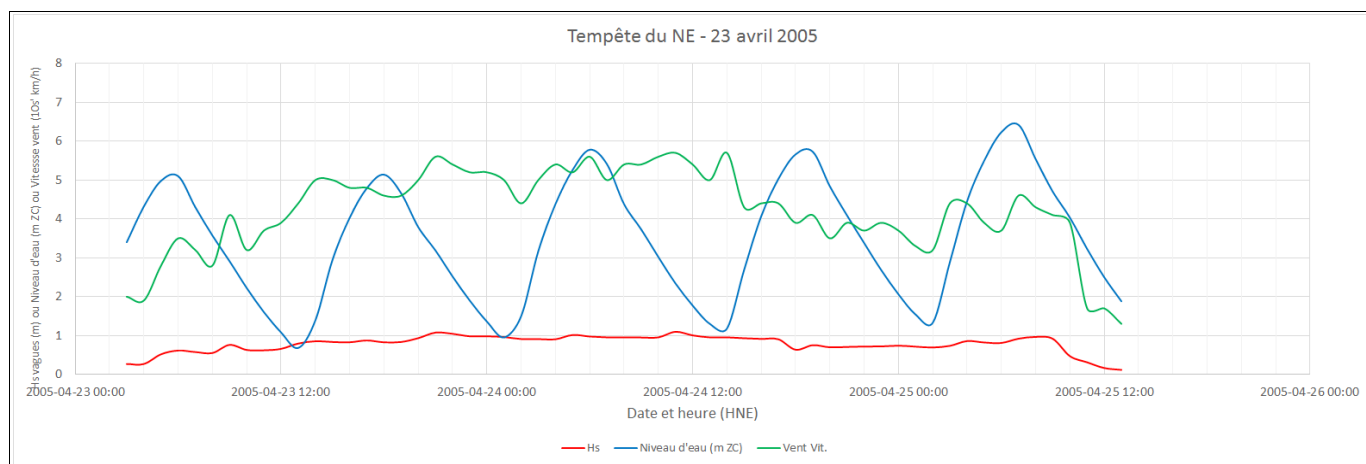


Figure A12 Tempête du secteur Est -Nord-Est du 23 avril 2005

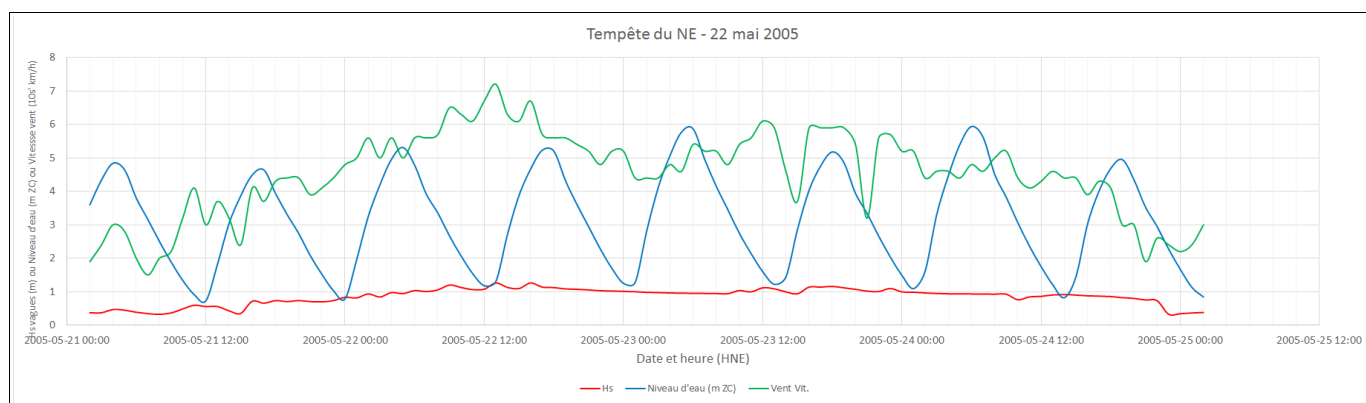


Figure A13 Tempête du secteur Est-Nord-Est du 22 mai 2005

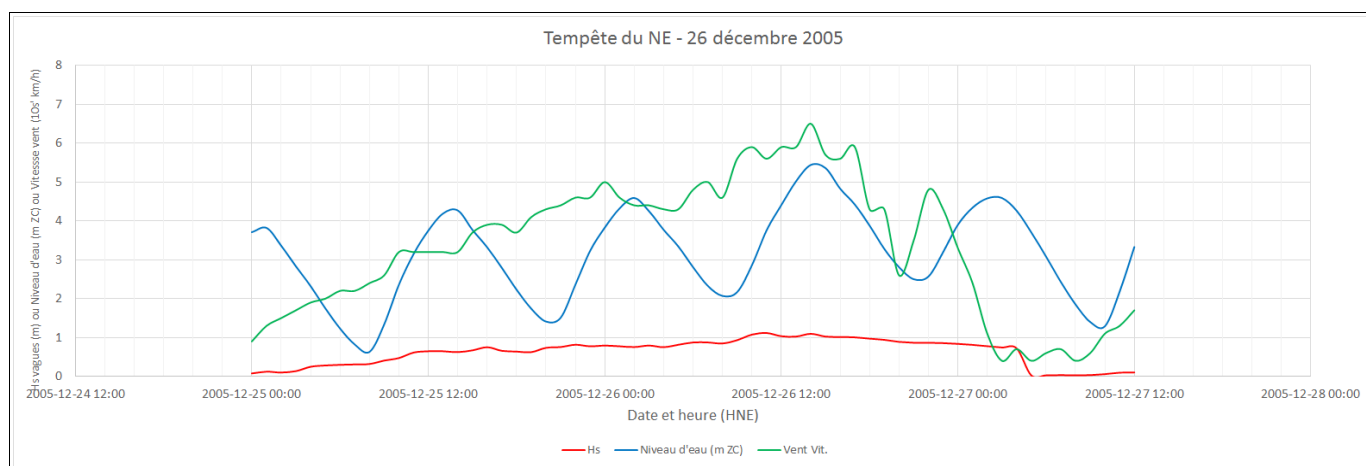


Figure A14 Tempête du secteur Est-Nord-Est du 26 décembre 2005

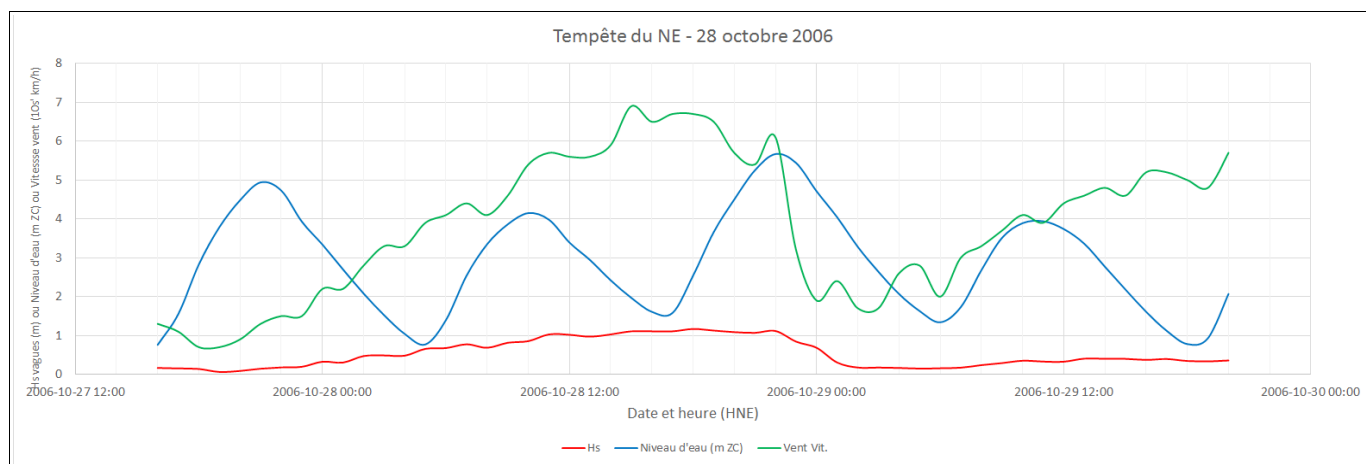


Figure A15 Tempête du secteur Est-Nord-Est du 28 octobre 2006

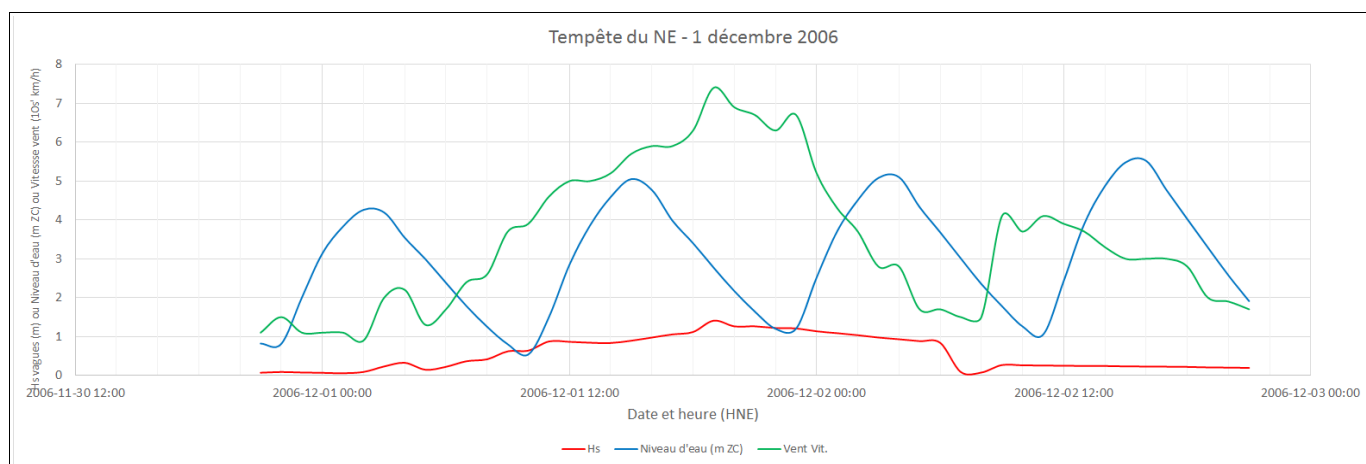


Figure A16 Tempête du secteur Est-Nord-Est du 1^{er} décembre 2006

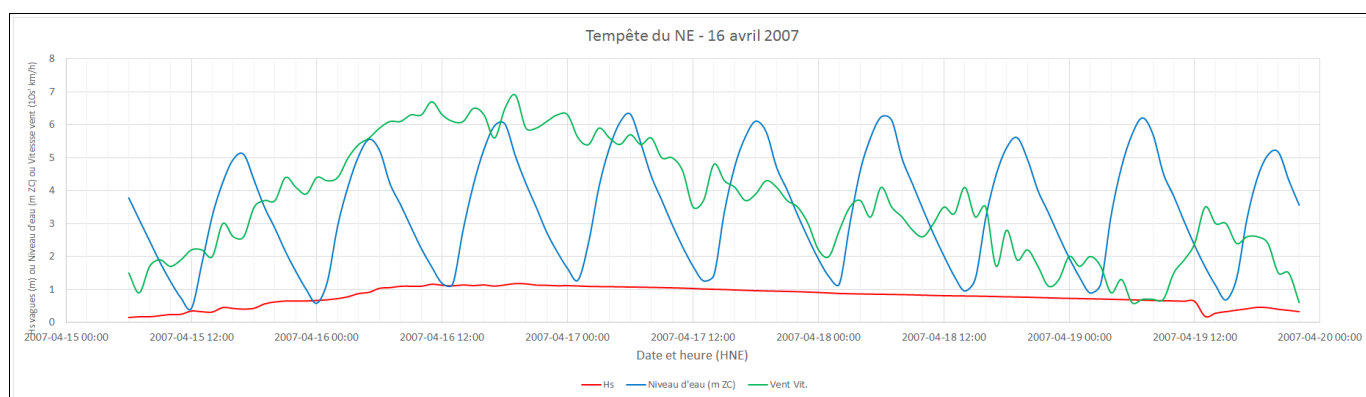


Figure A16 Tempête du secteur Est-Nord-Est du 16 avril 2007

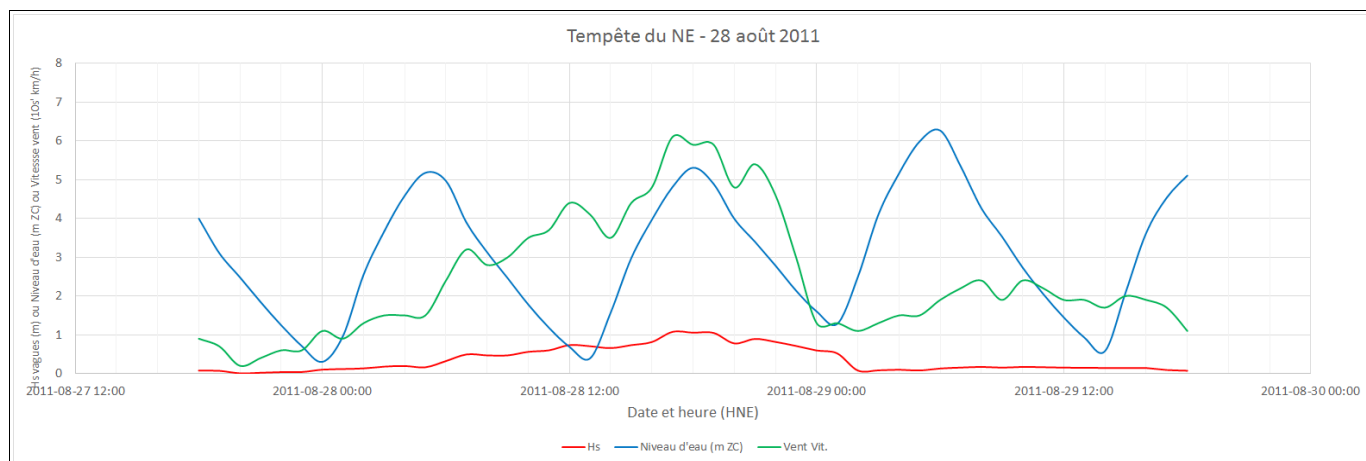


Figure A16 Tempête du secteur Est-Nord-Est du 28 août 2011

ANNEXE B

Tempêtes du secteur Ouest-Sud-Ouest près de Beauport

Chaque figure présente l'évolution temporelle de trois paramètres, soit :

- La hauteur des vagues calculées au point BB3 (m)
- Le niveau d'eau (m ZC)
- La vitesse des vents à la station météorologique de Beauport (en dizaines de km/h)

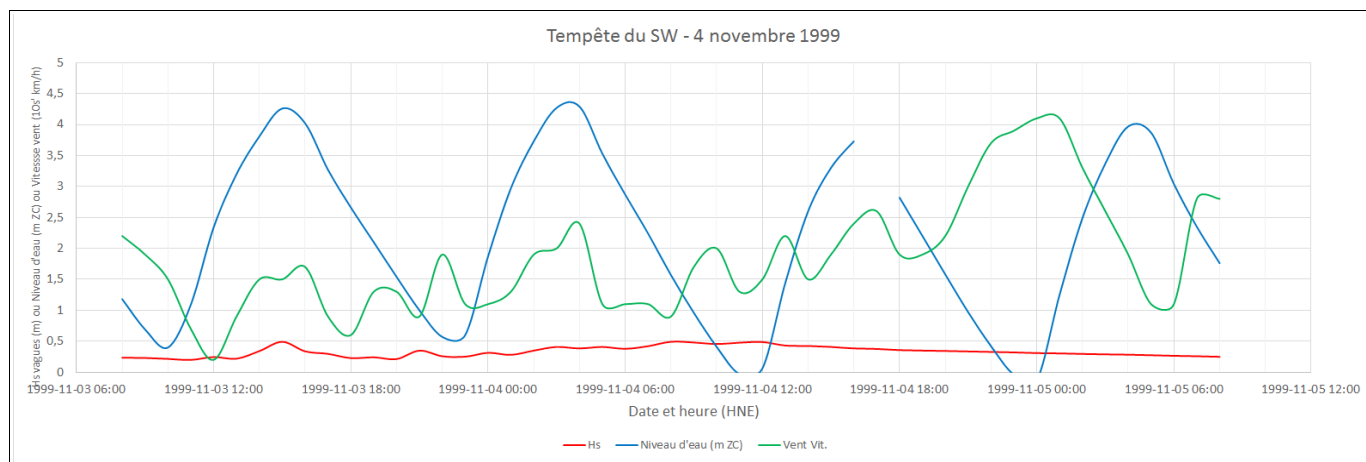


Figure B1 Tempête du secteur Ouest-Sud-Ouest du 4 novembre 1999

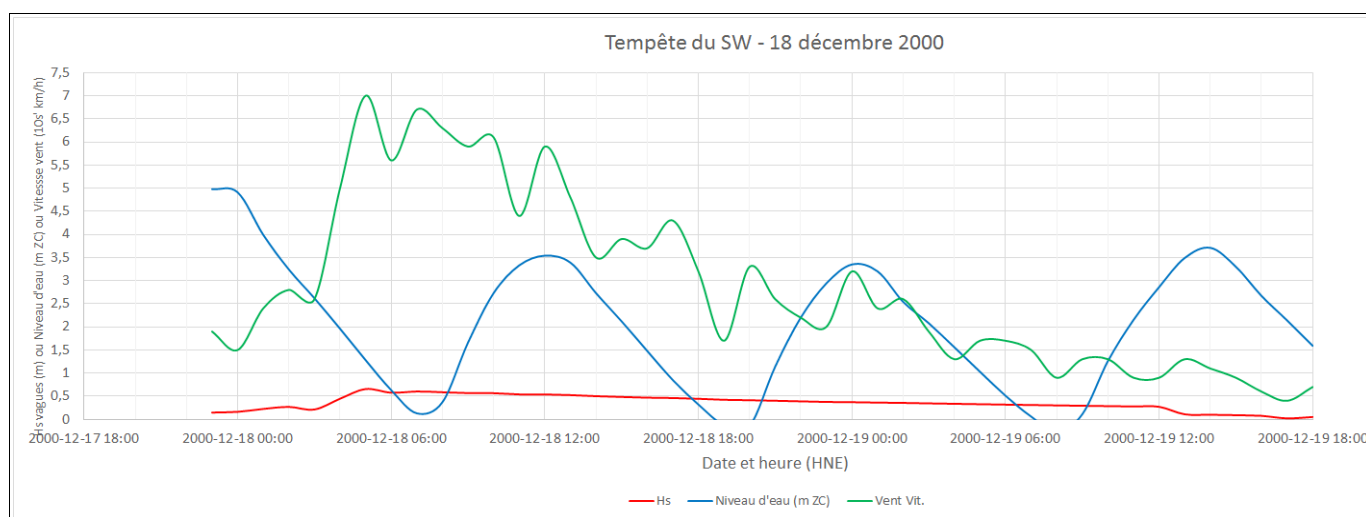


Figure B2 Tempête du secteur Ouest-Sud-Ouest du 18 décembre 2000

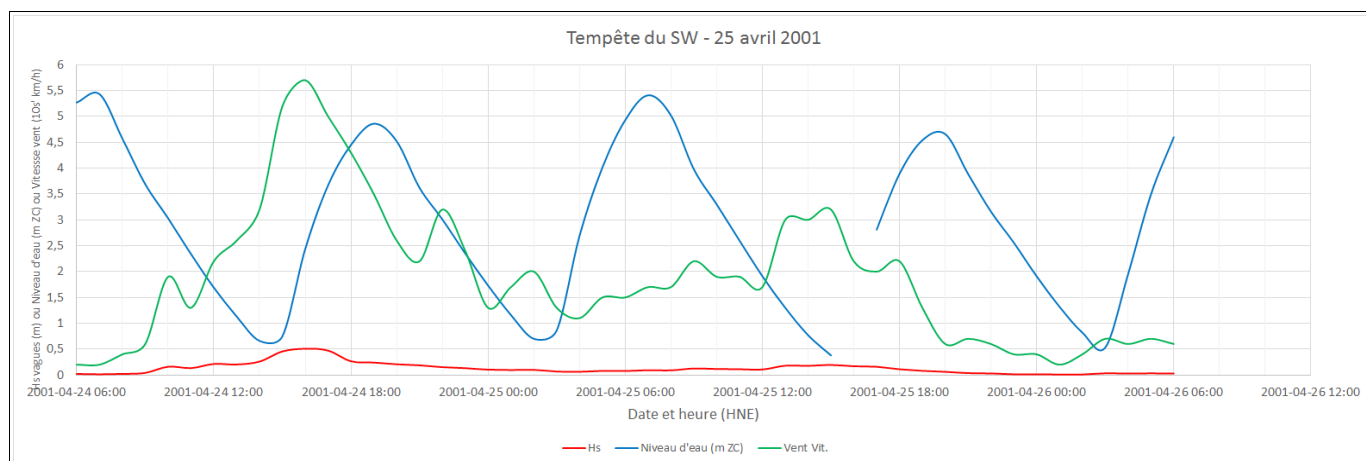


Figure B3 Tempête du secteur Ouest-Sud-Ouest du 25 avril 2001

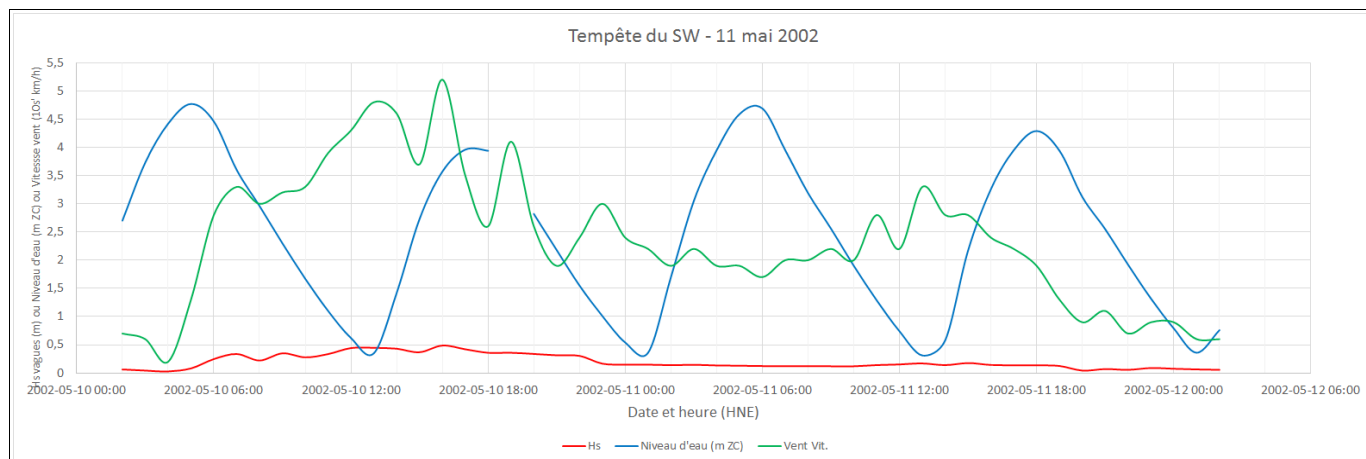


Figure B4 Tempête du secteur Ouest-Sud-Ouest du 11 mai 2002

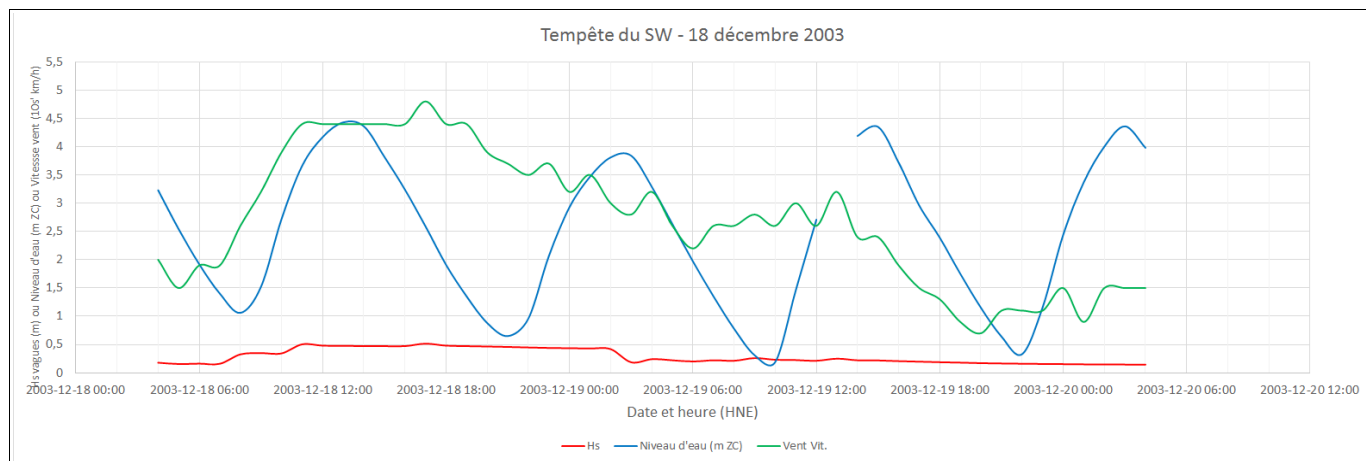


Figure B5 Tempête du secteur Ouest-Sud-Ouest du 18 décembre 2003

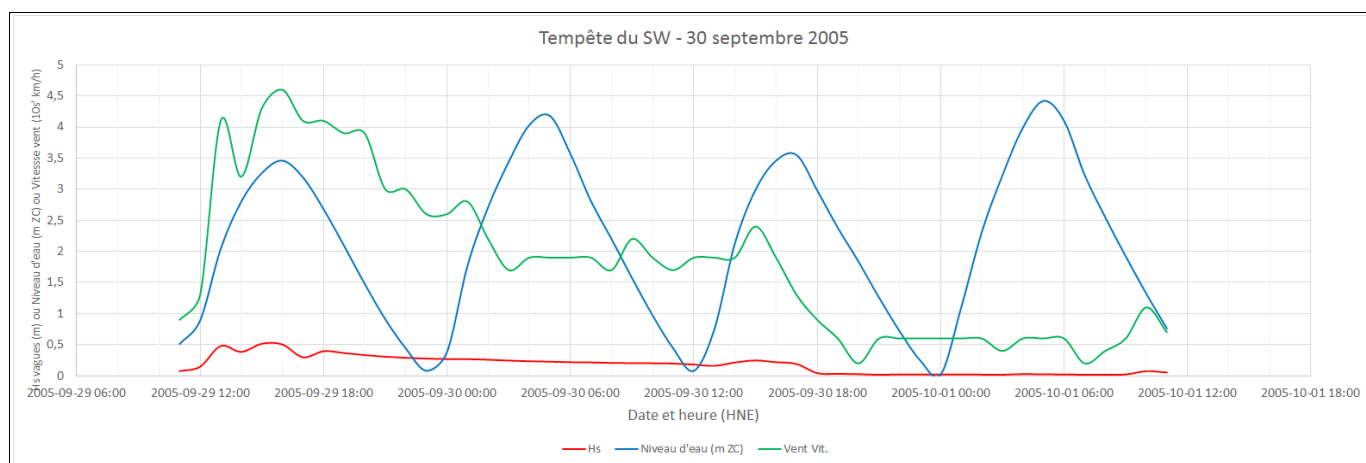


Figure B6 Tempête du secteur Ouest-Sud-Ouest du 30 septembre 2005

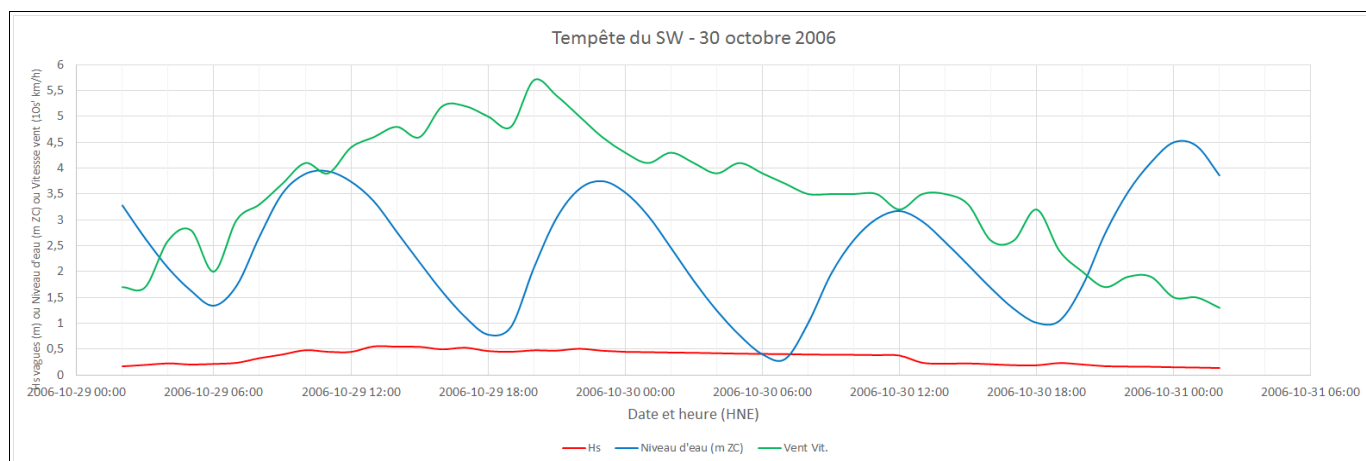


Figure B7 Tempête du secteur Ouest-Sud-Ouest du 30 octobre 2006

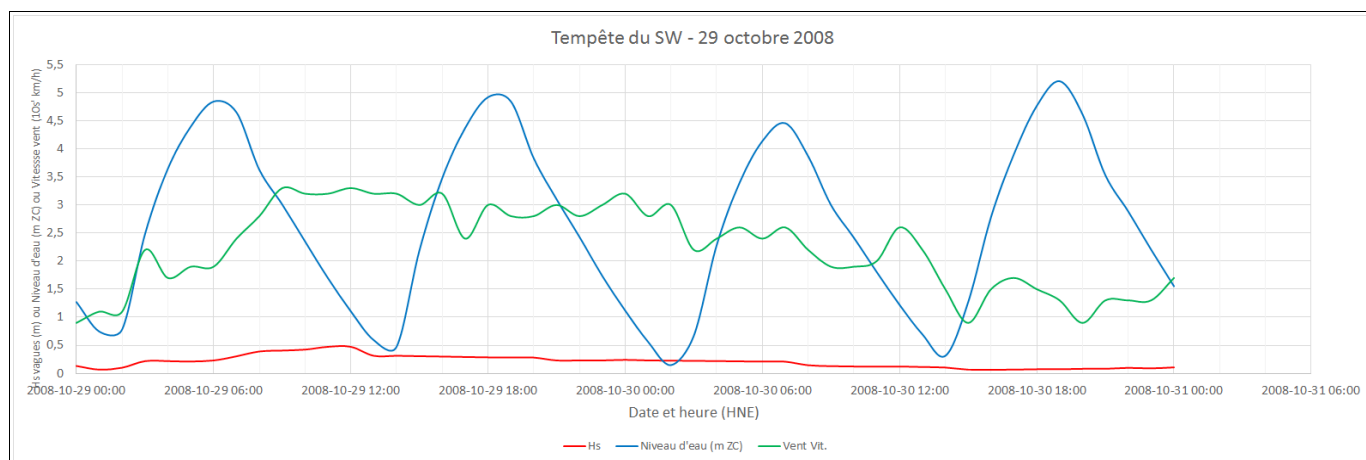


Figure B8 Tempête du secteur Ouest-Sud-Ouest du 29 octobre 2008

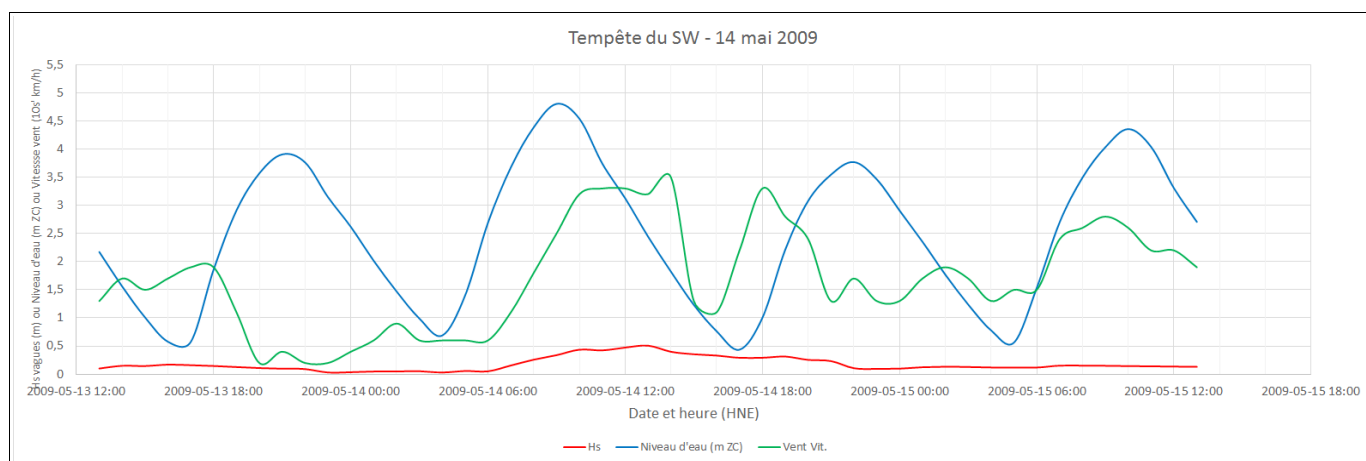


Figure B9 Tempête du secteur Ouest-Sud-Ouest du 14 mai 2009

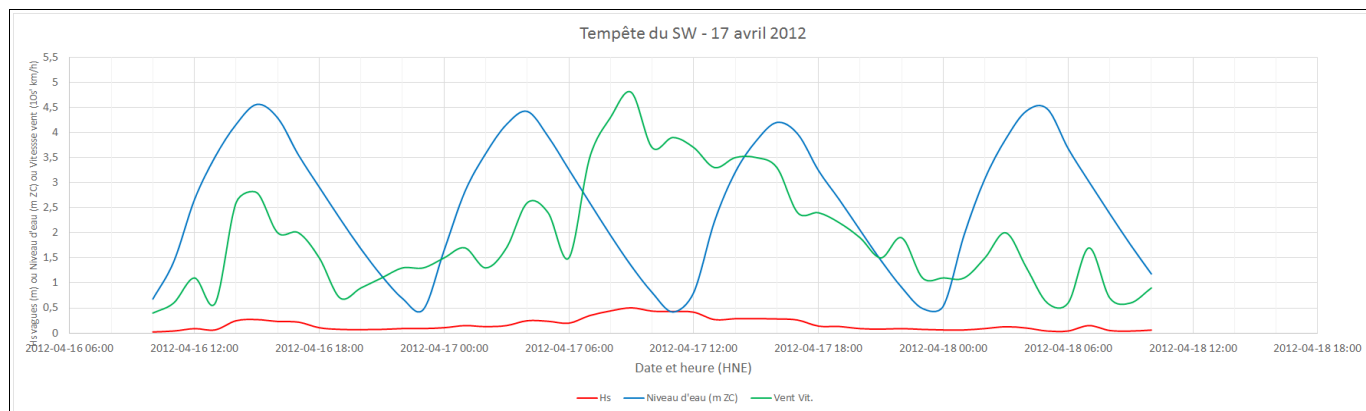


Figure B10 Tempête du secteur Ouest-Sud-Ouest du 17 avril 2012

ANNEXE C

Transects de la plage de Beauport

Chaque figure présente une coupe de la plage au droit des 18 transects de la figure 6.3.

Sur les figures apparaissent le relevé de 2009 (ligne continue bleue), le relevé de 2013 (ligne continue rouge), la coupe théorique d'un plage ayant le diamètre caractéristique D50 annoncé dans la légende, les niveaux d'eau correspondant à l'extrême actuel (+6,94 m ZC) et à l'extrême futur (+7,31 m ZC).



Figure C1 Transect T01

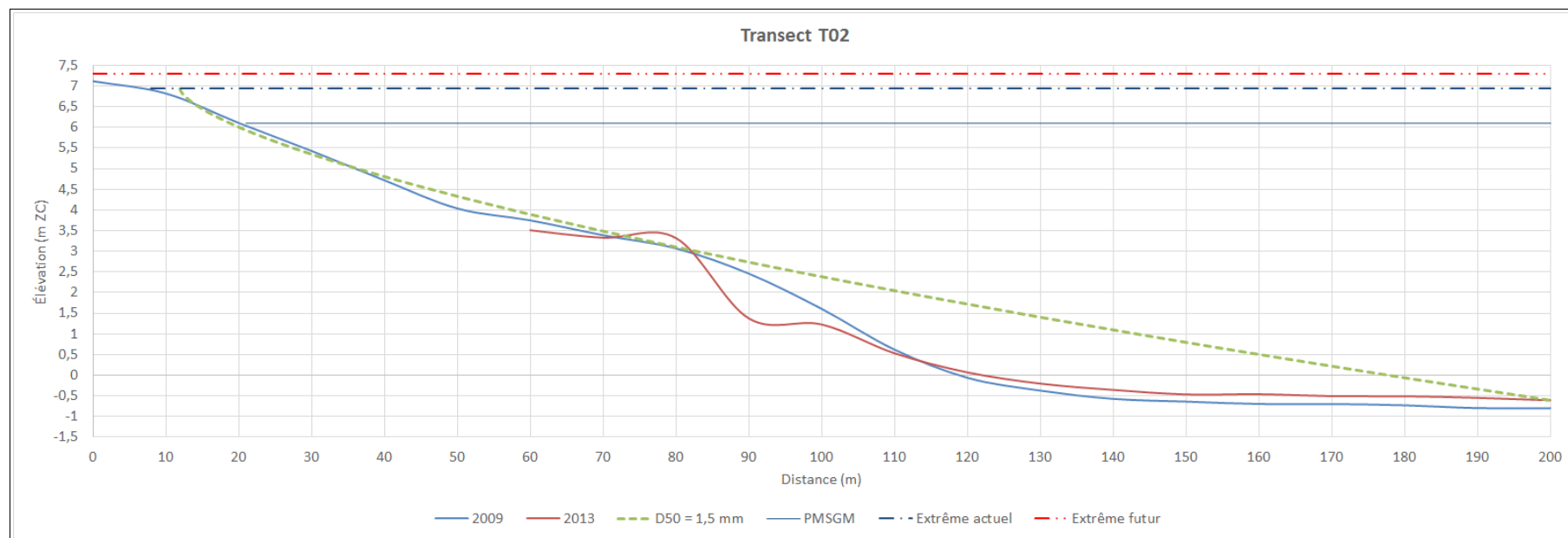


Figure C2 Transect T02

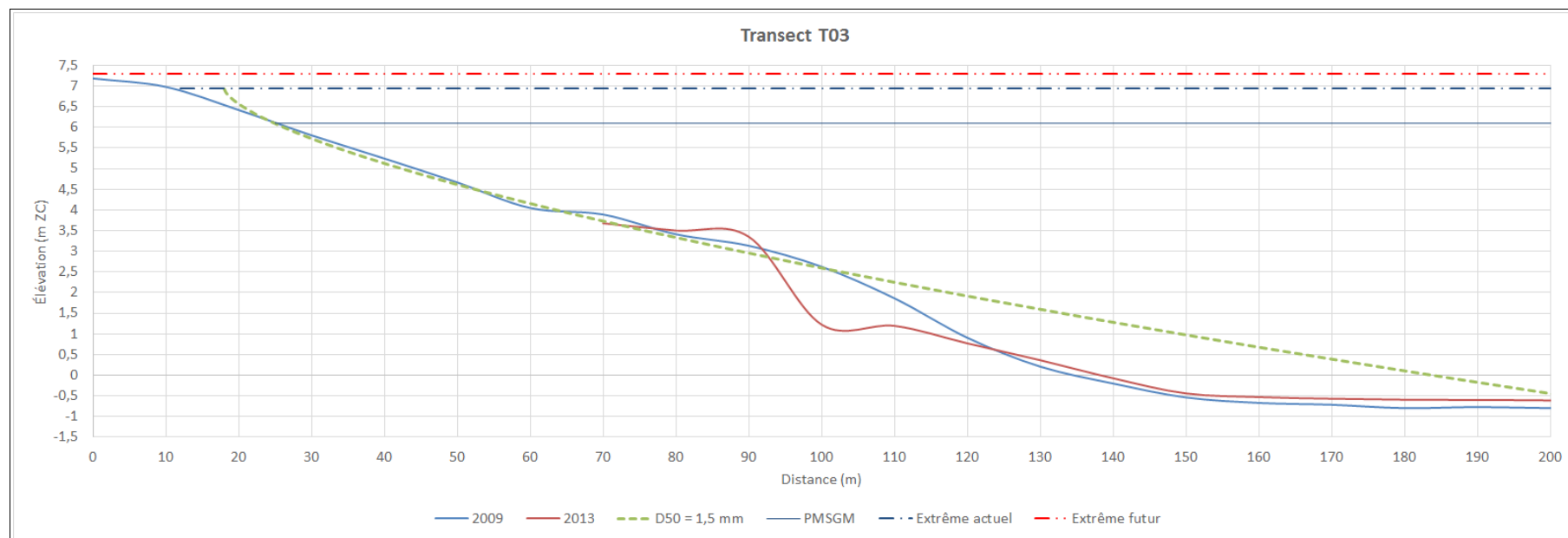


Figure C3 Transect T03

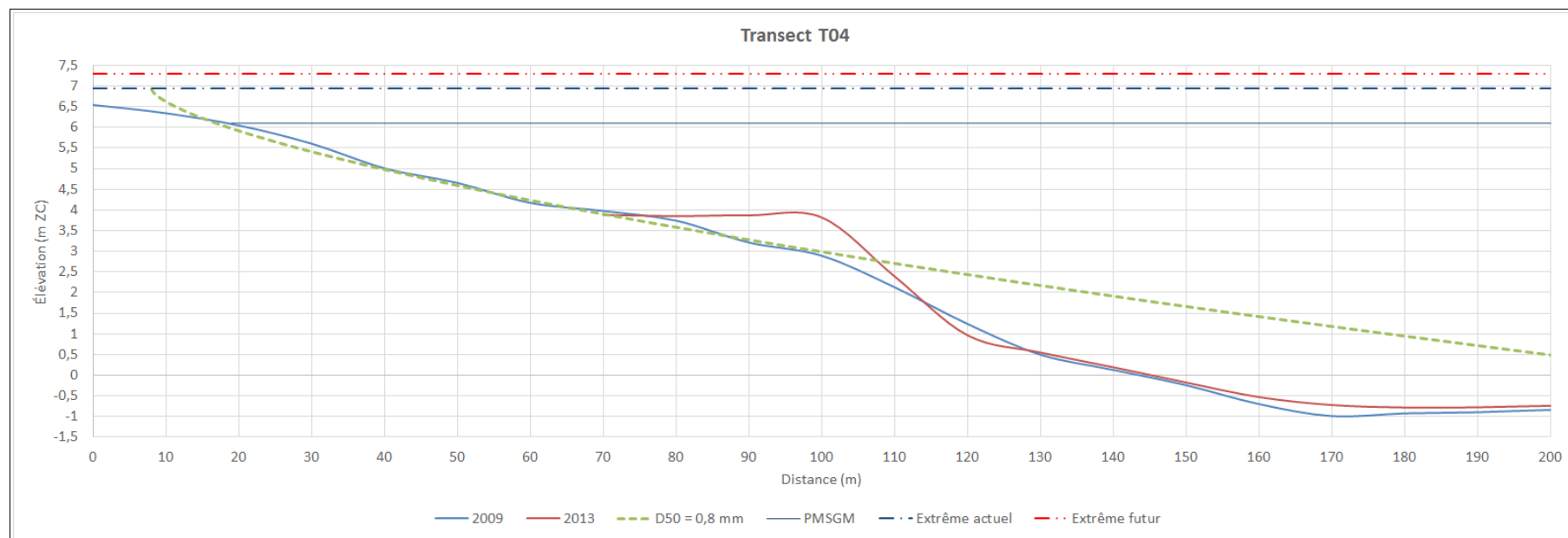


Figure C4 Transect T04

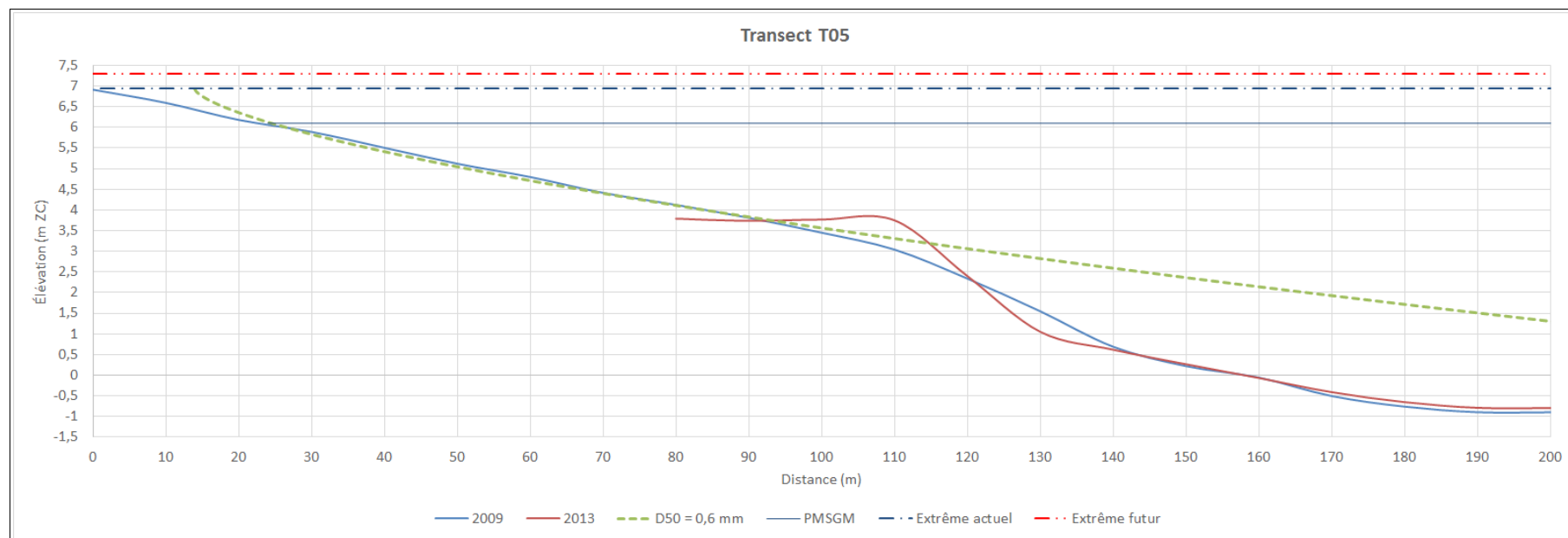


Figure C5 Transect T05

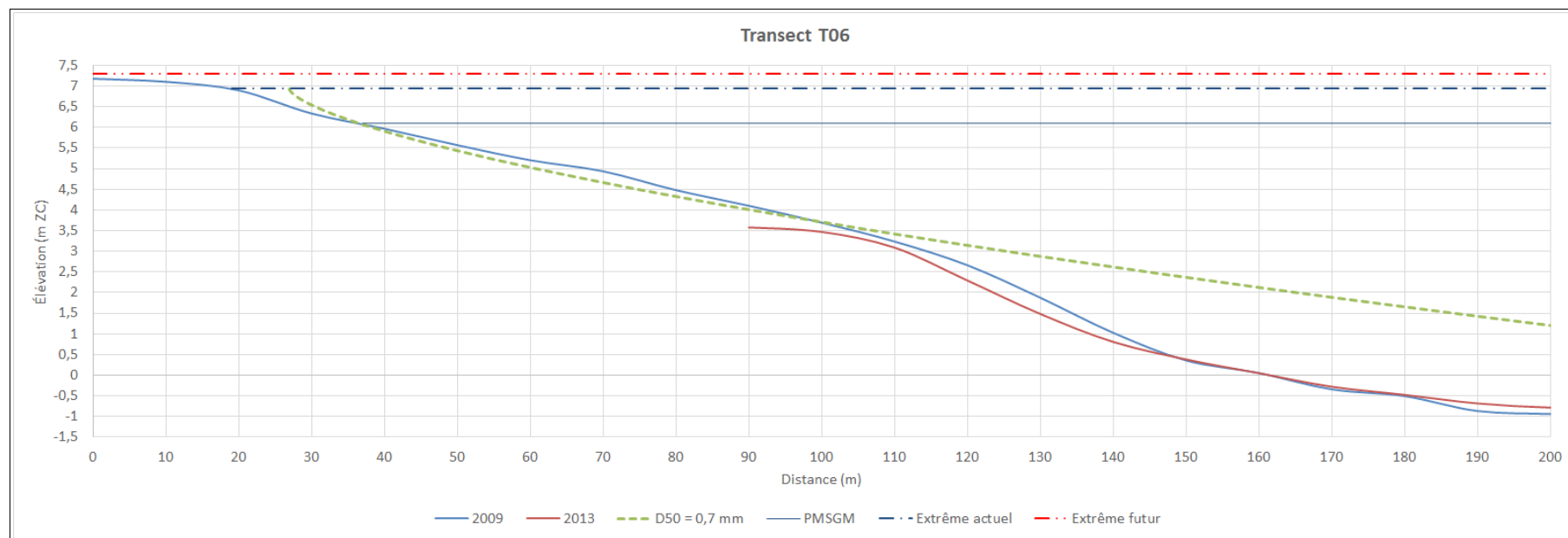


Figure C6 Transect T06

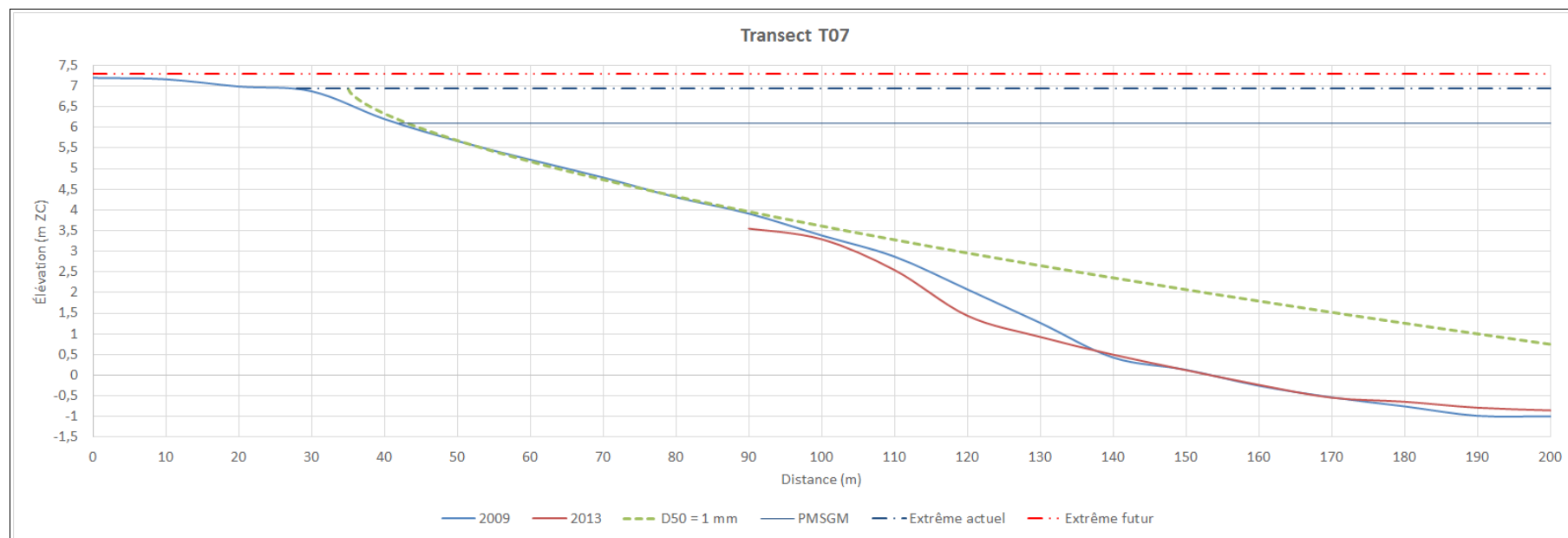


Figure C7 Transect T07

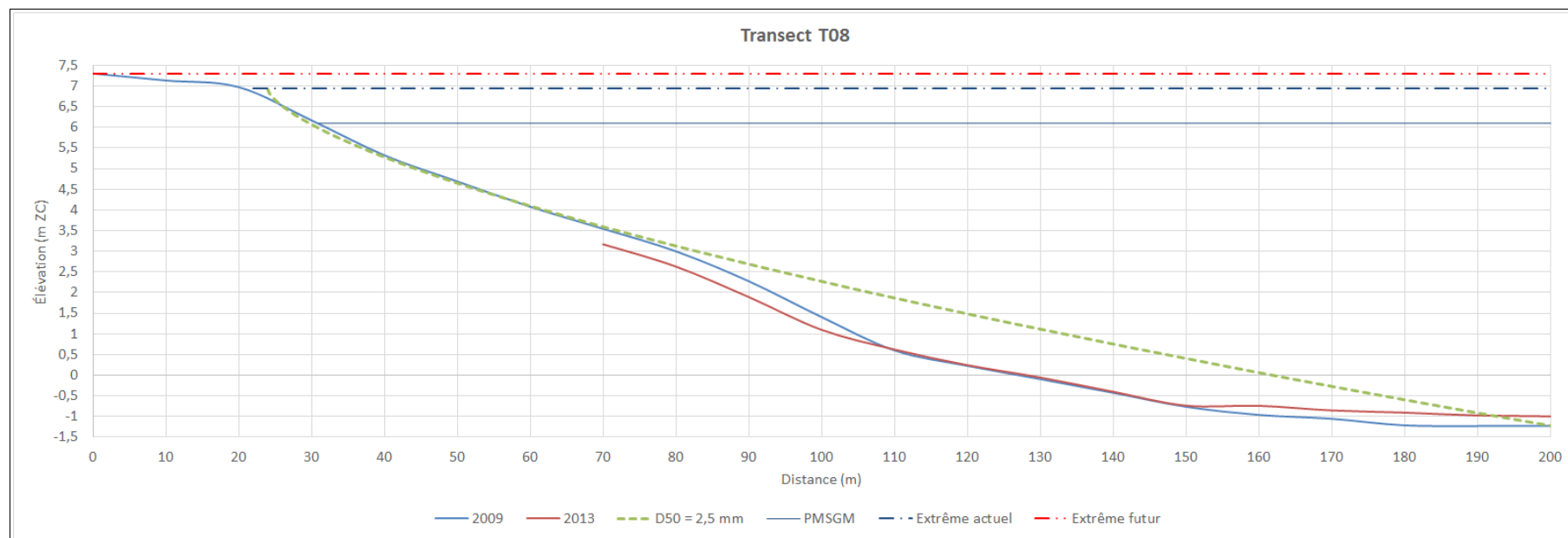


Figure C8 Transect T08

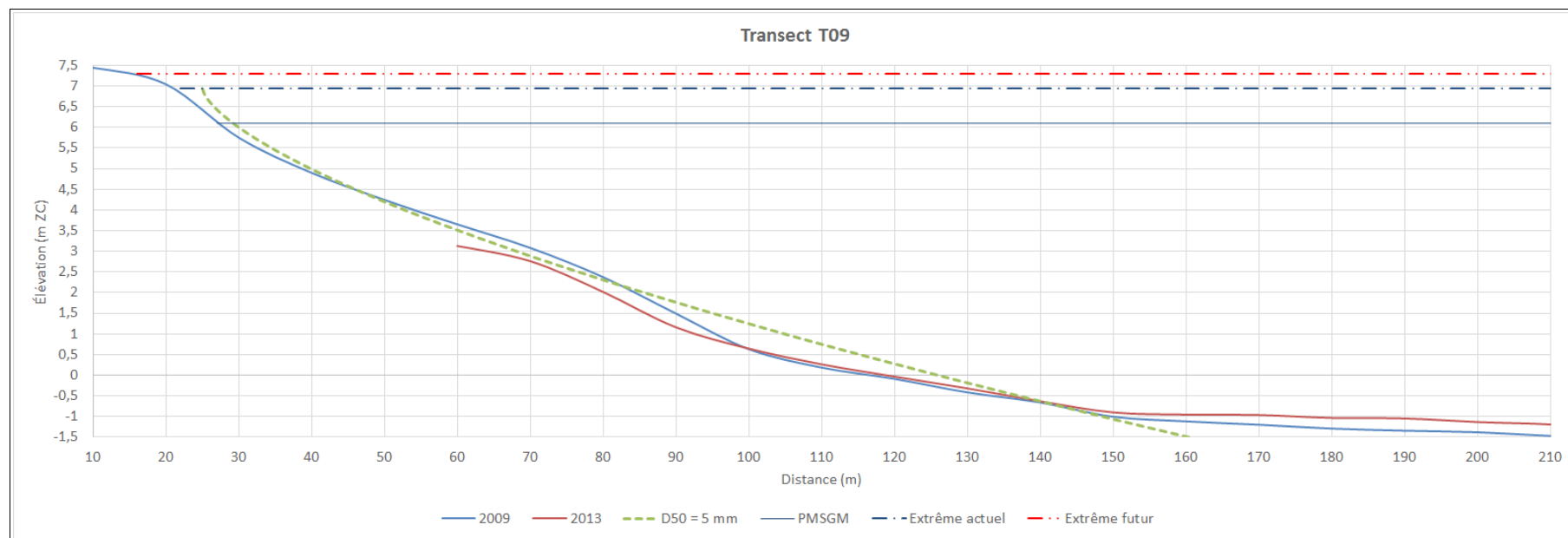


Figure C9 Transect T09

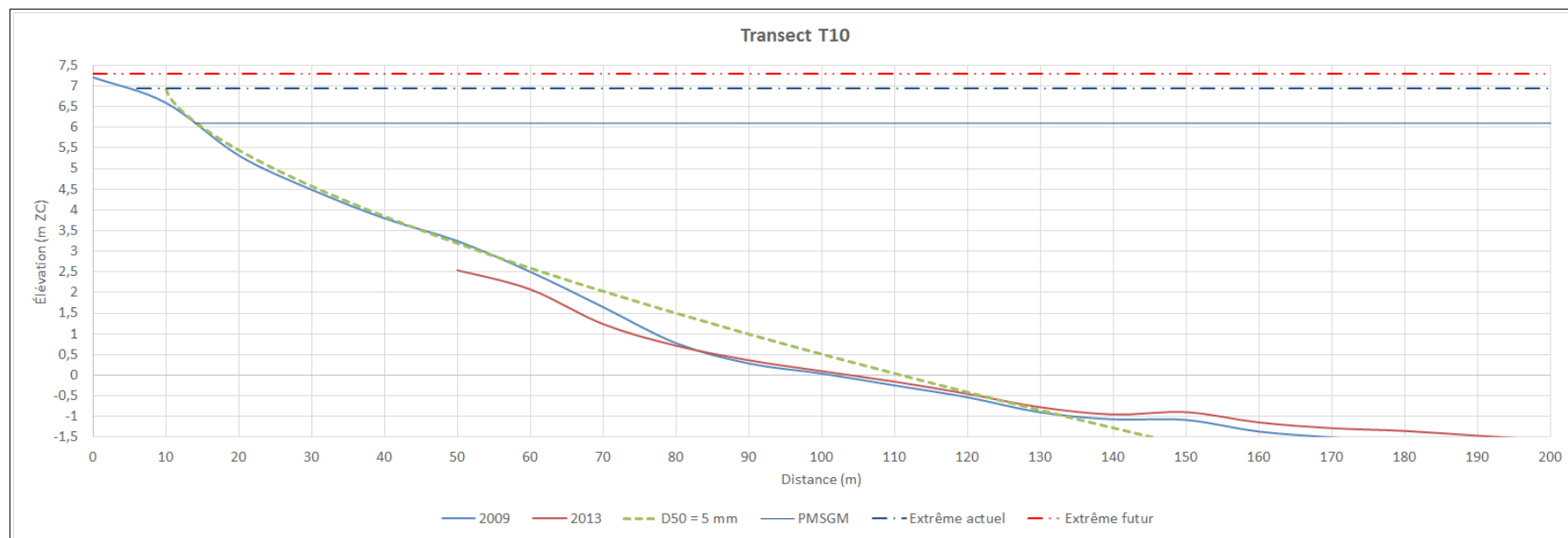


Figure C10 Transect T10

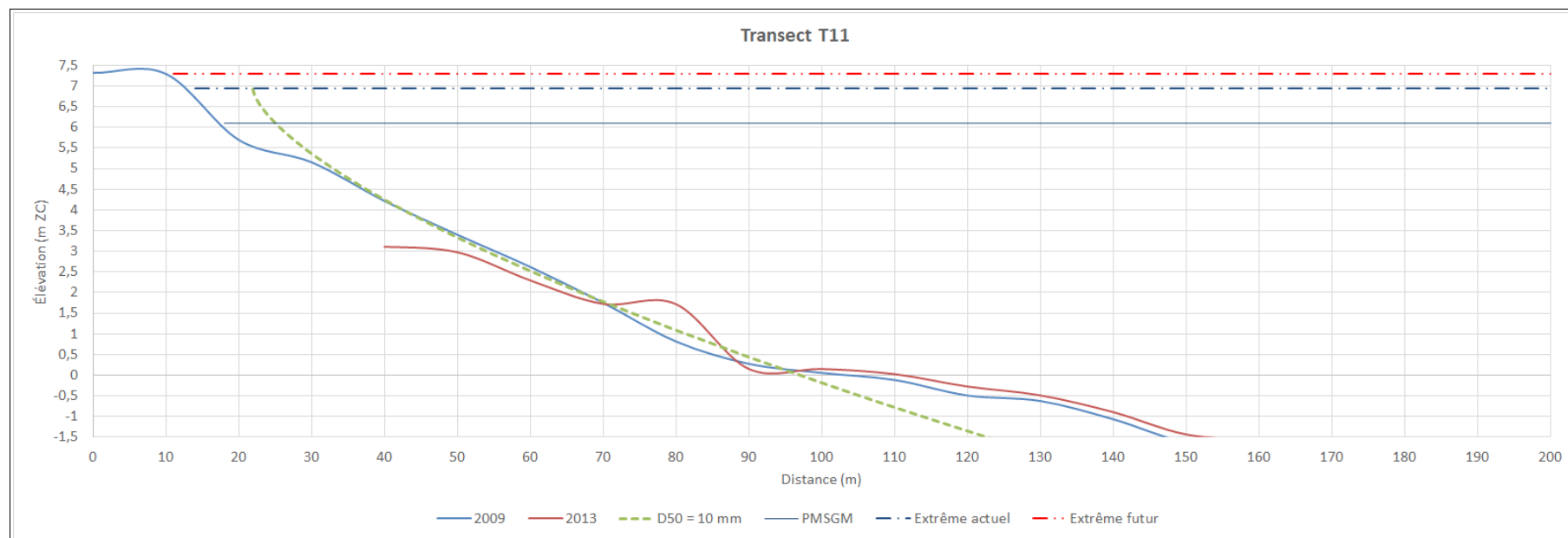


Figure C11 Transect T11



Figure C12 Transect T12

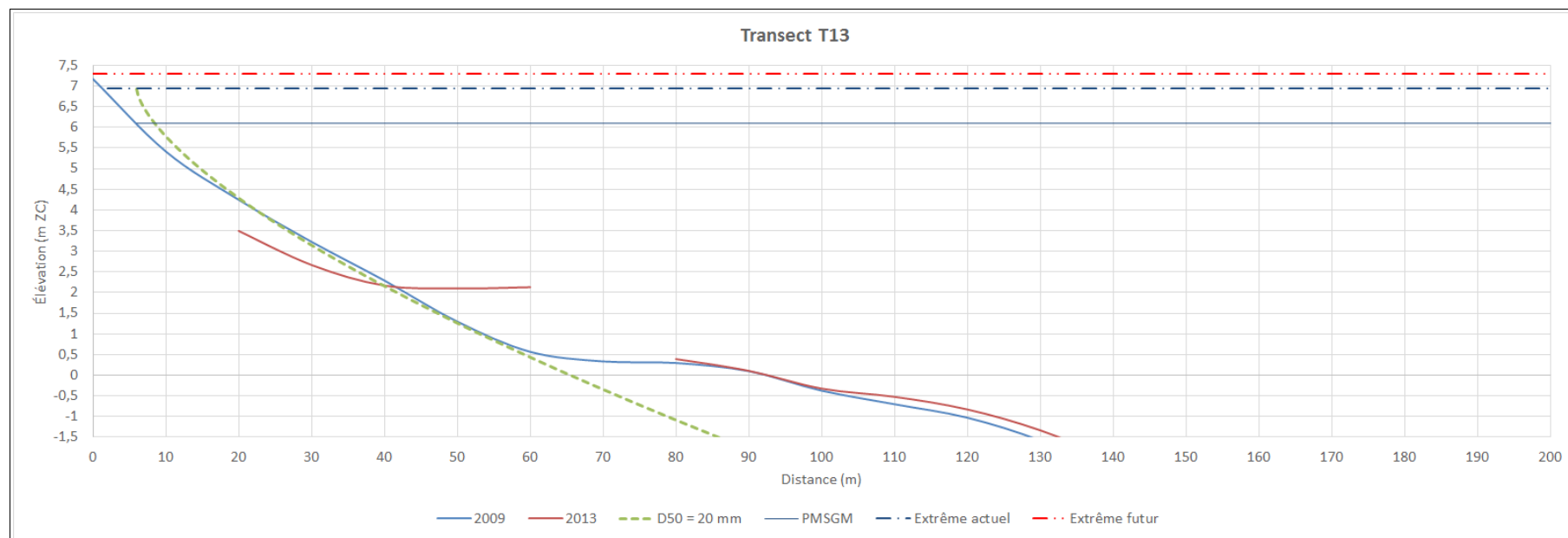


Figure C13 Transect T13

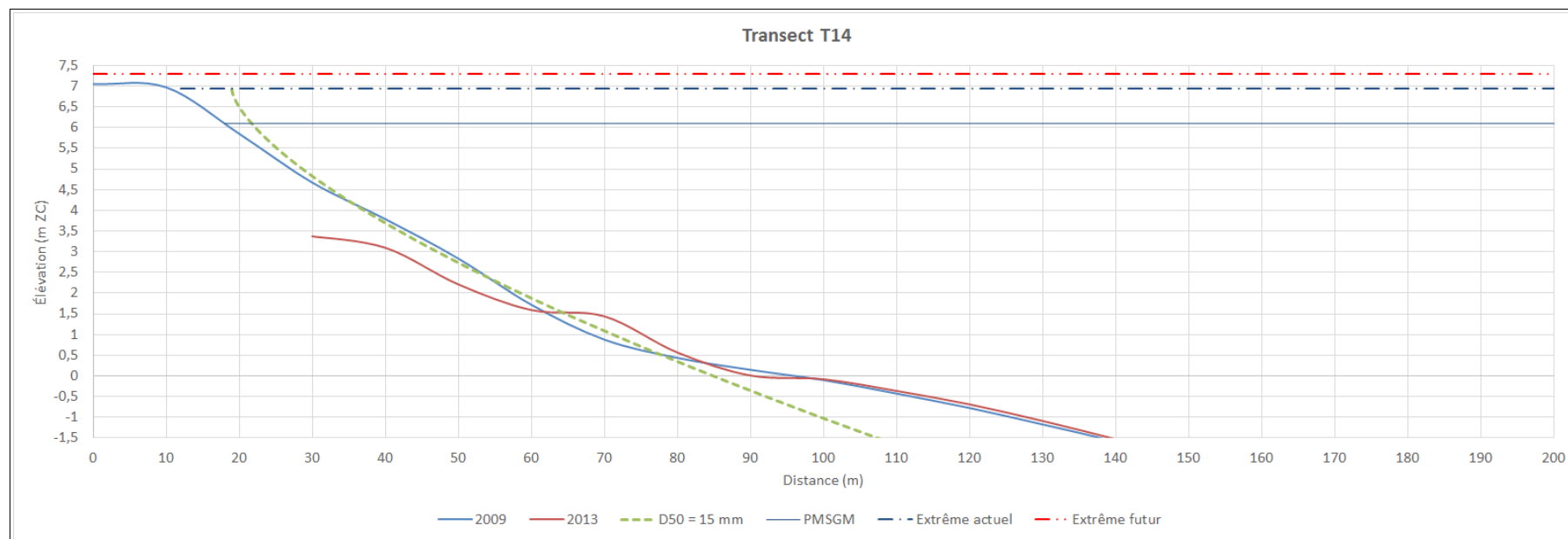


Figure C14 Transect T14

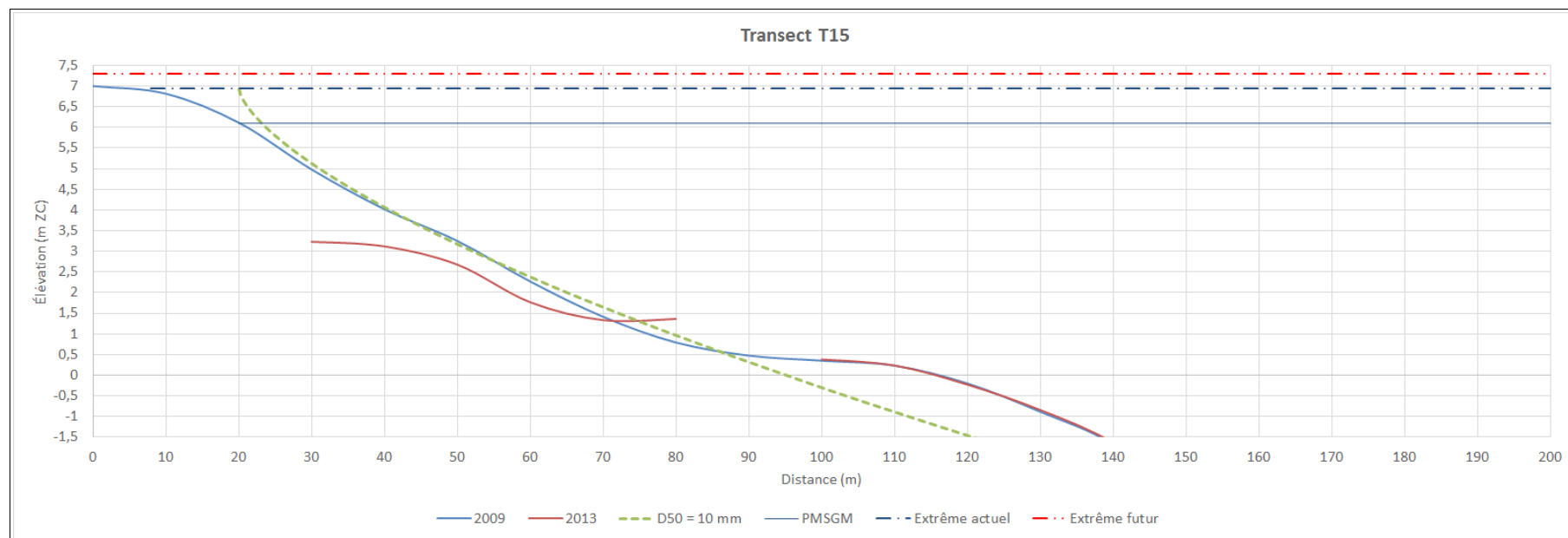


Figure C15 Transect T15

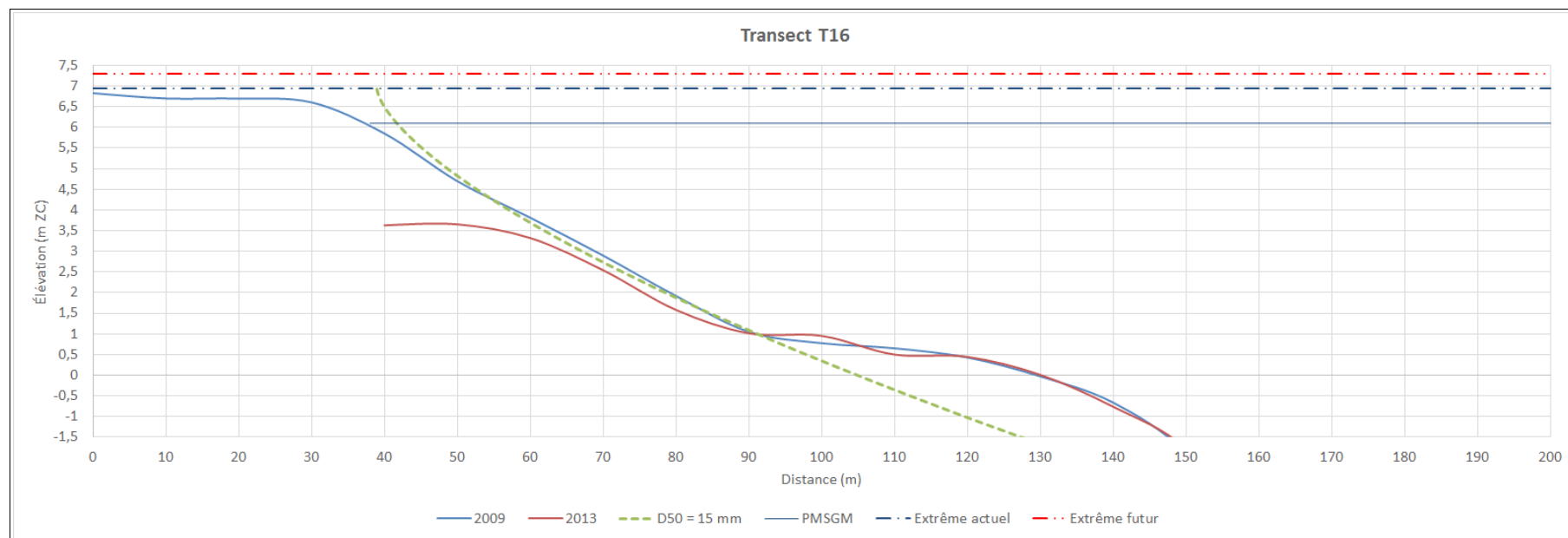


Figure C16 Transect T16

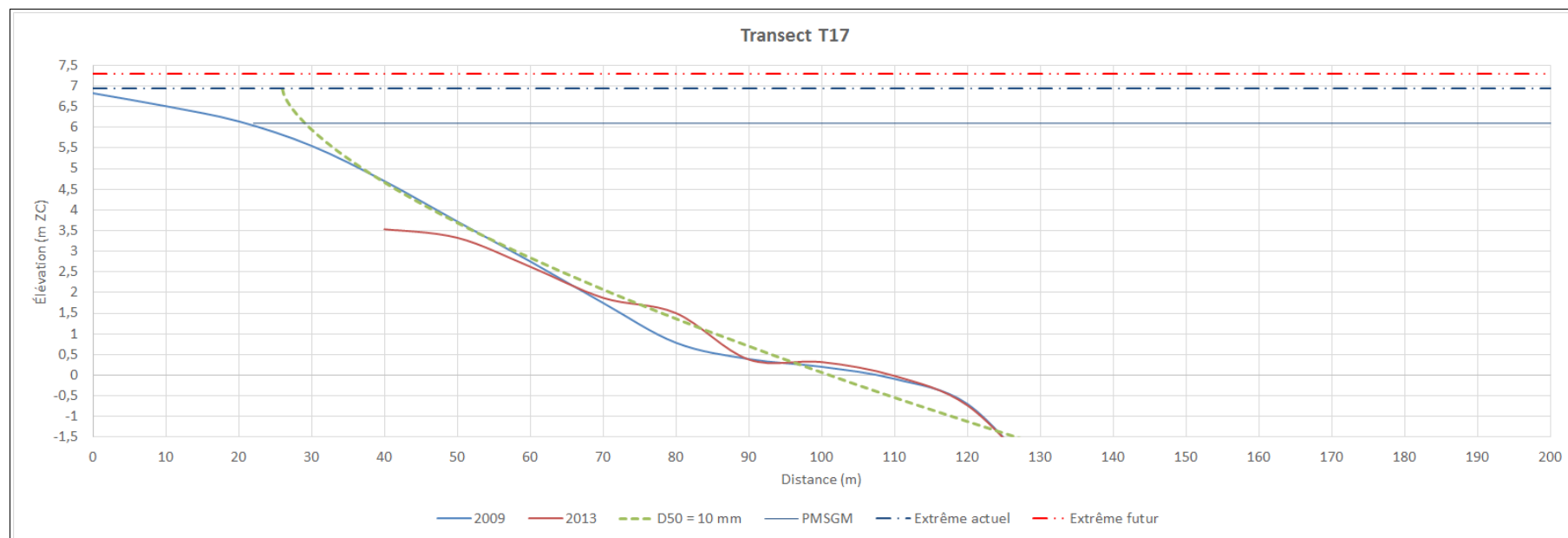


Figure C17 Transect T17

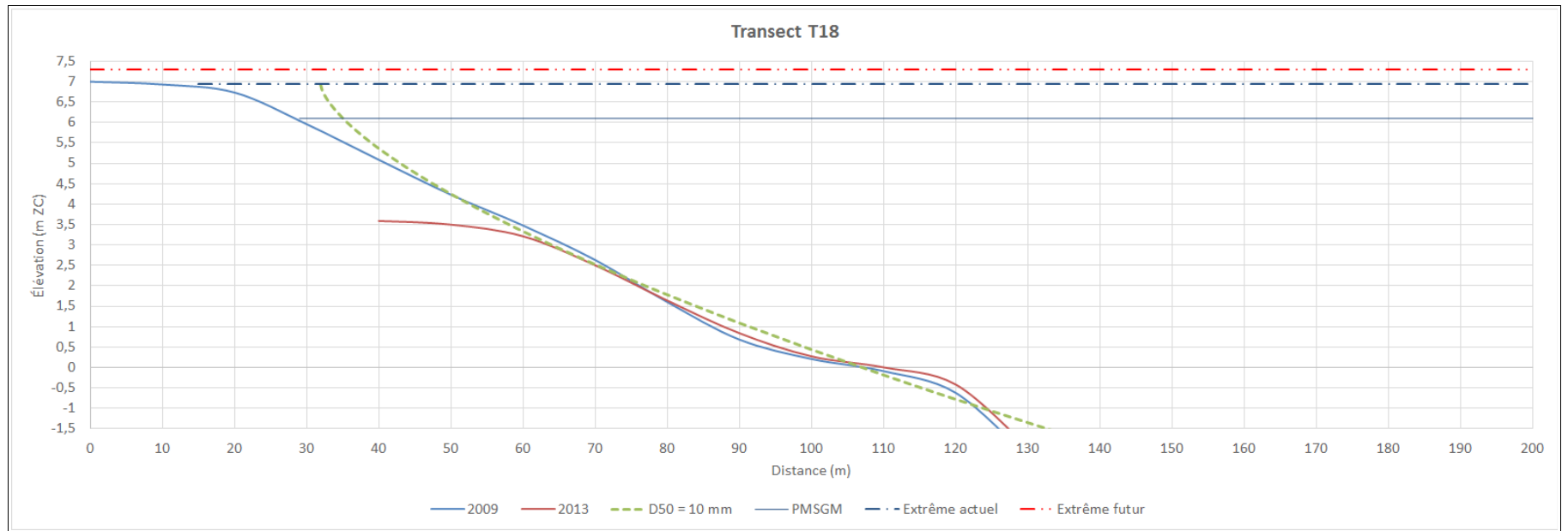


Figure C18 Transect T18