

Évolution du profil d'une recharge de gravier sous des conditions de vagues de tempête : une expérience à grande échelle réalisée en canal hydraulique



**Rapport préparé pour le
Ministère de la sécurité publique du Québec**

Contrat : CPS_13-14-02



**Centre Eau, terre et
environnement**

**Institut national de la recherche
scientifique**

30 mars 2016

Les personnes suivantes ont collaboré à l'analyse des données et/ou à la rédaction du rapport :

- Corinne Bourgault-Brunelle, étudiante au Ph.D.
- Jannette Frandsen, titulaire de la Chaire en ingénierie côtière et fluviale
- Olivier Gauvin-Tremblay, assistant de recherche
- Yves Gratton, professeur
- Bernard Long, professeur honoraire
- Dominique St-Hilaire-Gravel, stagiaire postdoctoral
- Régis Xhardé, associé de recherche

Les personnes suivantes ont participé à la préparation des expériences en canal et à la cueillette des données :

- Corinne Bourgault-Brunelle, étudiante au Ph.D.
- Francis Bérubé, technicien
- Louis-Frédéric Daigle, technicien
- Mathieu Des Roches, ingénieur
- Gino Fontaine, technicien
- Jannette Frandsen, titulaire de la Chaire en ingénierie côtière et fluviale
- Olivier Gauvin-Tremblay, assistant de recherche
- Thibault Labarre, assistant de recherche
- Louis-François Ringuet, technicien
- Caroline Sévigny, stagiaire postdoctoral
- Régis Xhardé, associé de recherche

© 2016, Institut national de la recherche scientifique (INRS)

Le rapport doit être cité comme suit.

Frandsen, J. B., D. St-Hilaire-Gravel, R. Xhardé, O. Gauvin-Tremblay et C. Bourgault-Brunelle, 2016. Évolution du profil d'une recharge de gravier sous des conditions de vagues de tempête : une expérience à grande échelle réalisée en canal hydraulique. Rapport No R1671, INRS-ETE, Québec (QC): xiii + 120 p.

RÉSUMÉ

Les côtes de l'estuaire et du golfe du St-Laurent accusent une tendance nette à l'érosion avec des taux de recul annuels moyens du trait de côte de l'ordre de 0,5 à 2 m an⁻¹ en plusieurs endroits. Chaque année, des infrastructures côtières se trouvent en situation d'urgence dans ces secteurs, car des portions importantes du littoral sont emportées par la mer au préjudice de la communauté. La recharge de plage offre une méthode de protection côtière dite «douce» pouvant servir à stabiliser les côtes en érosion.

Quoique gagnant rapidement en popularité, notamment en Angleterre et sur la côte ouest des États-Unis, l'utilisation de gravier à des fins de recharge de plage est très peu étudiée. Pourtant, la texture rugueuse et la grande perméabilité du gravier ont un effet dissipatif très efficace et avantageux dans un contexte de protection côtière. De plus, de nombreuses études géomorphologiques de terrain attestent du fort niveau de résilience des plages naturelles de gravier face aux tempêtes et aux niveaux d'eau extrêmes. Vu le grand potentiel qu'offre l'utilisation du gravier à des fins de protection côtière, il devient nécessaire d'explorer le comportement, le potentiel et les limites de cette méthode de protection côtière douce dans le contexte du Québec maritime laurentien.

Le présent rapport a pour but de présenter et de discuter les résultats d'un projet de recherche intitulé « *Modélisation en canal d'un profil de plage en vue d'un rechargement de plage* ». L'objectif principal de ce projet est de déterminer, en canal hydraulique, l'évolution des profils de plage d'un mélange spécifique de sable grossier et de gravier sous des conditions de vagues de tempête.

Il est conclu que le concept de pente d'équilibre tel que calculé avec l'équation de Dean offre une bonne corrélation avec l'aspect général des profils de plage mesurés en canal à condition d'ajuster manuellement le point initial de la pente calculée avec la limite extérieure du sommet de la berme. Aussi, les expériences en canal indiquent que la pente initiale de la recharge contrôle 1) la dynamique érosive ou de progradation du trait de côte au cours des événements de tempête suivant la mise en place de la recharge et 2) la rapidité à laquelle la recharge atteint un profil d'équilibre.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	III
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES TABLEAUX	XII
1. INTRODUCTION	1
2. PROJET DE RECHERCHE	5
2.1 Mise en contexte	5
2.2 Site à l'étude – Plage de l'Anse-aux-Coques	6
2.2.1 Granulométrie et stratigraphie du site avant recharge	8
2.2.2 Granulométrie et géométrie de la recharge	12
2.2.3 Conditions hydrodynamiques au site à l'étude	14
3. MÉTHODOLOGIE	21
3.1 Matériel et méthodes	21
3.1.1 Mesure des vagues de surface	24
3.1.2 Mesure des courants	26
3.1.3 Matière en suspension	28
3.1.4 Mesure de la géomorphologie de la plage	29
3.1.5 Mesure de la granulométrie de la plage	30
3.2 Choix des paramètres du modèle physique testé en canal hydraulique	31

3.2.1	Description des expériences réalisées	31
3.2.2	Vagues en canal	33
3.2.3	Marnage et niveaux d'eau en canal	35
3.2.4	Courants en canal	36
3.2.5	Granulométrie et géométrie de la plage en canal	37
4.	RÉSULTATS ET DISCUSSION	42
4.1	Pentes d'équilibre	42
4.1.1	Expérience 1	42
4.1.2	Expérience 2	46
4.1.3	Expérience 3	49
4.1.4	Expériences 4 à 6	52
4.2	Hydrodynamique	53
4.3	Transport sédimentaire	56
4.3.1	Charriage	56
4.3.2	Matière en suspension	59
4.4	Granulométrie	60
4.5	Réfectivité	64
5.	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	70
5.1	Recommandations	72
5.2	Travaux futurs	73
	BIBLIOGRAPHIE	74
	ANNEXE A	85
	ANNEXE B	103
	ANNEXE C	109

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation géographique du site à l'étude de l'Anse-aux-Coques dans la MRC de Sainte-Luce et emplacement des sondes de pression RBR enterrées (vert et rouge) et de l'ADP (bleu) à 80 cm du fond.....	7
Figure 2. La plage de l'Anse-aux-Coques à Sainte-Luce dans les années 1920 montrant une large plage de sable et un talus d'arrière-plage végétalisé (en haut) et montrant la prédominance des murs de protection côtière et la morphologie de la plage juste avant la recharge (bas, photo Ministère de la sécurité publique).....	8
Figure 3. Profil stratigraphique idéalisé de la plage de l'Anse-aux-Coques.....	10
Figure 4. Coupe stratigraphique au centre de l'avant-plage montrant les 3 unités stratigraphiques composant la plage de l'Anse-aux-Coques.	11
Figure 5. Carottes sédimentaires prélevées au centre de l'avant-plage.	12
Figure 6. Localisation et étendue de la recharge de plage recommandée par Ropars (2013). ..	13
Figure 7. Distribution de la granulométrie recommandée (courbes rouge et verte) et de la granulométrie existante dans des bancs de graviers à proximité de la plage de l'Anse-aux-Coques (fig. 6.12 de Ropars, 2013).	14
Figure 8. Surcotes annuelles maximales à marée haute et décotes annuelles maximales à marée basse pour Rimouski entre 1964 et 2010 (Fig. 15, p. 21 de GENIVAR, 2012).	17
Figure 9. Zone de déferlement à niveau d'eau élevé (3,0 m-NMM) (gauche) et à niveau d'eau moyen (0,0 m-NMM) (droite) pour des vagues de récurrence 50 ans en provenance du NE. Les zones en rouge indiquent des vagues qui déferlent (figures 32 et 33 de GENIVAR, 2012).	18
Figure 10. Montage expérimental et disposition des instruments de mesure dans le canal hydraulique.....	23

Figure 11. Vue longitudinale du canal hydraulique montrant un exemple de vague déferlant sur la plage de gravier en canal.	26
Figure 12. Position des appareils à la station 10 (avant-plan) et à la station 9, où deux des deux Aquadopp sont déployés à l'horizontale et mesure les profils verticaux de courant	28
Figure 13. Analyse spectrale du signal généré par le batteur.	34
Figure 14. Analyse spectrale du signal mesuré sur le terrain au bas de la plage.	35
Figure 15. Grandeur de la vitesse de courant dans le plan horizontal (x,y) du canal.....	37
Figure 16. Grandeur de la vitesse de courant dans le plan horizontal (x,y) sur le terrain de Sainte-Luce.	37
Figure 17. Granulométries discutées dans ce rapport incluant le fuseau granulométrique idéal recommandé par Ropars (2013) (courbes rouges), la distribution granulométrique de la recharge utilisée sur la plage de l'Anse-aux-Coques incluant les 9 échantillons prélevés par Yann Ropars entre le 6 et le 15 novembre 2014 (courbes grises) et la moyenne de ces 9 échantillons (courbe noire) et la distribution granulométrique de la recharge utilisée en canal (courbe bleue).....	39
Figure 18. Profil de plage typique de Sainte-Luce et géométrie du rechargement projeté.	40
Figure 19. Profil initial et final (après 16h00 de vagues) de la plage pour l'Exp-1.....	43
Figure 20. Profil initial et final (après 16h00 de vagues) de la plage pour la simulation numérique XBeach-G avec les paramètres intrants de l'Exp-1.....	46
Figure 21. Profil initial et final (après 14h00 de vagues) de la plage pour l'Exp-2.....	47
Figure 22. Profil initial et final (après 14h00 de vagues) de la plage pour la simulation numérique XBeach-G avec les paramètres intrants de l'Exp-2.....	48
Figure 23. Évolution du profil de plage lors de l'Exp-3.	49
Figure 24. Diagramme des conditions critiques d'érosion, de transport et de déposition des sédiments en milieu marin (Figure 1 dans McCave, 1984).	51
Figure 25. Profil initial et final (après 6h00 de vagues) de l'Exp-4.	52

Figure 26. Profil initial et final de l'Exp-5.	53
Figure 27. Profil initial et final de l'Exp-6.	53
Figure 28. Exp-1 – Évolution de la hauteur significative des vagues dans la zone de déferlement, au point de déformation maximal de la plage (x=25 m).....	54
Figure 29. Exp-2 – Évolution de la hauteur significative des vagues au milieu de la zone de déferlement (x=27 m) et variation du niveau d'eau dans le canal.	56
Figure 30. Vitesse maximale moyenne des courants en canal pour l'Exp-2 à la station 8 (au bas de l'avant-plage) et à la station 10 (près de la zone de déferlement, voir figure 10 pour plus de détail sur l'emplacement des sondes).	58
Figure 31. Concentration de la matière en suspension (en g L ⁻¹) à marée haute mesurée par les OBS3+ pour l'expérience 2.....	60
Figure 32. Relation entre la conductivité hydraulique, le D ₅₀ et le tri granulométrique pour le gravier.....	64
Figure A1. Principales composantes géologiques et géomorphologiques de l'Anse aux Coques, Sainte-Luce-sur-mer (d'après GENIVAR, 2012).	86
Figure A2. Vue générale de la plage de Ste-Luce-sur-mer.	87
Figure A3. Localisation des deux profils topographiques relevés par station laser et identification des huit trous de sondage réalisés sur la plage de Sainte-Luce.	88
Figure A4. Localisation des six carottes sédimentaires prélevées sur la plage de Sainte-Luce.	89
Figure A5. Localisation des treize échantillons sédimentaires de surface prélevés sur la plage de Sainte-Luce.	90
Figure A6. Profil de plage réalisé par topographie laser sur la plage de Sainte-Luce-sur-mer et stratigraphie observée.	92
Figure A7. Exemple de dépôts sableux riches en matières organiques (à gauche) et de sédiments fins (argiles de Goldthwait) remaniés par les courants sur le bas estran de la plage de Sainte-Luce.....	92

Figure A8. Types de sédiments observés sur la plage de Sainte-Luce-sur-mer.....	93
Figure A9. Carottes prélevées au pied du mur (station #1).....	95
Figure A10. Logs des carottes de surface et de sédiments de Goldthwait à la station 5.	96
Figure A11. Logs des carottes de sable et de sédiments de Goldthwait à la station 6.	97
Figure A12. Répartition spatiale des moyennes granulométriques des échantillons de surface.	98
Figure C1. Emplacement des sondes de pression RBR enterrées (rouge) et de l'ADP (bleu) sur la plage de l'Anse aux Coques, Sainte-Luce, Québec (source : Corinne. Brunelle- Bourgault).....	110
Figure C2. Identification et localisation des sondes de pression RBR enterrées (rouge) et de l'ADP (bleu) sur la plage de l'Anse aux Coques, Sainte-Luce, Québec.	110

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Niveaux d'eau à Sainte-Luce (Données du SHC pour Pointe-au-Père).....	15
Tableau 2. Périodes de retour des niveaux d'eau à Sainte-Luce (Ropars, 2013).....	16
Tableau 3. Relation entre les niveaux d'eau et les hauteurs de vagues à Sainte-Luce pour différentes périodes de retour des événements combinés (d'après Matane) (Tableau 5.2 de Ropars, 2013).....	19
Tableau 4. Dates des sorties et des tâches effectuées pour le déploiement d'appareils sur le terrain de l'Anse-aux-Coques.	20
Tableau 5. Spécifications techniques des instruments utilisés pour mesurer l'hydrodynamique littorale et l'interaction vague-sédiment.	22
Tableau 6. Voltage mesuré par les OBS3+ à l'aide du câble correspondant à de faibles valeurs..	29
Tableau 7. Valeurs des paramètres initiaux des 6 expériences réalisées en canal en 2014 incluant la pente initiale, la longueur du haut de plage, l'élévation du niveau d'eau en canal et la hauteur significative des vagues.....	32
Tableau 8. Paramètres du modèle physique en canal et comparaison avec la recharge de plage de l'Anse-aux-Coques telle que proposée et réalisée.	33
Tableau 9. Classification granulométrique utilisée (d'après Wentworth (1924) et modifié par Ingram (1982)).....	62
Tableau 10. Coefficient de réflexion de différents ouvrages maritimes pour des paramètres de vagues incidentes similaires calculé en grand canal hydraulique entre 2012 et 2014.	67
Tableau 11. Coefficients de réflexion théorique de la plage modélisée en canal pour différentes amplitudes et périodes de vagues.	69
Tableau A1. Position des échantillons de surface.....	89
Tableau A2. Analyse granulométrique des 13 échantillons de surface.....	99

Tableau A3. Synthèse de l'analyse granulométrique de la carotte C#1.....	100
Tableau A4. Synthèse de l'analyse granulométrique de la carotte C#1A..	100
Tableau A5. Synthèse de l'analyse granulométrique de la carotte C#5.....	101
Tableau A6. Synthèse de l'analyse granulométrique de la carotte C#5A..	101
Tableau A7. Synthèse de l'analyse granulométrique de la carotte C#6.....	102
Tableau A8. Synthèse de l'analyse granulométrique de la carotte C#6A.	102
Tableau C1. Position des capteurs RBR à l'Anse aux coques: système de coordonnées MTM6.111	

1. Introduction

Les côtes de l'estuaire et du golfe du St-Laurent accusent une tendance nette à l'érosion avec des taux de recul annuels moyens du trait de côte de l'ordre de 0,5 à 2 m an⁻¹ en plusieurs endroits. Cette tendance érosive s'est par ailleurs accélérée depuis les années 1990 (Bernatchez & Dubois, 2004). Les problèmes liés à l'érosion côtière sont particulièrement marqués le long de la Côte-Nord, où la majorité des falaises entaillées dans les formations meubles des anciens deltas holocènes sont affectées par l'érosion et présentent des taux de recul annuels moyens de 0,5 à 4 m an⁻¹ (Bernatchez & Dubois, 2004). L'érosion côtière est également importante le long de la péninsule gaspésienne en raison de la nature fragile des roches qui composent les falaises ainsi que du climat rigoureux (Daigneault, 2001). Des taux de reculs pouvant localement atteindre 1 à 2 m an⁻¹ ont été observés le long de certaines portions de littoral du sud de la péninsule gaspésienne (Long, 2006; Long & Xhardé, 2009), certaines côtes basses pouvant même expérimenter des reculs annuels de l'ordre de 6 à 7 m an⁻¹ (Xhardé, Long, & Forbes, 2011). Quoique moins densément étudiée, l'érosion côtière dans l'estuaire du St-Laurent est bien présente, avec des taux de recul annuels dépassant les 3 m an⁻¹ en plusieurs endroits (e.g. Allard, 1981; Dionne, 1986) et des taux annuels moyens plus modestes de 0,25 à 0,5 m an⁻¹ (Dionne, 1999).

Chaque année, des infrastructures se trouvent en situation d'urgence dans ces secteurs, car des portions importantes du littoral sont emportées par la mer au préjudice de la communauté. L'activité économique de ces régions est souvent fortement liée à l'industrie du tourisme et se retrouve ainsi menacée, certains lieux touristiques fréquentés pouvant se voir interdits en raison des dangers de mouvements sédimentaires et de glissements des falaises (Plante, Chouinard, & Bernatchez, 2007). Aussi, les seuls liens routiers d'importance nationale qui desservent ces régions longent la côte (routes 132 et 138). Ces infrastructures routières sont de ce fait particulièrement exposées à l'érosion côtière et ont déjà dû être renforcées ou même déplacées en certains endroits (Morneau, Michaud, Lecours, Côté, & Roy, 2001).

Ces interventions ciblées par des décrets pour des situations d'urgence laissent souvent peu de place à la recherche de solutions adaptées au milieu côtier. En agissant localement, sans considérer le système global, il y a un risque de causer plus de dommages qu'en laissant

la nature agir. À titre d'exemple, une analyse historique exhaustive des plages de la région de Sept-Îles a démontré que les événements érosifs sur les plages naturelles (non modifiées) sont toujours suivis par une phase d'accumulation importante résultant en un budget sédimentaire positif à moyen terme (Bernatchez et Fraser, 2012). À l'opposé, la présence d'infrastructures de protection côtière sur les plages de sédiments meubles, et plus particulièrement les infrastructures verticales positionnées parallèlement à la plage, cause une réduction marquée de la largeur de la plage ainsi qu'un abaissement du haut de plage. Ce phénomène n'est ni récent, ni unique au Québec (Pilkey & Wright, 1988). Bernatchez et Fraser (2012) concluent que, pour la région de Sept-Îles, les structures rigides de protection côtière causent l'érosion des plages et empêchent les processus naturels de progradation. Les interventions locales peuvent ainsi aggraver la situation en modifiant la dynamique hydro-sédimentaire du système côtier.

Au Québec maritime laurentien, les murs de protection sont couramment employés afin de stabiliser les littoraux adjacents aux espaces construits. À elle seule, la direction Bas-Saint-Laurent-Gaspésie Îles-de-la-Madeleine du Ministère des Transports du Québec est responsable de plus de 53 km de route protégée par des murs et 50 km de route protégée par des enrochements (Jonathan St-Laurent, comm. pers. 2016) estimé à un coût moyen de 3 500 000\$ par km linéaire (estimé de 2001 pour des murs de bois ou de béton armé de 4 à 6 mètres de hauteur) (Morneau, Michaud, Lecours, Côté, & Roy, 2001). Quoique ces ouvrages de protection soient relativement efficaces pour protéger les talus et les falaises, ils ont plusieurs effets environnementaux négatifs majeurs tels que la réduction ou l'arrêt de l'approvisionnement en sédiment du littoral à partir de la falaise ou des dunes situées sur l'arrière-plage ou encore une érosion accélérée au niveau des extrémités latérales de l'ouvrage de protection (effet de bout). Par ailleurs, la construction d'une structure rigide verticale tel un mur de protection ou un enrochement sur l'arrière-plage a pour effet d'introduire une dynamique hydro-sédimentaire fortement réfléchive lors d'évènements de hauts niveaux d'eau; l'énergie des vagues est réfléchiée sur la structure et repart vers le large en transportant les sédiments de l'avant-plage contribuant ainsi à la diminution de la hauteur et de la largeur du haut de plage à l'avant du mur et pouvant même mener à sa disparition complète et à l'affouillement du pied de l'ouvrage. L'érosion de l'avant-plage a aussi pour effet d'augmenter la profondeur d'eau potentielle lors de tempêtes subséquentes, augmentant ainsi l'énergie à la côte et les risques de submersions par franchissement (e.g. Bernatchez et al., 2008).

Vu les risques et les coûts associés à l'implantation et à l'entretien de murs de protection côtiers et leur présence importante sur les côtes du Québec maritime laurentien, il importe d'améliorer leur efficacité à contrer les risques associés à l'érosion et à la submersion côtières, ainsi que leur durée de vie utile. Il devient aussi intéressant d'explorer des méthodes de protection durable de la côte qui minimisent les effets négatifs des infrastructures rigides énumérés plus haut. C'est dans cette optique de gestion durable de la côte que la recharge de plage, une méthode de protection côtière dite «douce», a rapidement gagné en popularité auprès des ingénieurs côtiers et des décideurs depuis quelques décennies. Cette approche de la protection côtière consiste à réintroduire des sédiments sur la plage afin de contrer les pertes liées au transport sédimentaire et à l'érosion. Cette technique a été documentée et discutée par de nombreux auteurs et est à présent largement utilisée à travers le monde (Dean, 2002; Hamm et al., 2002; Hanson et al., 2002; Cooke et al., 2012). Quoique les coûts d'entretien soient souvent supérieurs dans le cas d'une recharge que dans le cas d'une infrastructure rigide, la recharge peut être économiquement avantageuse sur le long terme (e.g. Basco, 1998; Komar & Allan, 2000) en plus d'ajouter un aspect esthétique au paysage.

La très grande majorité des projets de recharge de plage dans le monde utilise du sable d'origine marine (Dean, 2002), les profils d'équilibre de plage rapportés dans la littérature sont donc majoritairement basés sur des mélanges de sable (Dean, 2002; Dette et al., 2002; Bernabeu et al., 2003) (voir Annexe A pour plus de détails sur le calcul des pentes d'équilibre). Quoique gagnant rapidement en popularité, notamment en Angleterre (Hanson et al., 2002) et sur la côte ouest des États-Unis (Shipman, 2001 Komar & Allan, 2010), l'utilisation de gravier à des fins de recharge de plage est très peu étudiée. La popularité grandissante de l'utilisation du gravier à des fins de recharge s'explique en partie par la texture rugueuse et la grande perméabilité du gravier qui ont un effet dissipatif très efficace et avantageux dans un contexte de protection côtière (Van Wellen et al., 2000). De plus, de nombreuses études géomorphologiques de terrain attestent du fort niveau de résilience des plages naturelles de gravier face aux tempêtes et aux niveaux d'eau extrêmes (e.g. Carter & Orford, 1984; Orford et al., 2003; St-Hilaire-Gravel et al., 2012). Les quelques expériences de terrain documentées combinant la recharge de gravier et les murs de protections témoignent d'une grande stabilité de la recharge, de la protection du pied du mur de protection et d'une diminution du franchissement des vagues en plus de la création d'une surface de plage pouvant servir à des fins récréotouristiques (Cammelli et al. 2004; Kumada et al., 2010).

En résumé, la réintroduction artificielle d'une quantité plus ou moins importante de sédiments grossiers en haut de plage (au pied du mur de protection) a pour effet de 1) diminuer la profondeur d'eau directement à l'avant du mur de protection lors d'évènements de hauts niveaux d'eau, 2) introduire une dynamique hydro-sédimentaire dissipative en haut de plage, 3) protéger le pied du mur de protection afin de diminuer les risques d'affouillement et ainsi prolonger la durée de vie utile du mur de protection, et 4) élargir le haut de plage et minimiser l'impact visuel du mur de protection, ce qui a pour effet d'améliorer l'esthétique du paysage et le potentiel d'utilisation à des fins récréotouristiques.

Vu le grand potentiel qu'offre l'utilisation du gravier à des fins de protection côtière, autant pour la recharge de plage qu'en combinaison avec l'utilisation d'infrastructures de protection côtière rigides, il devient nécessaire d'explorer le comportement, le potentiel et les limites de cette méthode de protection côtière douce dans le contexte du Québec maritime laurentien.

Le présent rapport a pour objectif principal de présenter et de discuter les résultats d'un projet de recherche intitulé « *Modélisation en canal d'un profil de plage en vue d'un rechargement de plage* » financé par le Ministère de la Sécurité publique du Québec (MSP) dans le cadre de la Chaire de recherche en ingénierie côtière et fluviale au Centre Eau-Terre et Environnement (ETE) de l'Institut national de recherche scientifique (INRS). L'objectif principal de ce projet est de déterminer en canal hydraulique l'évolution des profils de plage d'un mélange spécifique de sable grossier et de gravier sous des conditions de vagues de tempête afin d'explorer son potentiel de protection des infrastructures côtières dans un contexte de recharge de plage.

2. Projet de recherche

2.1 Mise en contexte

Les tempêtes du 15 octobre et 2 décembre 2005, ainsi que du 6 décembre 2010, ont causé d'importants dommages au mur de la promenade de l'Anse-aux-Coques, ainsi qu'à plusieurs résidences, menaçant la stabilité de cet ouvrage de protection côtière. En réponse à ces tempêtes récurrentes et aux grands dommages qu'elles causent aux infrastructures côtières, la municipalité de Sainte-Luce, avec le soutien du MSP, a procédé à des études afin «*d'identifier et recommander l'implantation d'ouvrages de protection qui s'avèrent les mieux adaptés au milieu et qui sont économiquement acceptables*» (p. 2, GENIVAR, 2012). Un mandat subséquent accordé à Consultants Ropars inc. (2013) par le MSP visait à étudier et à proposer un projet de recharge de plage devant une partie des murs verticaux qui bordent le rivage de l'Anse-aux-Coques. Au final, la recharge de plage a été retenue comme solution aux problèmes d'érosion et de submersion de la municipalité de Sainte-Luce. Étant donné qu'aucuns travaux de cette envergure n'existent au Québec, le gouvernement du Québec a souhaité faire un suivi du comportement de la recharge, comme l'exige la Loi sur la qualité de l'environnement, en plus de valider le concept au moyen de modèles physiques à grande échelle réalisés en canal hydraulique. La Chaire de recherche en ingénierie côtière et fluviale de l'INRS-ETE a donc été mandatée afin de déterminer en canal hydraulique les évolutions des pentes de plage d'un mélange de sable grossier et de gravier similaire à celui qui devait être utilisé pour recharger la plage de l'Anse-aux-Coques, sous l'action d'un régime de vagues typique de l'estuaire maritime du Saint-Laurent.

Le projet de recherche, intitulé « *Modélisation en canal d'un profil de plage en vue d'un rechargement de plage* » (contrat CPS_13-14-02), vise à répondre aux objectifs suivants

1. Déterminer la pente d'équilibre de la plage en canal pour un niveau d'eau constant;
2. Déterminer la pente d'équilibre de la plage en canal pour un niveau d'eau variable simulant la marée;

3. Déterminer les conditions (profil et stratigraphie de la plage, granulométrie, etc.) qui prévalent au droit du site à l'étude (Ste-Luce).

L'objectif 3 ayant déjà fait l'objet d'un rapport approuvé par le MSP, seuls les résultats principaux du rapport de Long & Xhardé (2014) seront synthétisés à la section 2.2. Le rapport complet se trouve en Annexe A. L'emphase de ce présent rapport est donc placée sur les résultats et les discussions reliés aux objectifs 1 et 2 du contrat.

2.2 Site à l'étude – Plage de l'Anse-aux-Coques

Le site d'étude de l'Anse-aux-Coques se situe dans l'estuaire moyen du Saint-Laurent et fait partie de la MRC de Sainte-Luce dans la région du Bas-Saint-Laurent (Figure 1). À l'origine une plage de sable composée d'une large berme sèche et d'un talus végétalisé en arrière-plage, L'Anse-aux-Coques est devenue, au fil des ans, une zone côtière fortement modifiée par une série d'ouvrages de protection rigides tels des murs de bois et de béton et des enrochements (Figure 2). Ces ouvrages de protection côtière, bâtis à même la plage, ont contribué à la réduction de la largeur de la plage et à la diminution des apports sédimentaires en provenance des talus d'arrière-plage. Le lecteur est référé au rapport de GENIVAR (2012) et à l'Annexe A pour une description détaillée de la paléogéographie et de la géologie Quaternaire du site.

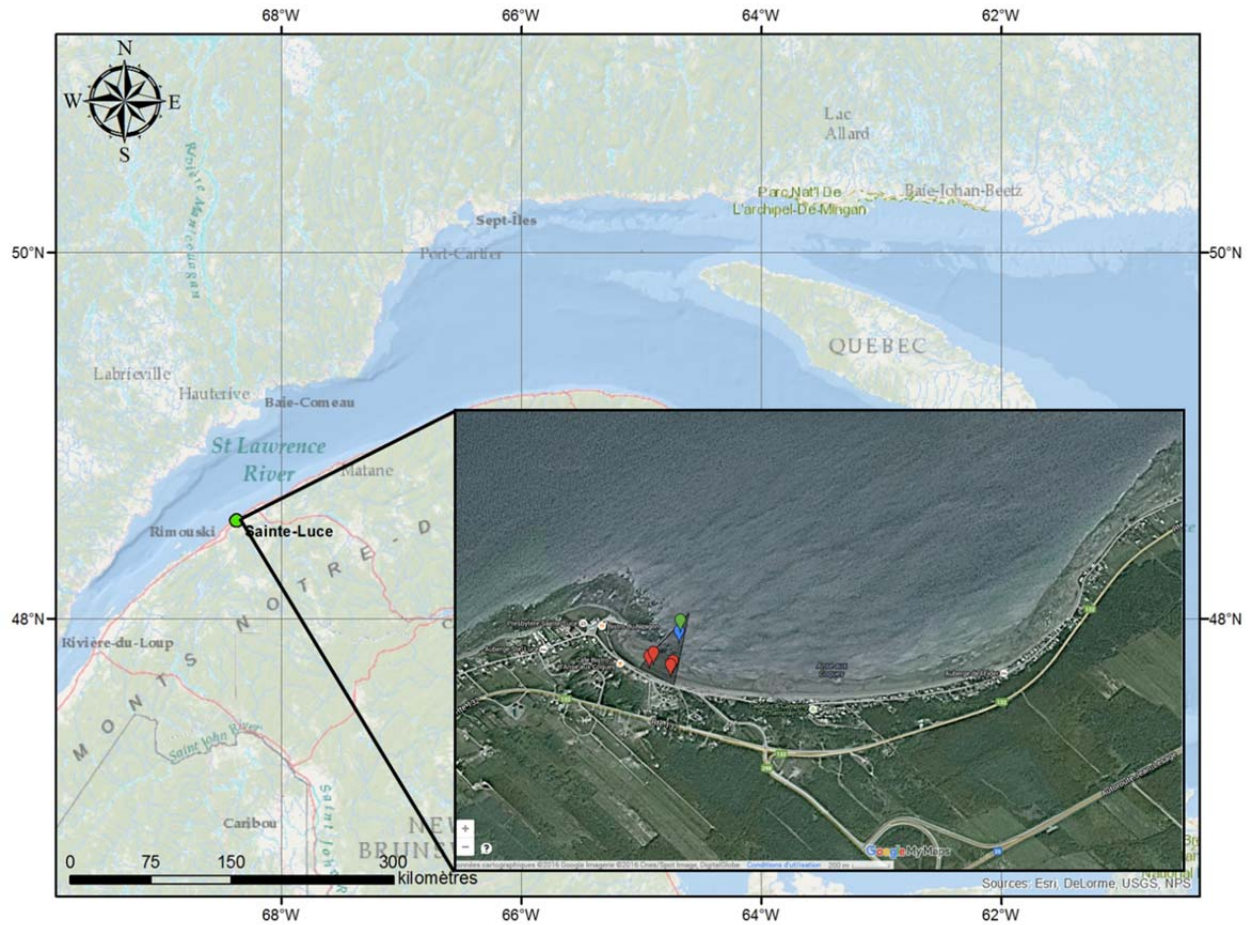


Figure 1. Localisation géographique du site à l'étude de l'Anse-aux-Coques dans la MRC de Sainte-Luce et emplacement des sondes de pression RBR enterrées (vert et rouge) et de l'ADP (bleu) à 80 cm du fond.



Figure 2. La plage de l'Anse-aux-Coques à Sainte-Luce dans les années 1920 montrant une large plage de sable et un talus d'arrière-plage végétalisé (en haut) et montrant la prédominance des murs de protection côtière et la morphologie de la plage juste avant la recharge (bas, photo Ministère de la sécurité publique).

2.2.1 Granulométrie et stratigraphie du site avant recharge

Le site de l'Anse-aux-Coques a fait l'objet de plusieurs analyses et suivis au cours de la période 2010-2014. Des relevés granulométriques de la plage et de l'estran, ainsi que des analyses par photo-interprétation, ont été réalisés par GENIVAR entre 2010 et 2011 (GENIVAR, 2012). Ces relevés de terrain confirment que, préalablement à la recharge, la plage de l'Anse-aux-Coques était essentiellement constituée de sable moyen à grossier ($D_{50} \geq 300 \mu\text{m}$ et $\leq 840 \mu\text{m}$), était de l'ordre de 40-45 m de largeur et présentait une pente comprise entre 1:15 et 1:20. Un triage granulométrique décroissant du haut de plage vers le bas de plage pouvait être

observé le long du profil de plage. Le bas de plage était formé d'un large estran argileux de faible pente (1200) s'étendant sur environ 300 m à marée basse et recouvert d'une série de barres d'avant-côtes de sables fins ($D_{50} \geq 180 \mu\text{m}$ et $\leq 220 \mu\text{m}$). Au niveau de la pointe aux Coques, la plage est inexistante et l'estran est formé d'une plate-forme rocheuse composée de schiste ardoisier typique de la province géologique des Appalaches.

La granulométrie compilée par GENIVAR (2012) et présentée ci-haut est représentative des sédiments de surface à un point donné dans le temps et n'est pas représentative des variations granulométriques dans l'espace et dans le temps (stratigraphie). Afin de pallier à ces lacunes, des relevés stratigraphiques et granulométriques de l'avant-plage ont été réalisés par l'INRS-ETE avant que le rechargement de la plage ne soit réalisé. Ces relevés ont été réalisés les 22 et 23 août 2013 durant les marées de vive-eau et sont décrits en détail dans un rapport soumis au MSP en janvier 2014 (Long & Xhardé, 2014). Les résultats principaux de l'étude stratigraphique de la plage sont ici résumés (plus de détails en Annexe A).

Les 6 carottes sédimentaires prélevées sur la plage de l'Anse-aux-Coques ainsi que les 4 tranchées ont permis d'identifier trois unités sédimentaires bien distinctes (Figure 3 et Figure 4)

Unité A Une couche de sable ayant une épaisseur variant entre 45-50 cm au pied du mur de protection de la promenade côtière, 30 cm sur le haut estran, 7 à 20 cm sur le moyen estran et 5 cm sur le bas estran, où elle tend même à disparaître. Ces dépôts sableux sont constitués à plus de 98% de sables moyens ayant un D_{50} compris entre $275 \mu\text{m}$ et $350 \mu\text{m}$. Ces dépôts peuvent contenir des traces de graviers (0,1% à 0,5%), de limons (1%) et d'argiles (0,1%), ainsi que des traces de matière organique (0,5% à 1,1%) et de débris coquilliers (1% à 4%) (Figure 5)

Unité B Un lag de galets et de blocs de roche ayant des tailles comprises entre 10 cm et plus de 30 cm de diamètre pour les plus gros blocs observés au sein d'une matrice de sables moyens en grossiers ($280 \leq D_{50} \leq 570 \mu\text{m}$) (Fig. 4). L'épaisseur de ce lag atteint une trentaine de centimètres au pied du mur et diminue progressivement pour atteindre une dizaine de centimètres sur le moyen et le bas estran.

Unité C Une couche argilo-silteuse très compacte renfermant du matériel plus grossier identifiée comme des argiles marines de Goldthwait mélangées à des matériaux de fonte et de déballastage des glaces. Cette unité est formée en majeure partie d'un

mélange de limons de 15 à 56 μm (25 à 35%), de sables fins de moins de 200 μm (30 à 50%) et de graviers de 2 à 20 mm (10 à 25%), auxquels peuvent s'ajouter des argiles (5 à 10%) et des traces de matière organique (0,5 à 3%) et de débris coquilliers (2 à 4%). La compaction des dépôts, mesurée par pénétromètre sur les échantillons prélevés par carottage, varie entre 1,75 kg cm^{-2} et 4,6 kg cm^{-2} . Cette unité s'observe à une profondeur de 80-90 cm au pied du mur de protection, à 60 cm sur le haut estran, à 20-25 cm sur le moyen estran et à seulement 15 cm de profondeur sur le bas estran. Plus au large, les sédiments de Goldthwait affleurent en surface et sont le siège d'un champ de rides de plage ("ripple-marks") indiquant un remaniement par les vagues et les courants (Annexe A).

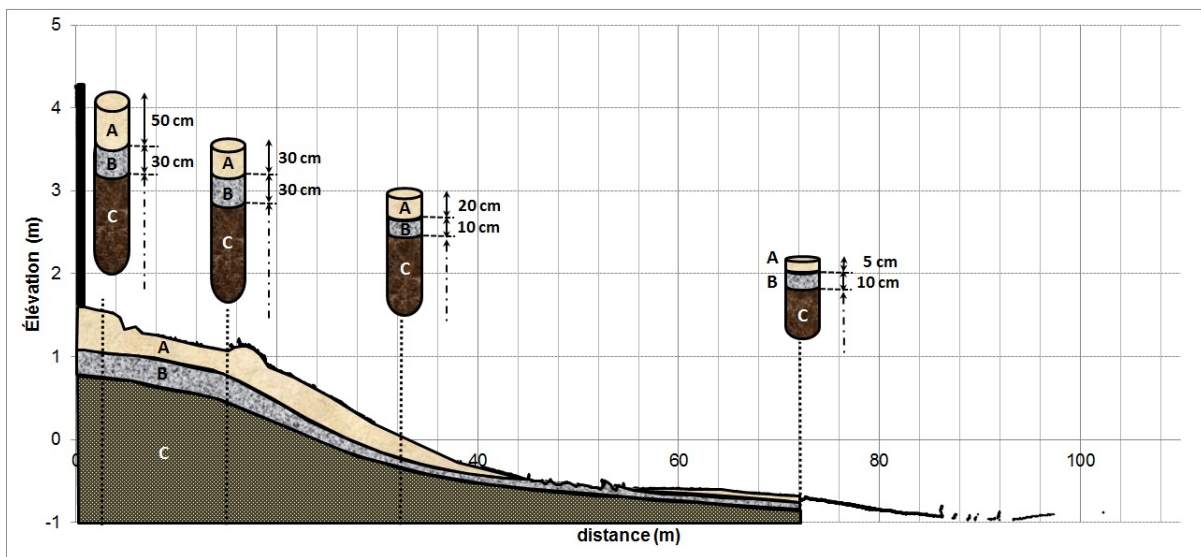


Figure 3. Profil stratigraphique idéalisé de la plage de l'Anse-aux-Coques. Trois unités stratigraphiques sont présentes : (A) les dépôts sableux récents, qui se sont mis en place depuis la fin de la remontée relative du niveau marin il y a environ 1500 ans, (B) une surface d'érosion, ou lag, composé de galets et de blocs rocheux de grande dimension (≥ 30 cm) et (C) des dépôts argilo-silteux très compacts identifiés comme étant des argiles de Goldthwait et qui se sont mises en place à la fin de la dernière glaciation, durant la phase de transgression marine de Goldthwait qui s'est déroulée dans l'Estuaire du Saint-Laurent entre 11 000 et 14 000 ans BP.

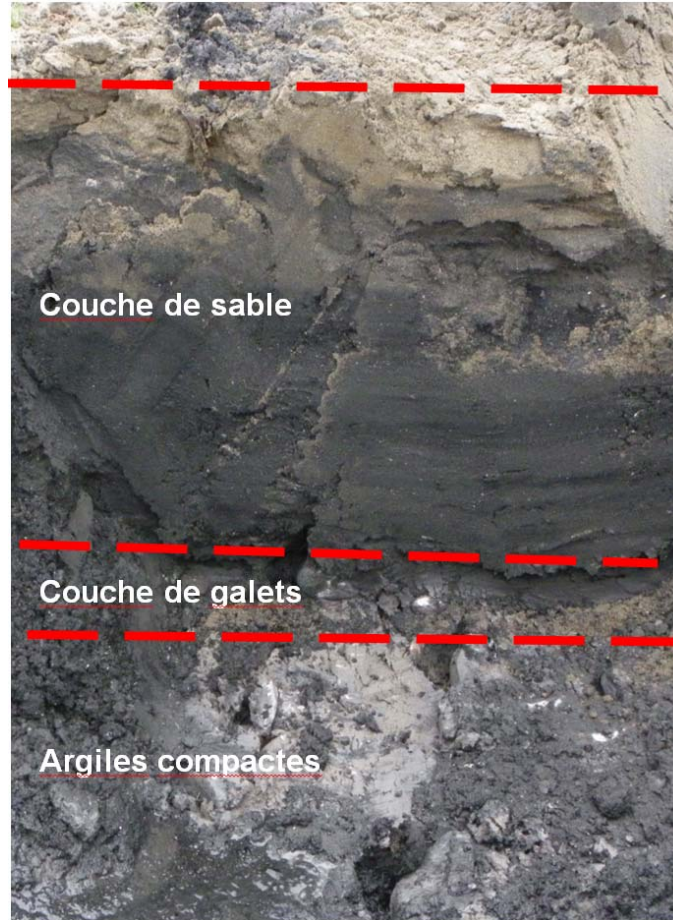


Figure 4. Coupe stratigraphique au centre de l'avant-plage montrant les 3 unités stratigraphiques composant la plage de l'Anse-aux-Coques. L'argile est à 60 cm de profondeur et est surmontée d'un horizon grossier de galets, lui-même surmonté d'une couche sableuse de 30 à 40 cm d'épaisseur avec de grandes quantités de matières organiques (couleur noire du sable).

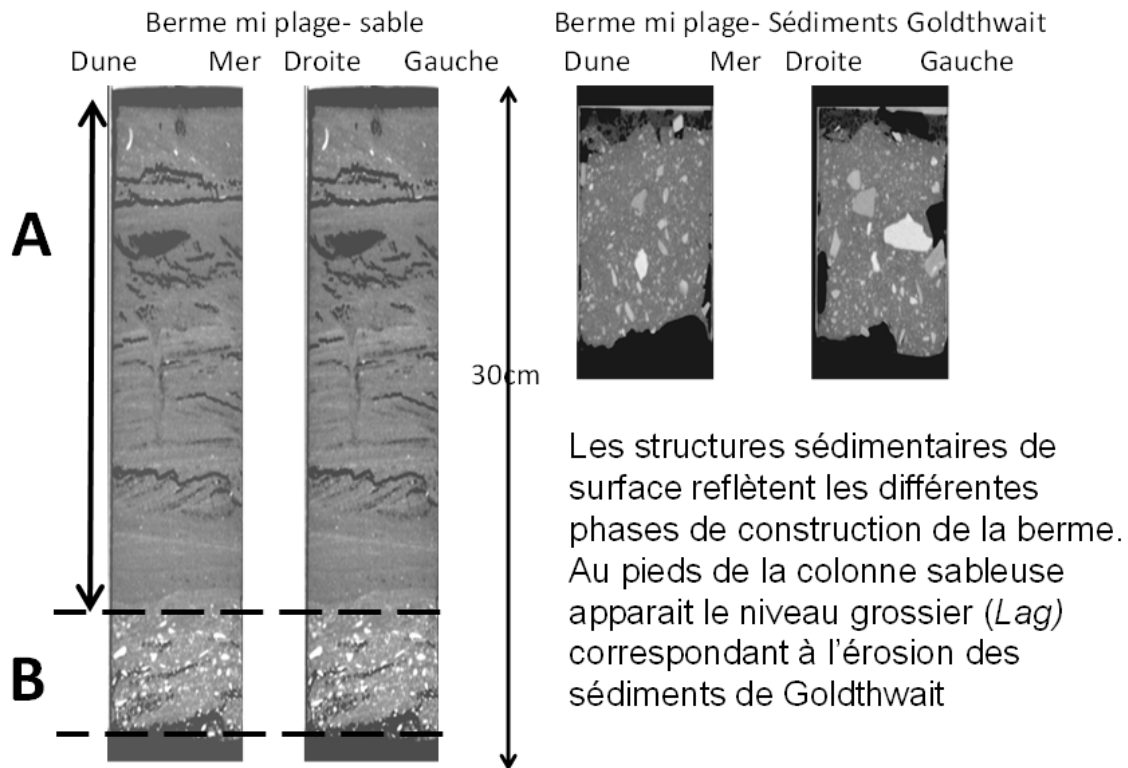


Figure 5. Carottes sédimentaires prélevées au centre de l'avant-plage. L'unité A correspond aux dépôts sableux récents et montre des périodes d'accrétion et d'érosion récurrentes témoignant de l'évolution dynamique de l'avant-plage et du mouvement du trait de côte. L'unité B correspond au lag de galets et de blocs rocheux qui surmonte l'unité C composée des sédiments de Goldthwait.

2.2.2 Granulométrie et géométrie de la recharge

Le site de la recharge proposé par Ropars (2013) s'étend sur une longueur d'environ 530 m, possède une élévation maximale de 3,3 m par rapport au NMM et une largeur de berme de 3 à 6 m. La recharge prévue couvre la partie centrale et ouest de la plage de L'Anse-aux-Coques (Fig. 6), une section de plage caractérisée par la présence de nombreuses infrastructures (mur vertical, bâtiments, promenade, etc.). La granulométrie prévue pour la recharge a un diamètre médian D_{50} d'au moins 7 mm et est comprise à l'intérieur du fuseau granulométrique présenté à la figure 7, pour une pente d'équilibre anticipée comprise entre 1:7 et 1:10 (Ropars, 2013).

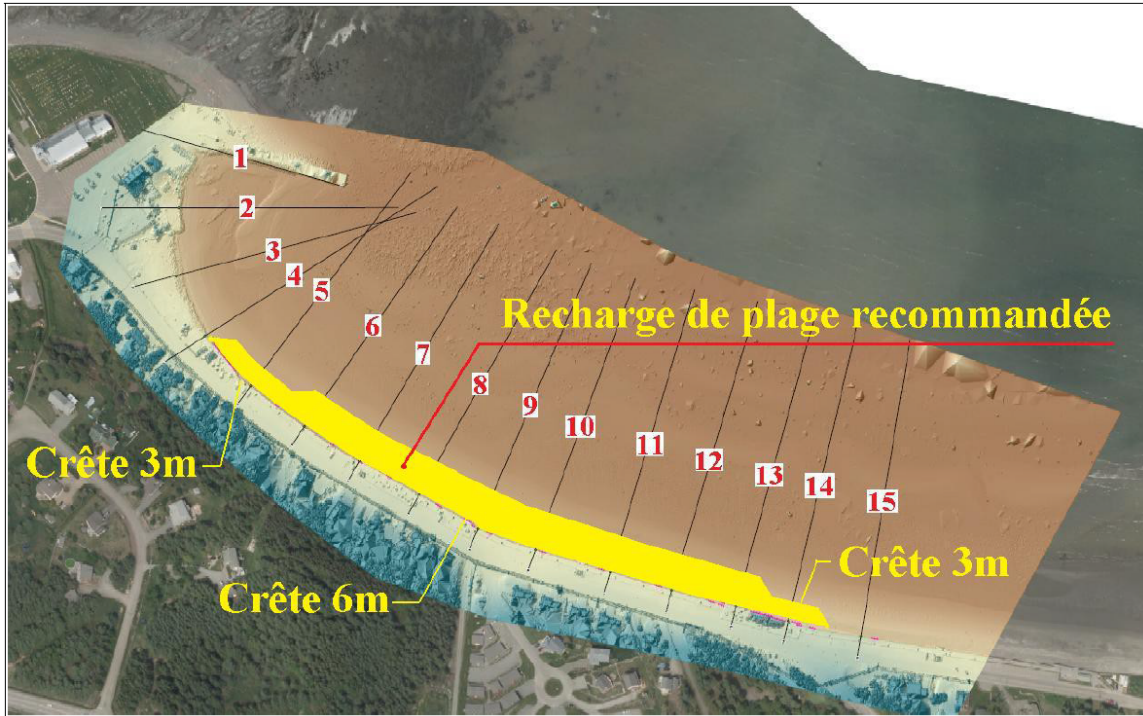


Figure 6. Localisation et étendue de la recharge de plage recommandée par Ropars (2013).

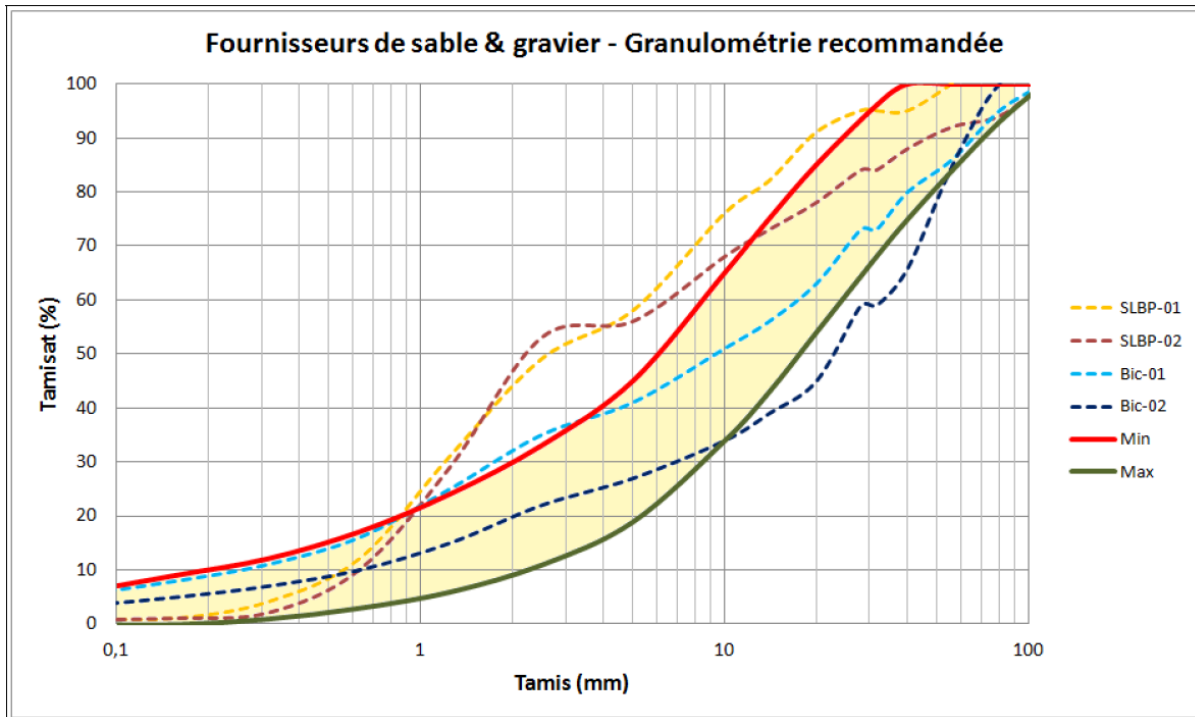


Figure 7. Distribution de la granulométrie recommandée (courbes rouge et verte) et de la granulométrie existante dans des bancs de graviers à proximité de la plage de l'Anse-aux-Coques (fig. 6.12 de Ropars, 2013).

2.2.3 Conditions hydrodynamiques au site à l'étude

Il n'existe que très peu de données de terrain sur les conditions hydrodynamiques propres à la plage de l'Anse-aux-Coques. À l'exception des données de vagues et de niveaux d'eau mesurées sur le terrain par l'équipe de l'INRS-ETE pour la période du 23 octobre au 8 décembre 2014 et présentées plus loin, les données disponibles pour le site à l'étude sont majoritairement issues de mesures provenant des localités environnantes et/ou d'exercices de modélisation.

Les niveaux d'eau pour le site à l'étude sont issus des données marégraphiques du Service Hydrographique Canadien (SHC) de Pointe-au-Père, situé à environ 10 km au SO de l'Anse-aux-Coques. Une différence de 2,3 m doit être soustraite au zéro des cartes hydrographiques (ZC) du SHC afin d'obtenir le niveau moyen de l'eau (NMM) (Tableau 1). Ces données indiquent que le site à l'étude est caractérisé par un régime macrotidal semi-diurne avec un marnage moyen de 3,2 m et un marnage de grande marée de 4,6 m.

D'après les analyses de niveau d'eau effectuées par Ropars (Ropars, 2013), le niveau d'eau exceptionnel du 6 décembre 2010 aurait été de +5,47 m ZC (+3,22 m NMM) au site de Sainte-Luce. À titre indicatif, les fréquences d'occurrence calculées par Ropars pour certains niveaux d'eau à Sainte-Luce sont présentées au tableau 2. Autre que la marée, le passage d'une zone dépressionnaire et la persistance de vents forts peuvent aussi contribuer à l'augmentation du niveau d'eau pour un site donné; cette surcote a été calculée pour le site de Pointe-au-Père/Rimouski par GENIVAR (2012) donnant une valeur de surcote maximale de 1.06 m pour la période 1964-2010 (Fig. 8).

Tableau 1. Niveaux d'eau à Sainte-Luce (Données du SHC pour Pointe-au-Père).

Niveau d'eau		Hauteur par rapport au zéro hydrographique (ZC)	Hauteur par rapport au niveau moyen de l'eau (NMM)
Niveau moyen de l'eau (NMM)		+ 2,3 m	0,0 m
Pleine mer supérieure	Marée moyenne	+3,9 m	+1,6 m
	Grande marée	+4,8 m	+2,5 m
Basse mer inférieure	Marée moyenne	+0,7 m	-1,6 m
	Grande marée	+0,2 m	-2,1 m
Extrêmes enregistrés	Extrême de pleine mer	+5,4 m	+3,1 m
	Extrême de basse mer	-0,9 m	-3,2 m
Marnage	Marée moyenne	3,2 m	
	Grande marée	4,6 m	

Tableau 2. Périodes de retour des niveaux d'eau à Sainte-Luce (Ropars, 2013).

Période de retour	Niveau d'eau par rapport au niveau moyen de l'eau (NMM)
Une heure par 50 années	+3,16 m
Une heure par 25 années	+3,08 m
Une heure par 10 années	+2,98 m
Une heure par 5 années	+2,90 m
Une heure par 2 années	+2,81 m
Une heure par année	+2,73 m
Douze heures par année	+2,46 m
Une journée par année	+2,39 m

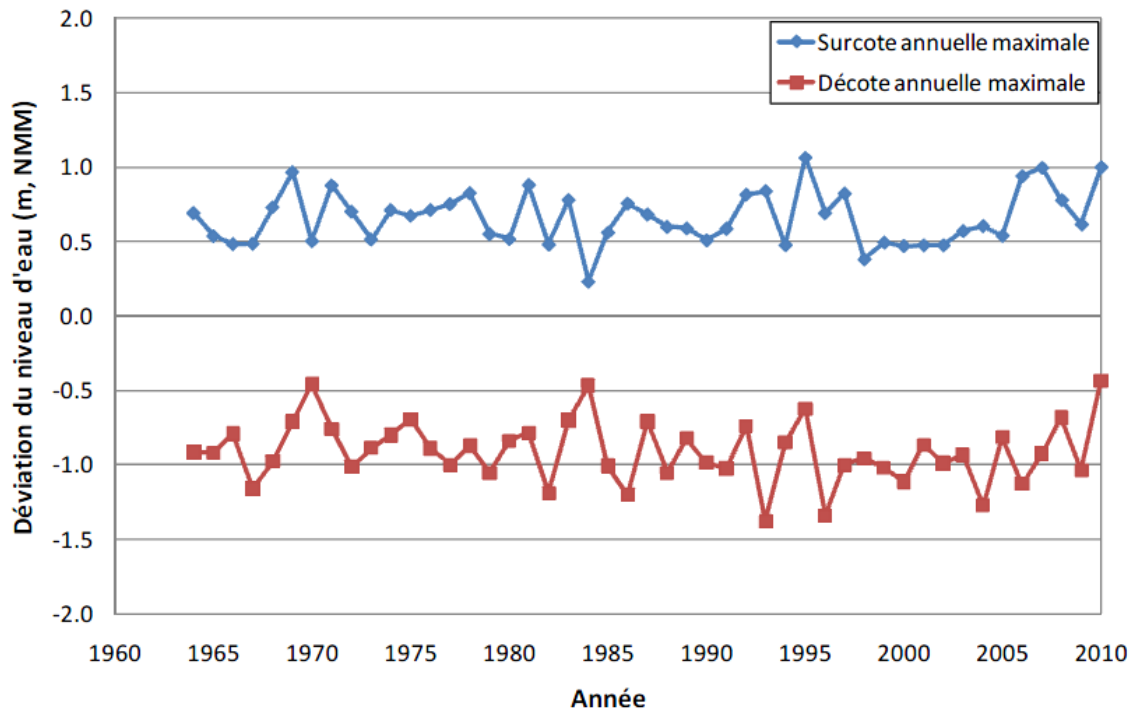


Figure 8. Surcotes annuelles maximales à marée haute et décotes annuelles maximales à marée basse pour Rimouski entre 1964 et 2010 (Fig. 15, p. 21 de GENIVAR, 2012).

Les conditions de vagues pour la plage de l'Anse-aux-Coques ont été modélisées par GENIVAR (2012) avec l'aide d'un modèle mathématique suivant l'approche présentée par Bretschneider (1959) à partir de données de vent mesuré à la station météorologique de Pointe-au-Père. Le choix de la station météorologique de Pointe-au-Père ainsi que les distances de fetch retenues par GENIVAR ont été critiqués par Ropars (2013), qui juge que la hauteur significative des vagues au large de l'Anse-aux-Coques est ainsi sous-estimée de quelques décimètres (de l'ordre de 20 à 25%). À la page 20 de son rapport, Ropars (2013) écrit :

« Les hauteurs de vagues maximales pour des récurrences de 50 ans sont de l'ordre de 4 m selon Genivar alors qu'une étude faite pour le site de Matane à partir des données météorologiques de la station de Mont-Joli a donné une hauteur significative de vague de l'ordre de 4,7 m pour une récurrence de 30 à 35 ans. Une analyse différente, faite par Baird & Ass. en 2005 dans le cadre du dimensionnement de la protection du brise-lames principal du nouveau havre de Matane a donné un Hs de 4,6 m pour une période de retour de 20 ans et de 4,8 m pour une période de retour 50 ans. »

Toutefois, il est important de noter que les phénomènes de réfraction et de déferlement des vagues à l'approche de la côte ont pour effet de minimiser cette sous-estimation de la hauteur significative des vagues au large lorsque ramenées à la côte. GENIVAR (2012) a modélisé la propagation des vagues en eau peu profonde à l'aide du logiciel STWAVE et a ainsi produit une série de cartes indiquant les zones de déferlement pour différentes hauteurs de vagues et différents niveaux d'eau. Il est intéressant de souligner qu'en raison de la faible pente de l'estran et du fort marnage caractérisant la plage de l'Anse-aux-Coques, la zone de déferlement des vagues est très large et varie grandement selon les niveaux d'eau utilisés (Fig. 9). En ce sens, le déferlement des vagues sur la recharge proposée et sur les infrastructures de protection côtière est limité à la partie du cycle de marée où les niveaux d'eau sont supérieurs au niveau marin moyen. La hauteur significative des vagues au pied de la promenade lors de tempêtes du NE et du NNE ont été estimés à 0,5 – 0,8 m par le modèle STWAVE de GENIVAR (2012). Cette estimation est légèrement supérieure à la hauteur

estimée par visionnement d'une bande vidéo de la tempête du 2 décembre 2005 qui est de 0,4 – 0,6 m au pied de la promenade (GENIVAR, 2012).

Pour le dimensionnement de la recharge à l'Anse-aux-Coques, Ropars (2013) suggère quant à lui d'utiliser les valeurs de hauteur de vagues et de niveau d'eau dérivées des études qu'il a effectuées à Matane dans le cadre de la protection de berge en 2009. Selon ces données, la hauteur significative des vagues atteignant l'avant-plage à l'Anse-aux-Coques est estimée être de l'ordre de 0,58 à 1,67 m (Tableau 3).

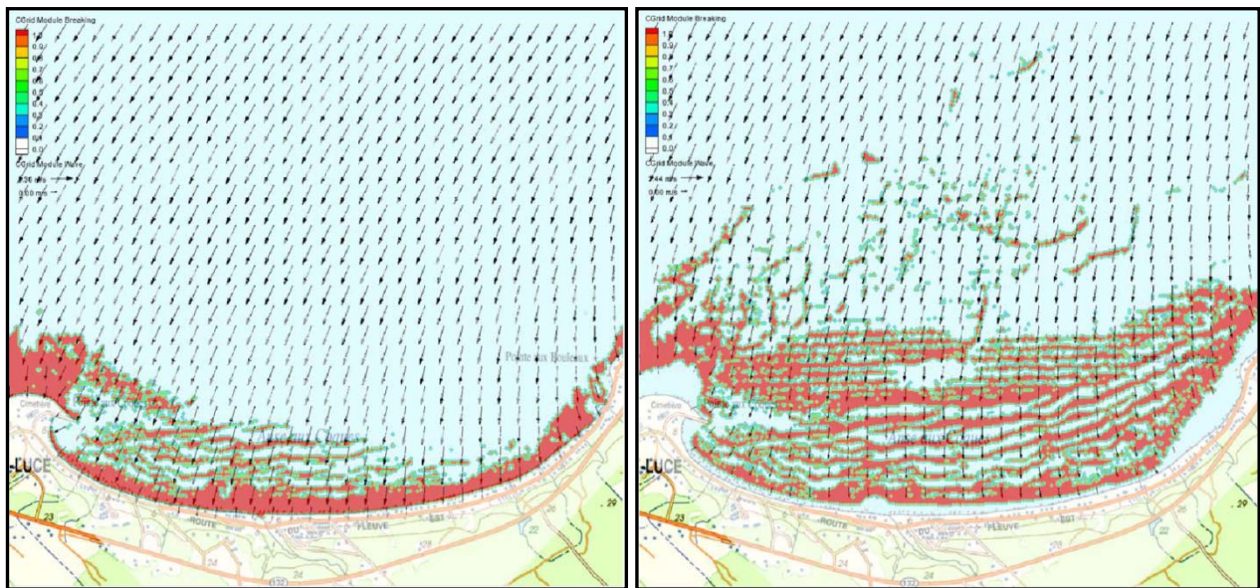


Figure 9. Zone de déferlement à niveau d'eau élevé (3,0 m-NMM) (gauche) et à niveau d'eau moyen (0,0 m-NMM) (droite) pour des vagues de récurrence 50 ans en provenance du NE. Les zones en rouge indiquent des vagues qui déferlent (figures 32 et 33 de GENIVAR, 2012).

Tableau 3. Relation entre les niveaux d'eau et les hauteurs de vagues à Sainte-Luce pour différentes périodes de retour des événements combinés (d'après Matane) (Tableau 5.2 de Ropars, 2013).

Vagues		Niveau d'eau (m NMM) / Récurrences combinées		
Hs	Tp	35 ans	20 ans	15 ans
0,58	7	3,17	3,11	3,08
0,72	7,5	3,09	3,03	3
1,14	8	2,82	2,76	2,73
1,23	8,5	2,74	2,68	2,65
1,43	9	2,53	2,47	2,44
1,57	9,5	2,37	2,31	2,28
1,67	10	2,12	2,06	2,03

Afin de pallier au manque de données de terrain sur la hauteur significative des vagues de tempête à l'Anse-aux-Coques, quatre jauges de niveau d'eau ont été installées au pied de la recharge et sur l'estran devant celle-ci pour la période du 23 octobre au 8 décembre 2014. Un appareil pour mesurer les courants a également été installé à l'entrée de la baie (Fig. 1) par l'équipe de L'INRS-ETE. Le calendrier des tâches effectuées est résumé au tableau 4. Les méthodes de traitement et d'analyse des données recueillies sur le terrain sont décrites à la section 3.2. Un événement de tempête a ainsi été enregistré du 7 au 8 novembre 2014. Cette tempête, d'une durée totale de 35 heures, a été dominée par des vents soufflant du Nord pendant 13 heures, virant ensuite au Nord-Ouest puis à l'Ouest (tel qu'enregistré à la station météorologique de Mont-Joli (station 7055121)). Une marée haute atteignant un niveau de +4,82 m ZC (donnée enregistrée à la station marégraphique de Pointe-au-Père #2980) a coïncidé avec des vents soutenus soufflant du Nord à 42 km hr⁻¹ pour produire des vagues d'une hauteur significative de 0,92 m au pied de l'avant-plage pour une période modale de 5,4 secondes (Figure 14 et section 3.2.2). Cette valeur mesurée est plus grande que les valeurs modélisées et visionnées par GENIVAR (2012) malgré que la tempête du 7-8 novembre 2014 ait été relativement modeste avec une récurrence estimée de 1 an (D. Didier, comm. pers., 2016). À titre de comparaison, la vitesse des vents enregistrée à la station de Pointe-au-Père et

coïncidant avec la marée haute ont un pourcentage de dépassement de 6,8% entre 1996 et 2010 (Tableau 4 dans GENIVAR, 2012). Le spectre de vague et les niveaux d'eau associés à cet évènement de tempête du 7-8 novembre sont décrits avec plus de détails à la section 3.2 (Choix des paramètres du modèle physique testé en canal hydraulique) de ce rapport.

Tableau 4. Dates des sorties et des tâches effectuées pour le déploiement d'appareils sur le terrain de l'Anse-aux-Coques.

Date	Niveau d'eau de marée basse (ZC m)	Université	Tâches effectuées
23-oct-14	0,8	INRS/UQAR	Déploiement de 5 RBR
27-oct-14	0,7	INRS	Relevés géochimiques
28-oct-14	0,9	INRS	Relevés granulométriques
29-oct-14	1	INRS	Relevés GPS
30-oct-14	1,2	INRS	Déploiement ADP
19-nov-14	1,2	INRS	Changement de batteries
20-nov-14	1,1	INRS/UQAR	Sauvegarde des données
08-déc-14	0,8	INRS/UQAR	Retrait des appareils

3. Méthodologie

La modélisation physique de la recharge de plage de l'Anse-aux-Coques a été réalisée en canal hydraulique à grande échelle afin de déterminer l'évolution des pentes de plage d'un mélange spécifique de sable grossier et de gravier sous des conditions de vagues de tempête typiques de l'estuaire moyen du St-Laurent. La section méthodologie est divisée en 2 sous-sections qui couvrent, en premier lieu, l'équipement et les méthodes utilisées à des fins de modélisation physique et en deuxième lieu, la justification des choix des paramètres du modèle physique testé en canal hydraulique.

3.1 Matériel et méthodes

L'outil principal utilisé afin de réaliser les expériences décrites dans ce rapport est le canal hydraulique multifonctionnel de l'INRS-ETE situé dans le Parc technologique du Québec métropolitain. Le canal mesure plus de 120 m de long, 5 m de large et 5 m de profondeur et est conçu pour simuler les interactions de vagues, marées, courants et le transport de sédiments.

Les instruments utilisés sont de type optique, acoustique, à câblage ou piézo-électrique servant à mesurer la turbidité de l'eau (OBS3+), la vitesse des courants (Vectrino I, Aquadopp et Mini-ADP) et la hauteur des vagues dans le canal (MASSA et General Acoustics), le niveau d'eau (Jauge capacitive) et la hauteur des vagues sur le terrain (RBR), respectivement. Une liste complète des instruments utilisés est présentée au Tableau 5 et leur disposition dans le canal est illustrée à la Figure 10. Cette sous-section décrit les paramètres de configuration des instruments ainsi que les méthodes d'analyse des données.

Tableau 5. Spécifications techniques des instruments utilisés pour mesurer l'hydrodynamique littorale et l'interaction vague-sédiment.

Type de mesure	Type d'appareil	Instrument	Lieu	Fréquence [Hz]	Résolution	Exactitude	Portée [m]
Vitesse	Acoustique	Vectrino I	Canal	25	N/A	0.50%	0.1
		Aquadopp	Canal	1	N/A	1%	4
		Mini-ADP	Canal / terrain	0.5	10 cm/s	1%	6
Turbidité	Optique	OBS 3+	Canal	10	N/A	2%	N/A
Niveau d'eau	Acoustique	MASSA	Canal	10	0.025 cm	0.10%	4
		General Acoustics	Canal	20	0.036 cm	0.10%	1.2
	Câblage	Jauge capacitive	Canal	10	0.75 cm	0.15%	N/A
	Sonde de pression	RBR Solo	Terrain	2	0.0002 dbar	0.05%	N/A

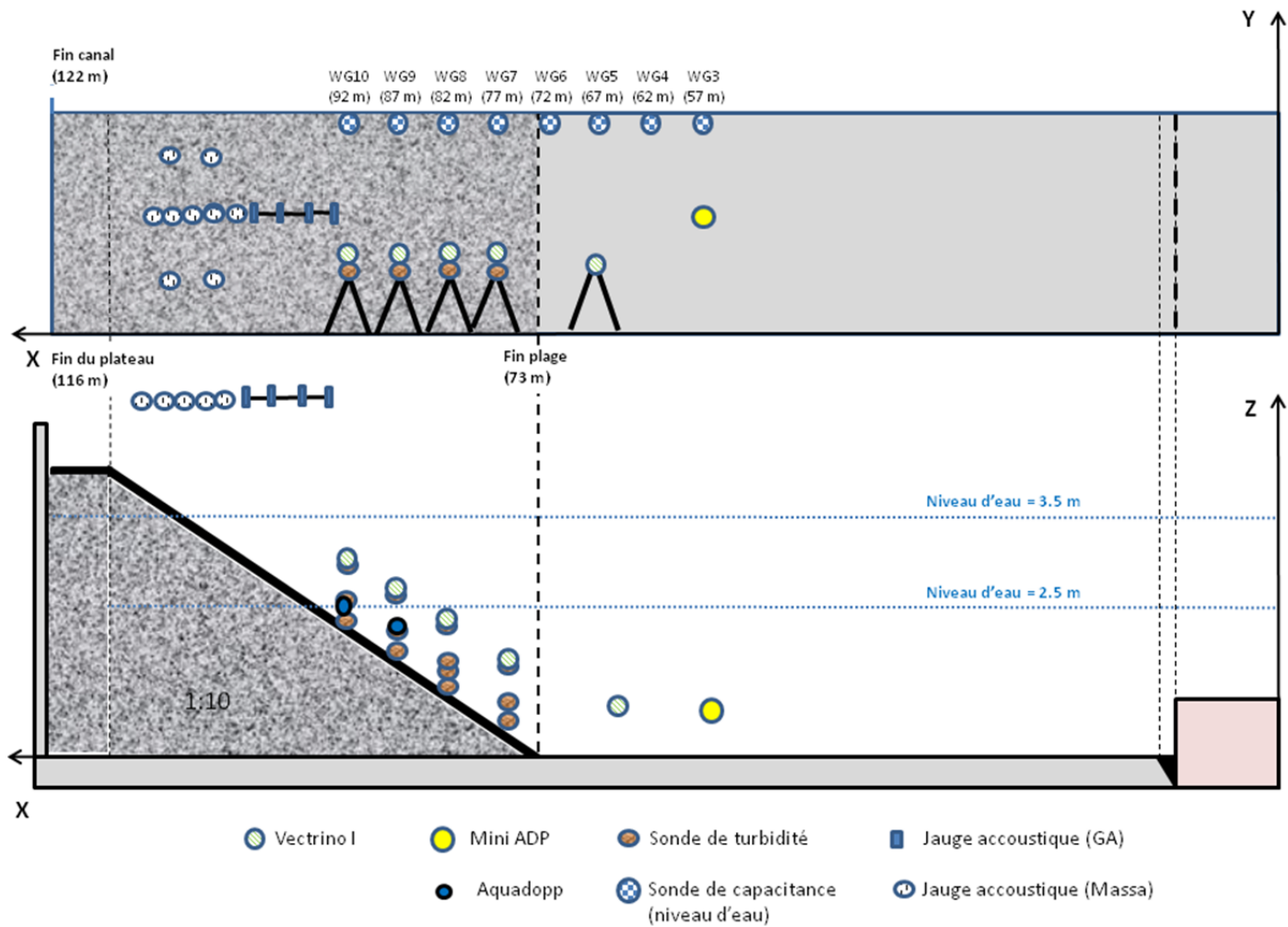


Figure 10. Montage expérimental et disposition des instruments de mesure dans le canal hydraulique. Les stations 3 à 10 correspondent aux WG3 à WG10.

3.1.1 Mesure des vagues de surface

Les mouvements de la surface libre (η) ainsi que l'amplitude des vagues (H) et leur période (T) sont mesurés dans le canal hydraulique au moyen de plusieurs types de senseurs (Figure 10) :

- A. **Jauges de niveau à capacitance** : ces jauges de niveau permettent de mesurer des niveaux d'eau compris entre 0 et 4,4 m avec une précision de l'ordre de 75 mm à une fréquence de 10 Hz. Elles sont installées le long du mur latéral ouest du canal à un intervalle de 5 m afin de suivre la progression et la déformation des vagues lors de leur propagation dans le canal. La première jauge est située à une distance de 45 m du batteur hydraulique et la dernière est installée à une distance de 95 m du batteur. Les jauges de capacitance sont utilisées pour calculer le coefficient de réflexion de la plage. Une méthode simple utilisant les mesures de hauteur de vagues en deux points permet de déterminer approximativement les coefficients de réflexions devant un ouvrage maritime (Goda and Suzuki, 1976). La théorie linéaire des vagues est utilisée dans ce cas (c.-à-d., supposant que l'amplitude des vagues est faible par rapport à la hauteur d'eau). La longueur d'onde est alors donnée par :

$$L = \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$$

où d est la hauteur d'eau, g est l'accélération gravitationnelle, T est la période. Vu que l'expression de L apparaît des deux côtés de l'équation ci-dessus, la solution est déterminée par méthode itérative. Cet algorithme est explicité dans la fonction *smallawt.m* (Annexe C). Le nombre d'onde (k) est alors déterminé par $2\pi L^{-1}$. Il est alors possible de solutionner le système d'équation déterminant les amplitudes des vagues réfléchies et incidentes pour une période donnée tel que décrit par la fonction *seperate_wave.m* (Annexe C). Le rapport des deux valeurs, respectivement, donne le coefficient de réflexion. Cet algorithme est comparé avec les méthodes classiques de calcul de réflexion; l'envoi de quelques vagues seulement et l'enregistrement des réflexions de celles-ci.

- B. **Jauges de niveau acoustiques** : ces jauges de niveau émettent des ultrasons afin de mesurer la distance entre le senseur et l'interface air/eau. Elles ont été installées sur un support en aluminium amovible de 7,5 m de long (Figure 11). Le support est installé de façon à surplomber le canal et permet de mesurer les vagues par le dessus. La position et la hauteur de ces jauges de niveau sont modifiées régulièrement au cours des expériences afin de couvrir la zone de déferlement et de fournir des données sur la hauteur et la cambrure des vagues avant et après déferlement ainsi que pour fournir des données sur la hauteur atteinte par le jet de rive sur la plage.
- C. **Sonde de pression (RBR Solo)** : Les sondes de pression RBR Solo ont été utilisées pour mesurer les niveaux d'eau et les hauteurs de vagues sur le terrain. Celles-ci sont enterrées à quelques centimètres de la surface et mesurent les variations de pression de la colonne d'eau. La fréquence d'échantillonnage est de 2 Hz. Les appareils sont synchronisés dans le temps. Le signal des appareils est converti en pression selon la calibration du fabricant. Les capteurs sur le terrain étant à découvert à marée basse, la valeur de la pression atmosphérique est mesurée et soustraite du signal pour cette période. Le signal contient alors les mesures de la pression statique et dynamique. Cette mesure est convertie en variation de la surface de l'eau (η) au-dessus du capteur par l'expression suivante (CEM p. II-1-21, p. II-1-22) :

$$\eta(t) = \frac{N(p + \rho g z)}{\rho g K_z}$$

où z est la profondeur du capteur (d) et N un facteur de correction environ égal à 1 en appliquant la théorie linéaire. Le "facteur de réponse" en pression K_z est exprimé par :

$$K_z = \frac{1}{\cosh(kd)}$$

où k est le nombre d'onde. Le calcul des hauteurs de vagues corrigées est explicité dans la fonction *pressure2elevation.m* (Annexe C). Les équations ici haut ne sont valides que pour des profondeurs suffisamment grandes et sont utilisées dans ce rapport pour calculer les hauteurs de vagues à marée haute. La valeur significative des hauteurs de vagues (H_s) est déterminée à partir de spectre d'énergie (Dean and Dalrymple, 1991). L'aire sous cette courbe (S) est proportionnelle à la valeur de H_s (c.-à-

d., $H_s = 4(S)^{1/2}$). Les détails de ce calcul sont présentés dans la fonction *FFT_Hs.m* (Annexe C).

- D. **Caméras haute définition GoPro Hero3+ et caméra de surveillance sans fil AXIS P1347** : ces caméras étaient installées le long du canal afin de valider de façon qualitative les mesures acoustiques.



Figure 11. Vue longitudinale du canal hydraulique montrant un exemple de vague déferlant sur la plage de gravier en canal. Les supports en aluminium amovibles traversent le canal et supportent les jauges de niveau acoustiques.

3.1.2 Mesure des courants

Le courantomètre profileur acoustique Mini-ADP de Sontek (SN : M1169) : utilisé pour caractériser les courants en grand canal et sur le site de l'étude. La fréquence d'émission est de 3.0 MHz. L'appareil est configuré avec le logiciel DeployADP de Sontek. Les données sont visualisées et exportées via l'application ViewADP. L'appareil a été déployé dans le canal du 29/09/2014 au 27/10/2014. Dans ce cas, l'appareil était directement alimenté par un câble permettant également de communiquer avec celui-ci. Ensuite, il a été déployé au site de l'Anse-aux-Coques entre le 30/10/2014 et 8/12/2014. Un ensemble de batteries externes est alors

ajouté aux mouillages pour le déploiement afin qu'il soit en autonomie complète. Le Mini-ADP est situé à l'entrée de la baie (48.5489 °N, -068.3781 °O) afin de mesurer les conditions hydrodynamiques initiales à l'approche de la plage. Les grandeurs de la vitesse dans le plan horizontal (x,y) sont présentées dans ce rapport à titre de comparaison et d'étalonnage avec le modèle physique réalisé. Pour les configurations du mini-ADP sur le terrain, la fréquence d'échantillonnage est de 0.5 Hz. Il y a 21 cellules, chaque cellule est de 0.30 mètre. La distance aveugle est de 0.20 m devant la tête du capteur. L'étendue du profil est de 0.35 à 6.65 m. Pour les configurations du miniADP dans le grand canal, la fréquence d'échantillonnage est de 0.5 Hz. Il y a 30 cellules, chaque cellule est de 0.15 mètre. L'étendue du profil est de 0.35 à 4.70 m.

La série de données de l'Exp-2 (Tableau 7) le 07/10/2014 (7:40 - 8:45) est utilisée pour effectuer une comparaison des valeurs de courant mesurées dans le grand canal avec celles observées sur le terrain. Pour ce faire, la grandeur des vitesses dans le plan horizontal (U_h) est calculée selon l'équation suivante :

$$U_h = \sqrt{u^2 + v^2}$$

où u et v sont les composantes du courant dans le système de référence x et y de l'appareil, respectivement. Théoriquement, les particules effectuent une orbite circulaire au passage des vagues. En définissant l'onde comme un cosinus, la vitesse horizontale maximale positive survient lorsque $\theta = 0$ (crêtes) et celle négative lorsque $\theta = \pi$ (creux). Par définition, l'ordre de grandeur des vitesses de courant dans le plan horizontal est exprimé par (Coastal Engineering Manual ou CEM) :

$$U_h = \frac{H g T}{2 L} \left(\frac{\cosh(2\pi(z + d)/L)}{\cosh(2\pi d/L)} \right) \cos(\theta)$$

où d est la hauteur d'eau, z la profondeur (surface à $z = 0$), L la longueur d'onde, H la hauteur des vagues, T la période des vagues. La vitesse moyenne temporelle est exprimée par U_{moy} .

Cinq (5) courantomètres acoustiques *Vectrino I* de Nortek étaient placés à 1 m de hauteur, et ce, à 67 m, 77 m, 82 m, 87 m et 92 m du batteur. Ces courantomètres fournissent le champ de vitesses (u , v , w) en un point situé à 5 cm de la sonde, à une fréquence d'acquisition de 25 Hz avec une précision de 0,5%.

Deux (2) **profileurs acoustiques Doppler *Aquadopp*** de Nortek étaient placés à 87 m et 92 m du batteur et à 0.35 m au-dessus de la plage initiale. Ces profileurs fournissent le champ de vitesses (u , v , w) dans toute la colonne d'eau à une fréquence de 1 Hz avec une précision de 1% + 0,5 cm/s et une résolution spatiale de 10 cm (Figure 12).



Figure 12. Position des appareils à la station 10 (avant-plan) et à la station 9, où deux des deux Aquadopp sont déployés à l'horizontale et mesurent les profils verticaux de courant

3.1.3 Matière en suspension

Des sondes de turbidité OBS3+ ont été utilisées afin de déterminer la concentration de matière en suspension (g L^{-1}). Il s'agit d'un appareil optique qui mesure le signal de retour, rétrodiffusé, d'un faisceau infrarouge qu'il émet. Afin de convertir ce signal en concentration de matière en suspension, une courbe d'étalonnage doit être réalisée en laboratoire (Sutherland et al. 2000). Pour ce faire, chaque OBS3+ est placé tour à tour dans un seau noir ayant une quantité de sédiments fins provenant de la mixture utilisée en grand canal. Un mélangeur permet de garder cette matière en suspension. Les appareils sont alimentés par une source de 12 volts et une mesure est réalisée à l'aide d'un multimètre sur le câble (bleu) conçu pour

mesurer de plus faibles valeurs. L'appareil renvoie une mesure en voltage qui augmente lorsque la concentration de la matière en suspension augmente. Un système de filtration d'eau permet d'échantillonner l'eau à proximité de la sonde lors de la mesure. Cette eau est filtrée sur des filtres pré-pesés donnant ainsi la concentration réelle de sédiment en suspension. Les données permettent donc d'avoir des courbes d'étalonnage pour chaque capteur (Tableau 6). La fréquence d'échantillonnage de l'appareil est de 10 Hz. Les appareils sont répartis dans la colonne d'eau selon la Figure 10.

Tableau 6. Voltage mesuré par les OBS3+ à l'aide du câble correspondant à de faibles valeurs. Les mesures sont faites pour quatre différentes concentrations de sédiments en suspension.

#OBS3+	Station	Hauteur (m)	Concentrations (g/L) :			
			0,6	0,9	2,0	7,3
8971	7	0,20	0,33	0,43	1,03	1,92
8979	7	0,50	0,23	0,43	0,79	1,85
8959	7	1,0	0,21	0,45	0,77	1,78
8977	8	0,10	0,25	0,45	0,8	1,83
8975	8	0,20	0,25	0,46	0,81	1,85
8978	8	0,45	0,24	0,44	0,8	1,8
8958	8	1,0	0,24	0,44	0,82	1,91
8957	9	0,10	0,21	0,48	0,8	1,87
8970	9	0,3	0,23	0,55	0,73	1,88
8967	9	1,0	0,24	0,47	0,80	1,84
8965	10	1,0	0,21	0,5	0,77	1,9
8968	10	0,050	0,22	0,47	0,73	1,62
8976	10	0,3	0,25	0,49	0,76	1,84

3.1.4 Mesure de la géomorphologie de la plage

Des relevés topographiques de la plage ont été effectués après quatre, huit et seize heures d'expérimentation à l'aide d'une multi-station laser topographique *Leica MS50*. Cette

station permet de collecter rapidement, et avec une grande précision, des données topographiques géoréférencées avec une résolution spatiale moyenne de 5 cm et une précision de 1 cm. La position exacte de la station était tout d'abord géoréférencée avant chaque relevé au moyen de 3 points de repère situés le long du canal, les coordonnées géographiques exactes de ces trois points ayant été préalablement déterminées au moyen d'un GPS-RTK ayant une précision horizontale de l'ordre de 1 cm. Une fois la station laser géoréférencée, un balayage laser de la plage était effectué. Ce balayage permettait d'acquérir un nuage de points laser 3D avec une résolution spatiale moyenne de l'ordre de 5 cm et une précision de positionnement de l'ordre de 1 cm. Une fois le balayage de la plage complété, un profil topographique était réalisé par arpentage classique au moyen d'un jalon équipé d'un réflecteur laser. Des points de mesures étaient ainsi relevés manuellement tous les mètres depuis le sommet de la plage jusqu'au pied de la plage. Les fichiers de données étaient ensuite exportés en format ASCII (.pts) puis convertis en fichiers texte (.txt) et une classification manuelle était réalisée avec le logiciel de traitement de nuages de points laser *Leica Infinity*® afin de retirer les points correspondant aux murs du canal et aux structures supportant les instruments de mesure. Le nuage de points était ensuite importé dans ArcGIS 10.2. Les élévations fournies par la station étant données par rapport à l'ellipsoïde, une correction a été appliquée afin de les ramener à une élévation par rapport au fond du canal. Pour cela, l'élévation du fond du canal par rapport à l'ellipsoïde a été mesurée (13,592 m) et a ensuite été soustraite aux élévations mesurées par la station. La surface 2D de la plage a ensuite été modélisée à partir du nuage de points corrigé dans ArcGIS 10.2 et un profil topographique a été extrait de cette surface. Afin de réduire les biais liés à l'influence des parois latérales du canal hydraulique, le profil a été extrait de la partie centrale de la plage.

3.1.5 Mesure de la granulométrie de la plage

Des échantillons de surface ont été prélevés à 10 m, 15 m, 25 m, 35 m et 50 m du sommet de la plage lors des expériences 1, 2, 3 et 5 (Tableau 7). Ces échantillons ont ensuite été séchés durant 24 h dans un four à 95°C et un sous-échantillon a été prélevé de façon aléatoire afin d'être représentatif sur le plan granulométrique. Compte tenu de la présence d'une importante quantité de sédiments avec un diamètre supérieur à 2 mm, de 500 g à 1500 g de sédiment a servi de sous-échantillon. Chaque sous-échantillon a ensuite été tamisé au moyen de tamis de 1", 3/4", 1/2", 3/8", 1/4", 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,850 mm et 0,600 mm afin

de séparer la fraction supérieure à 600 μm . La fraction inférieure à 600 μm a ensuite été analysée par diffraction laser au moyen d'un analyseur de taille de particules laser *Beckman Coulter LS 13320* permettant de couvrir les classes granulométriques comprises entre 0,04 μm et 2000 μm . La courbe granulométrique a été par la suite reconstruite en tenant compte du pourcentage de la fraction inférieure à 600 μm et de celle supérieure à 600 μm .

3.2 Choix des paramètres du modèle physique testé en canal hydraulique

La modélisation physique de la recharge de plage de l'Anse-aux-Coques a été réalisée en canal hydraulique à grande échelle afin de déterminer l'évolution des pentes de plage d'un mélange spécifique de sable grossier et de gravier sous des conditions de vagues de tempête typique de l'estuaire moyen du St-Laurent. Pour ce projet, un modèle physique de plage a été réalisé à une échelle 1:1. Les caractéristiques géométriques, granulométriques et hydrodynamiques de ce modèle ont été choisies afin de se rapprocher le plus possible de celles de la plage de l'Anse-aux-Coques après le rechargement prévu (Tableau 8). Bien que l'intention est de se rapprocher le plus possible du cas spécifique de la recharge de l'Anse-aux-Coques, quelques paramètres n'ont pu être respectés dans leur intégralité, ce qui n'invalide pas les résultats des expériences, mais doit cependant être gardé en tête lors de l'interprétation de ces résultats.

Les tests en canal ont été divisés en 6 expériences distinctes afin d'observer l'impact respectif de la variation 1) du niveau d'eau, 2) de la hauteur significative des vagues et 3) de la pente initiale de la recharge sur la pente d'équilibre résultante.

3.2.1 Description des expériences réalisées

Au total, 6 expériences ont été réalisées en canal en 2014 (Tableau 7). Chaque expérience a été menée suffisamment longtemps pour déterminer le temps mis par les vagues pour trier les sédiments et former une berme protectrice au pied du mur de soutènement.

La pente initiale de la plage modélisée a varié entre 1:10 (Exp-1, Exp-2, Exp-6), 1:5 (Exp-4 et Exp-5) et 1:1 (Exp-3). Le choix de varier les pentes initiales afin d'obtenir des pentes

plus ou moins abruptes a été motivé par le fait que la recharge actuelle de l'Anse-aux-Coques a été déposée en haut de plage, augmentant du coup l'angle de la pente de l'avant-plage. En effet, pour des raisons pratiques et économiques, il est souvent d'usage dans les projets de rechargement de plage de gravier de mettre en place les sédiments de la recharge sur le haut de plage et de l'aplanir au bulldozer ce qui résulte en l'obtention d'un profil d'avant-plage initial artificiellement plus abrupt que le profil d'équilibre de plage théorique (Dean, 2002). Le raisonnement étant que les vagues retravailleront en peu de temps le sédiment ainsi déposé pour rétablir l'équilibre de la pente. Les expériences 3, 4 et 5 offrent ainsi l'opportunité de tester la rapidité à laquelle la pente d'équilibre est atteinte lorsque soumise à un régime de vagues de tempête typique du l'estuaire moyen du St-Laurent et lorsque la pente initiale est plus abrupte que la pente théorique d'équilibre.

Tableau 7. Valeurs des paramètres initiaux des 6 expériences réalisées en canal en 2014 incluant la pente initiale, la longueur du haut de plage, l'élévation du niveau d'eau en canal et la hauteur significative des vagues. Il est à noter que l'expérience 2 est caractérisée par une variation du niveau d'eau de l'ordre de 1,4 m qui s'est déroulé sur 2 cycles complets (2 marées hautes et 3 marées basses).

Expériences	Pente initiale	Pente initiale (°)	Longueur haut de plage (m)	Niveau d'eau min (m)	Niveau d'eau max (m)	Hs (m)
Exp-1	1:10	5,44	7,6	3,5	3,5	1,1
Exp-2	1:10	5,33	6,2	2,4	3,8	1,1
Exp-3a	1:1	44,86	27,3	3,5	3,5	1,1
Exp-3b	1:1	44,86	27,3	2,5	2,5	1,1
Exp-3c	1:1.5	33,4	27,3	3,5	3,5	1,5
Exp-4	1:5	11,17	12	3,5	3,5	1,5
Exp-5	1:5	11,06	19	3,5	3,5	1,1
Exp-6	1:10	5,84	8,8	3,5	3,5	1,5

Tableau 8. Paramètres du modèle physique en canal et comparaison avec la recharge de plage de l’Anse-aux-Coques telle que proposée et réalisée. Les valeurs des pentes inscrites pour le canal sont les pentes initiales.

Paramètres	Modèle (canal) (échelle 1:1)	Anse-aux-Coques (proposée)	Anse-aux-Coques (réalisée)
Longueur du haut de plage	6 à 27 m	3 à 6 m	3 à 6 m
Élévation max de la plage (m/NMM)	4,3 m	3,3 m	3 m
Pente	1:1 à 1:10	1:7 à 1:10	inconnue
Diamètre médian (D_{50})	12 mm	7 mm	12 mm
Marnage moyen	1,4 m	3,2 m	3,2 m
Hauteur significative (H_s) des vagues	1 à 1,5 m	0,6 à 1,7 m	n/a

3.2.2 Vagues en canal

Les paramètres utilisés lors des expériences en canal de 2014 visent à générer des vagues de nature irrégulière de type JONSWAP (CEM) avec une hauteur significative (H_s) initiale (avant déformation) variant entre 1 et 1,5 m pour une période modale de 6 secondes. Les paramètres sélectionnés pour la hauteur significative des vagues générées en canal sont plus grands que les H_s (0,4-0,8 m) modélisées numériquement par GENIVAR (2012), mais comparable avec les H_s (0,58-1,67 m) misent de l’avant par Ropars (2013). Les vagues en canal sont produites par un batteur à vague de type piston, dont la longueur de course maximale est de 4 mètres et la vitesse maximale de 4 m s⁻¹. Due aux limitations liées à la mécanique du batteur qui empêchent la génération d’un spectre de vague continu, un échantillonnage discret de celui-ci doit être fait. Les fréquences choisies par l’utilisateur sont intégrées par le logiciel du fabricant (MTS). Un signal de niveau d’eau est ensuite généré et converti par le logiciel MTS en longueur de déplacement du batteur.

Le spectre de vague généré lors des expériences de 2014, tel que mesuré par les jauges à capacitance installées au bas de la plage, est caractérisé par huit fréquences dominantes qui se superposent afin de créer le spectre de vague illustré en figure 13. Les méthodes et analyses utilisées afin de dériver le spectre de vague sont décrites à l’Annexe C.

Au final, les vagues générées en canal avaient une H_s de 0,84 m pour une période modale de 5,6 secondes. Les valeurs du spectre discret généré sont plus grandes que les valeurs représentées par le spectre de Jonswap car les aires sous les courbes (S) doivent être égales afin de conserver les mêmes hauteurs significatives (H_s) de vagues. Ainsi, en ajoutant plus de fréquences au spectre, une meilleure résolution aurait été atteinte et le pic de fréquence aurait été plus représentatif, soit de l'ordre de 6 secondes (tel que désiré). Cette modification a été apportée au spectre de vague généré à partir de l'Exp-3 pour les vagues de 1,5 m de hauteur significative.

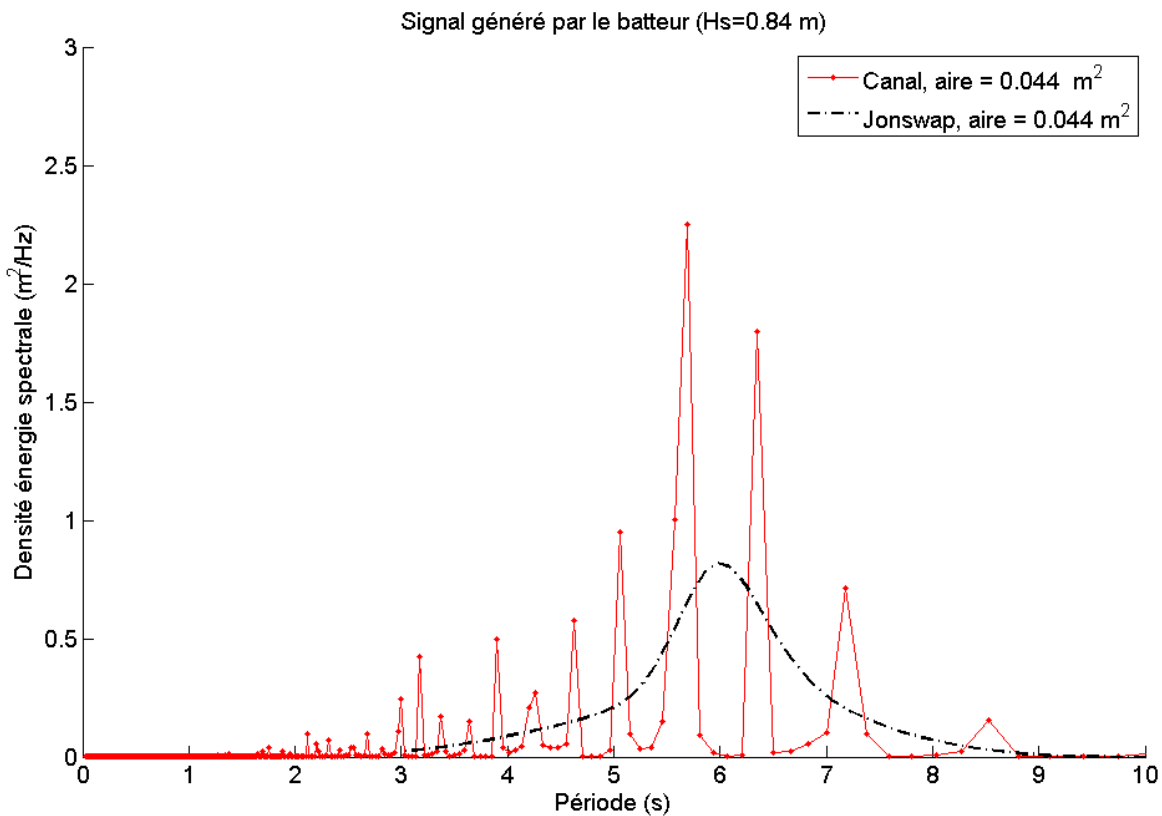


Figure 13. Analyse spectrale du signal généré par le batteur. Le spectre du canal ici a une hauteur significative (H_s) de vagues de 0.84 mètre. Le spectre de JONSWAP ($H_s=0.84$ m, $T_s = 6.0$ secondes, $\gamma = 3.3$) est illustré à titre de comparaison. Ces données sont extraites d'une jauge de capacitance (#7) au bas de la plage. La longueur du signal utilisé (N) est de 15200 points et la fréquence d'échantillonnage est de 60 Hz.

Bien que les rapports discutés précédemment aient permis d'étalonner le modèle physique en canal, des mesures de l'hydrodynamisme au site de l'étude ont été enregistrées immédiatement après la recharge par l'équipe de l'INRS-ETE afin de valider les modèles utilisés pour l'estimation des vagues et des courants à la côte pour la plage de l'Anse-aux-

Coques. Le spectre de vague enregistré lors de la tempête du 7-8 novembre et présenté à la figure 14 est caractérisé par une hauteur significative de 0,92 m et une période modale de 5,4 secondes. Quoique plus riche en contenu fréquentiel, le spectre enregistré au site de l'étude est fortement similaire à celui généré en canal. L'énergie des vagues (c.-à-d., aire sous la courbe) est similaire (0,044-0,053 m²) pour des hauteurs significatives de vagues semblables (0,84-0,92 m). De plus, la période significative (T_p) des deux spectres de vague est conforme (5,4-5,6 secondes).

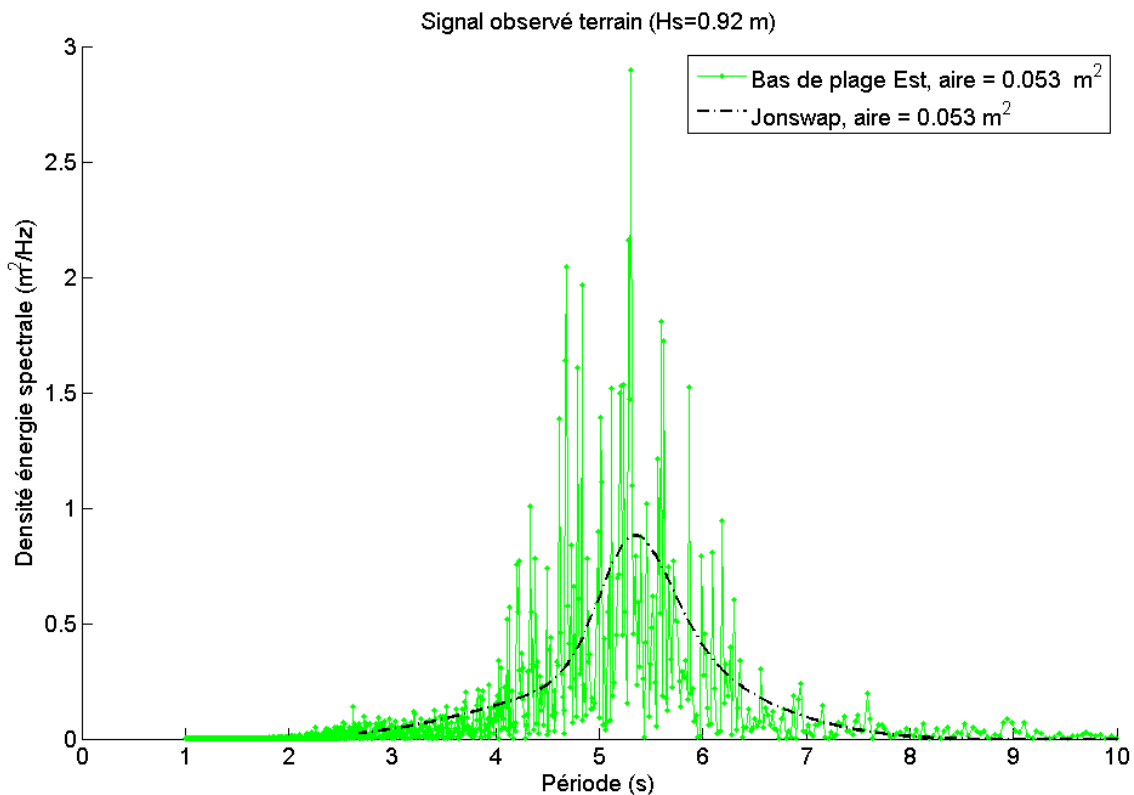


Figure 14. Analyse spectrale du signal mesuré sur le terrain au bas de la plage. Le spectre du canal ici a une hauteur significative (H_s) de vagues de 0.92 mètre. Le spectre de JONSWAP ($H_s=0.92$ m, $T_s = 5.4$ secondes, $\gamma = 3.3$) est illustré à titre de comparaison. Ces données sont extraites du capteur de pression RBR (77707) positionné en dimension de façon comparative à la jauge de capacitance #7 (Figure A). La longueur du signal utilisé (N) est de 4400 points et la fréquence d'échantillonnage est de 2 Hz.

3.2.3 Marnage et niveaux d'eau en canal

La variation des niveaux d'eau en canal (Tableau 7) a été réalisée afin d'atteindre les deux objectifs suivant, soit de 1) répliquer le comportement d'un niveau marin oscillant sous

l'effet de la marée et de 2) étudier le comportement de la recharge et des vagues à haut niveau d'eau (3,5 m) et à bas niveau (2,5 m).

Dans le cas d'un niveau oscillant sous l'effet de la marée, le 'marnage' utilisé est de 1,4 m, ce qui est nettement inférieur au marnage moyen de 3,2 m observé à Pointe-au-Père. Cette plus faible variation du niveau d'eau a été retenue afin de représenter la partie du cycle de marée où les niveaux d'eau ont un impact maximal sur la recharge puisqu'ils permettent aux vagues de déferler directement sur la recharge et même d'en atteindre la crête. La partie du cycle de marée où les vagues interagissent avec le pied de la plage et l'estran est ignoré dans le cadre des expériences en canal. Deux cycles complets de 'marée' ont été réalisés lors de l'Exp-2 durant laquelle le niveau a varié entre 2,4 m et 3,8 m lors de trois 'marées basses' et de deux 'marées hautes'.

Les niveaux d'eau statiques utilisés dans les expériences 1, 4, 5 et 6 sont de 3,5 m au-dessus du fond du canal. Ce niveau d'eau est supérieur de 1 m au niveau atteint lors de grandes marées de pleine mer supérieure au site à l'étude de l'Anse-aux-Coques. Il est important de mentionner que la plus grande profondeur d'eau a un impact direct sur le déferlement des vagues et sur la dissipation de l'énergie à l'approche de la plage puisque des vagues de plus grande amplitude peuvent atteindre la plage en canal.

3.2.4 Courants en canal

Les grandeurs de vitesse des courants sur le terrain et dans le canal dans le plan horizontal (x,y) sont présentées dans ce rapport à titre de comparaison et d'étalonnage avec le modèle physique réalisé. Les mesures comparées en canal et sur le terrain ont des valeurs de périodes et de longueurs d'onde similaires (Figures 15 et 16). Les valeurs sont comparées pour des profondeurs d'eau légèrement différentes. La moyenne dans le canal des courants générés est d'environ $0,39 \text{ m s}^{-1}$ (Figure 15) pour un niveau d'eau 3,2 m. Cette valeur augmente légèrement ($0,43 \text{ m s}^{-1}$) durant l'expérience, mais de façon non significative lorsque le niveau d'eau atteint 3,7 mètres. Ces vitesses sont légèrement plus faibles que celles mesurées sur le terrain ($0,47 \text{ m s}^{-1}$) (Figure 16). La hauteur significative des vagues est un peu plus élevée sur le terrain (0,92 m) que dans le canal (0,84 m), ce qui peut expliquer cette différence; les courants horizontaux à une hauteur donnée augmentent avec la hauteur des vagues pour des longueurs

d'onde et des périodes constantes. Somme toute, les valeurs de courant sont du même ordre de grandeur confirmant l'utilisation de l'échelle 1:1 du modèle physique.

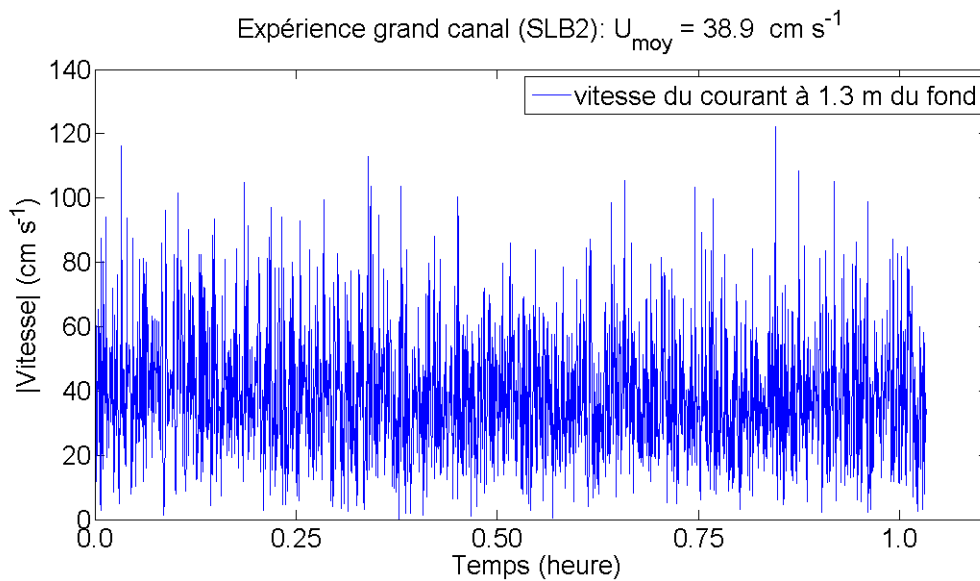


Figure 15. Grandeur de la vitesse de courant dans le plan horizontal (x,y) du canal. Les données sont recueillies par le mini-ADP. La hauteur significative des vagues est d'environ 0,84 mètre.

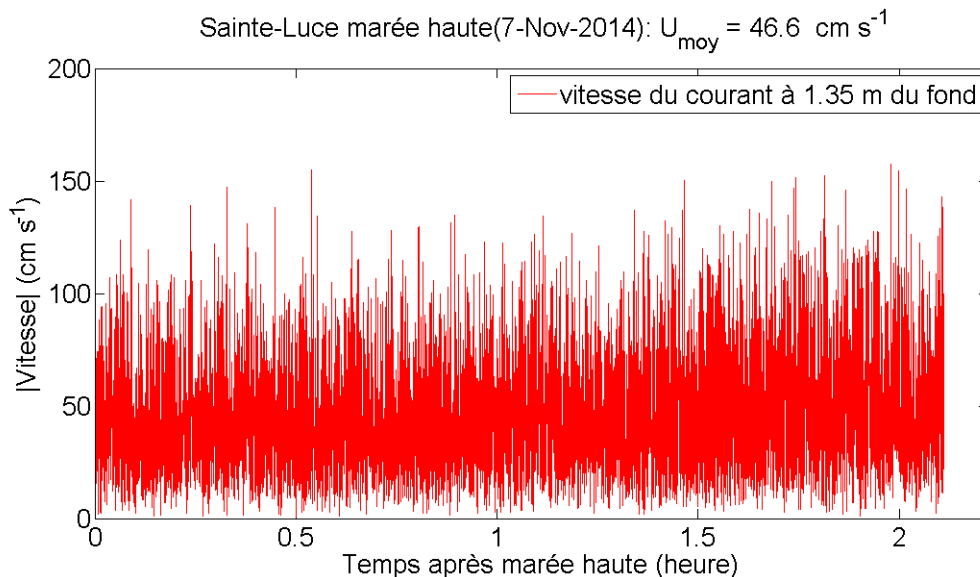


Figure 16. Grandeur de la vitesse de courant dans le plan horizontal (x,y) sur le terrain de Sainte-Luce. Les données sont recueillies par le mini-ADP déployé dans environ 4,5 mètres d'eau. La hauteur significative des vagues est d'environ 1.0 mètre.

3.2.5 Granulométrie et géométrie de la plage en canal

Les projections concernant la géométrie et la granulométrie de la recharge de la plage de l'Anse-aux-Coques, telles que présentées dans Ropars (2013) et discutées à la section 2.2.2, ont été utilisées en tant que référence pour l'étalonnage des paramètres dimensionnels et granulométriques du modèle physique en canal. En ce sens, une granulométrie dont la distribution est contenue à l'intérieur du fuseau recommandé par Ropars (2013) et possédant un diamètre médian D_{50} de 12 mm a été retenue (Figure 17). La granulométrie utilisée en canal est caractérisée par une faible proportion de sable fin à moyen (environ 10% du tamisat), par l'absence de bloc (*cobble* et *boulder* > 64 mm), et par une forte représentation des graviers avec 68% du tamisat, plus particulièrement dans la classe des graviers grossiers (D_{50} de 20 mm).

Les géométries initiales de la plage en canal sont caractérisées par un haut de plage d'une longueur minimale de 6 m, une élévation de 4,25 m au-dessus du fond du canal, et une pente initiale variant de 1:1 à 1:10 pour une longueur de plage de l'ordre de 5 à 40 m. Il est à noter que la hauteur de la plage modélisée en canal est près d'un mètre supérieur à la hauteur prévue de la recharge. Malgré cette différence importante, il faut souligner que la hauteur maximale de la plage en canal est de 0,75 m supérieur au niveau moyen de l'eau pour les expériences 1, 4, 5 et 6 (3,5 m) et de 0,45 m supérieur au niveau d'eau maximal utilisé dans l'expérience 2 (3,8 m). Ces valeurs concordent bien avec la relation entre la hauteur maximale de la recharge prévue (3,3 m NMM) et le niveau des grandes marées de pleine mer supérieure (2,5 m NMM) et le niveau des extrêmes de pleine mer (3,1 m NMM) (voir Tableau 1).

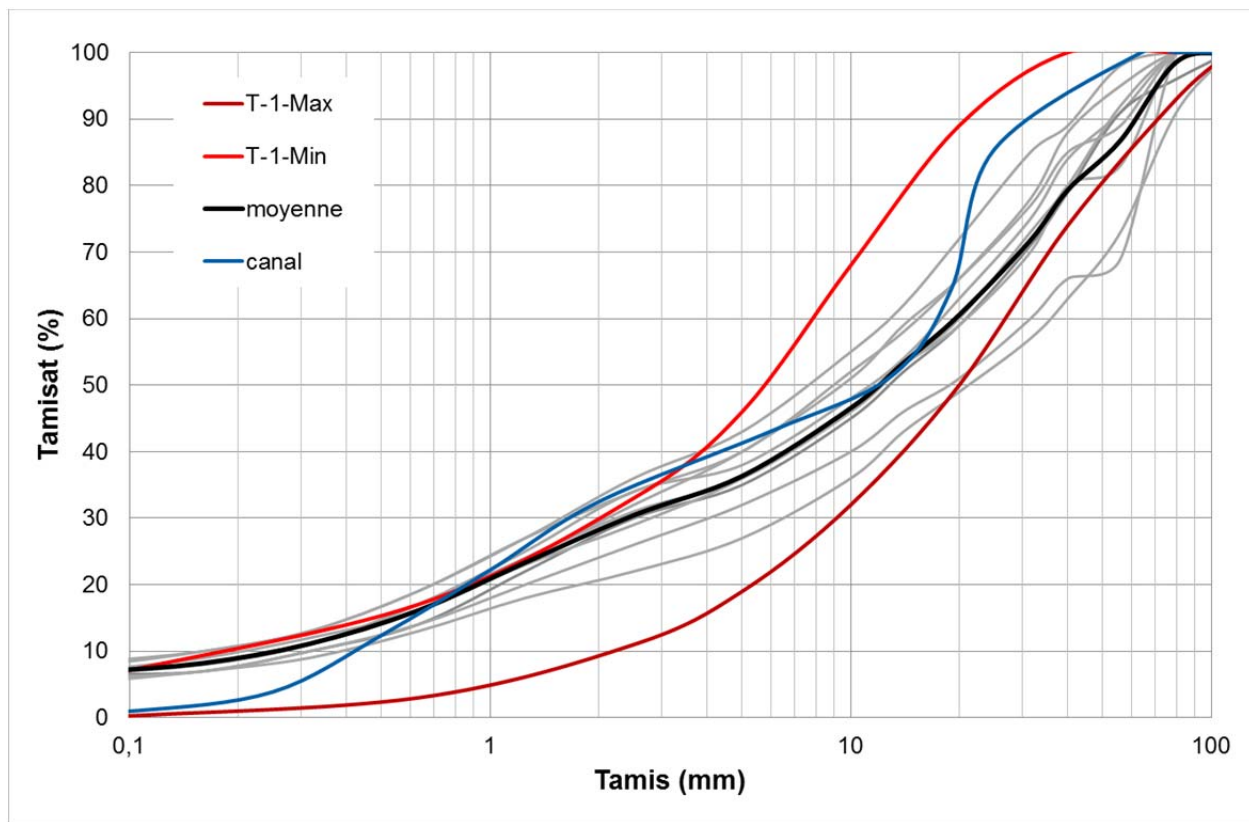


Figure 17. Granulométries discutées dans ce rapport incluant le fuseau granulométrique idéal recommandé par Ropars (2013) (courbes rouges), la distribution granulométrique de la recharge utilisée sur la plage de l'Anse-aux-Coques incluant les 9 échantillons prélevés par Yann Ropars entre le 6 et le 15 novembre 2014 (courbes grises) et la moyenne de ces 9 échantillons (courbe noire) et la distribution granulométrique de la recharge utilisée en canal (courbe bleue).

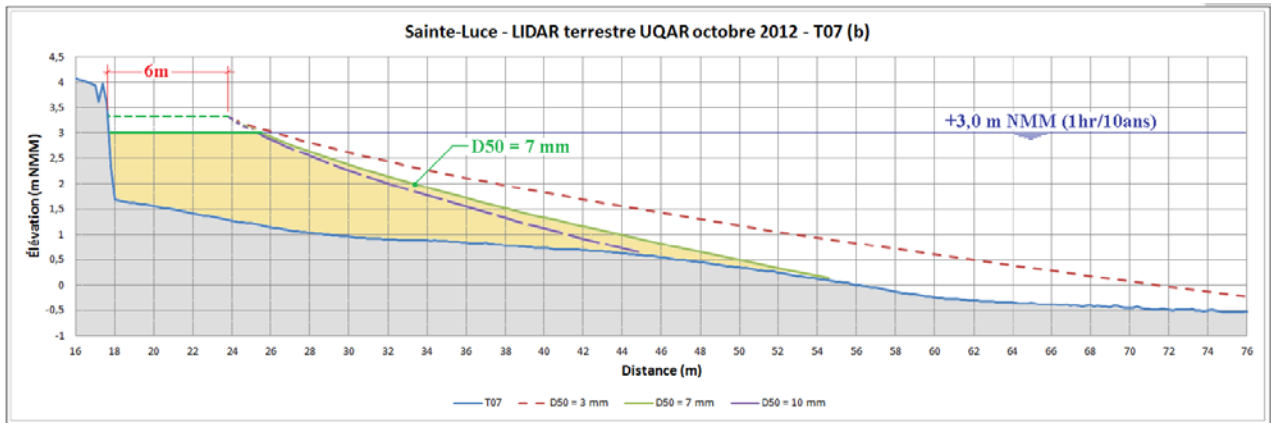


Figure 18. Profil de plage typique de Sainte-Luce et géométrie du rechargement projeté. Ces données ont été utilisées pour déterminer les caractéristiques géométriques du modèle à tester en canal (figure 6.9 dans Ropars, 2013).

4. Résultats et Discussion

4.1 Pentas d'équilibre

La perturbation générée par le rechargement de plage sur la géométrie initiale du système côtier peut être étudiée au moyen du concept de profil d'équilibre de plage. Ce concept est largement utilisé en génie côtier et constitue l'élément-clé de la plupart des modèles prédictifs développés pour prédire et décrire quantitativement la réponse du profil de plage naturel à la suite d'un rechargement de plage (U.S. Army Corps of Engineers, 2002). Le concept de profil d'équilibre repose sur l'hypothèse selon laquelle une plage ayant une granulométrie donnée atteindra un état d'équilibre si elle est soumise suffisamment longtemps à un forçage hydrodynamique constant. Toute modification des conditions hydrodynamiques extérieures aura pour conséquence de modifier le profil d'équilibre de la plage.

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, mieux connue sous le nom de Équation de Dean :

$$h(y) = Ay^{2/3}$$

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. Cette sous-section présente les profils de plage des expériences réalisées en canal et les discute en relation avec le calcul de la pente d'équilibre selon l'équation de Dean.

4.1.1 Expérience 1

L'expérience 1 est caractérisée par une pente initiale de 1:10, un niveau d'eau constant à 3,5 m, une hauteur significative des vagues générées de 1 m, une période de 6 secondes

pour une durée totale de l'expérience de 16 heures. Le profil final est ici présenté (Figure 19) et discuté dans un contexte de calcul de la pente d'équilibre.

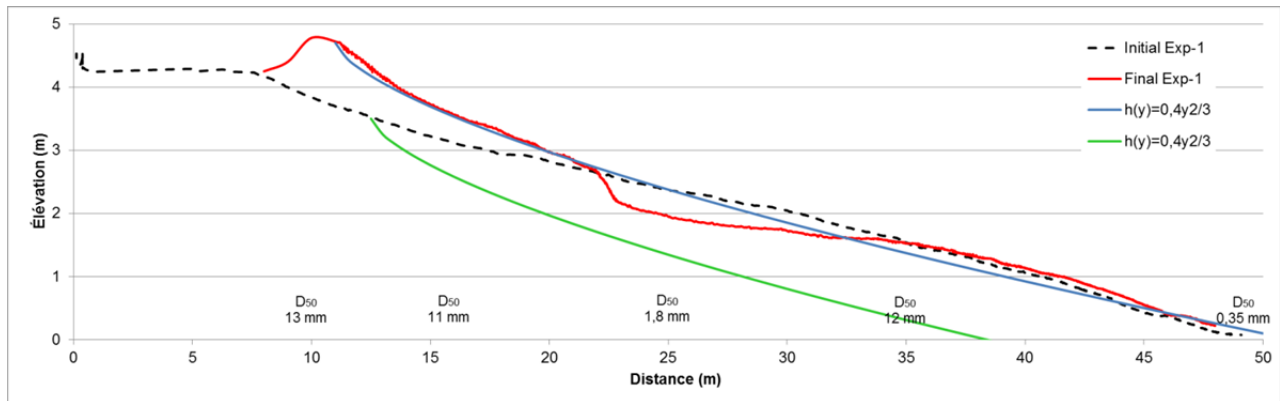


Figure 19. Profil initial et final (après 16h00 de vagues) de la plage pour l'Exp-1. Le profil d'équilibre selon l'équation de Dean pour un D_{50} de 12 mm ($h(y) = 0,4y^{2/3}$) est superposé au profil final selon 2 points initiaux différents. Le D_{50} des échantillons prélevés le long du profil final est indiqué au bas du graphique.

Le profil final de la plage de l'Exp-1 montre une zone de progradation et d'accrétion sur le haut de l'avant-plage qui se présente sous la forme d'une berme d'environ 50 cm de hauteur et de 5 m de largeur. Cette accumulation de gravier résulte de l'érosion de la plage dans la zone de déferlement et du transport sédimentaire presque exclusivement dirigé vers le haut de la plage, sauf pour une mince couche de sable moyen à grossier qui s'est déposé au pied de la plage.

Il est intéressant de constater que le profil d'équilibre dérivé de l'équation de Dean pour un D_{50} de 12 mm ($h(y) = 0,4y^{2/3}$) offre une bonne corrélation avec l'aspect général de la pente finale de l'Exp-1, indiquant que la plage en canal a atteint un profil d'équilibre suite à 16 heures de vagues de tempête (Figure 19). Quoique la pente d'équilibre du profil final de l'Exp-1 corresponde bien à la pente calculée avec l'équation de Dean pour un D_{50} équivalent, le point initial de la pente calculée a dû être manuellement ajusté afin de correspondre à la limite 'marine' (ou extérieure) du sommet de la berme. En effet, le calcul de la pente d'équilibre à partir de l'intersection du niveau moyen de l'eau et de la plage (courbe verte sur la figure 19) tel que recommandé par Dean (2002) ne tient pas compte de la progradation et de l'accrétion de la berme de gravier par l'activité des vagues, sous-estimant grandement le volume de sédiment nécessaire à l'atteinte d'un profil d'équilibre.

Il est aussi important de souligner que certaines particularités morphologiques propres aux plages de gravier sont complètement ignorées par le profil de pente d'équilibre calculé par l'équation de Dean. Pensons notamment à la marche (*step*) se trouvant dans la zone de déferlement et la variation de l'angle de la pente entre le haut de l'avant-plage, plus abrupte, et le bas de l'avant-plage. Il est pourtant nécessaire de délimiter les variations dans la hauteur et la position de la marche et dans l'angle du bas de l'avant-plage puisque ces composantes contrôlent, du moins en partie, l'importance de la dérive littorale et ont conséquemment un rôle important à jouer sur la durée de vie de la recharge. En effet, l'une des particularités morphologiques propre aux plages de graviers est la présence d'une marche (*near-vertical step*) se trouvant généralement au pied de l'avant-plage et à la base de la zone de déferlement (Buscombe & Masselink, 2006). Cette pente très abrupte a pour effet de rapidement diminuer la profondeur d'eau, forçant les vagues à se briser directement sur l'avant-plage, concentrant du coup l'énergie des vagues sur une section très restreinte de la plage. Le gradient de pente important limite la distance nécessaire aux processus de réfraction des vagues qui arrivent obliquement à la plage ce qui a un effet non négligeable sur la dérive littoral et le transport sédimentaire dans la zone de déferlement (Van Wellen et al., 2000). Il est important de garder ces processus en tête dans le cas de l'évolution d'une recharge de plage de gravier puisqu'ils peuvent mener à une perte prématurée du sédiment sur le site de remplissage et à des gains sédimentaires en aval de la dérive.

Dans le cas de l'Exp-1, un D_{50} de 15 mm ($A=0,425$) résulte en un profil calculé plus près du profil existant, mais seulement lorsque le haut de l'avant-plage est considéré (c.-à-d. du devant de la berme à la zone de déferlement). Ce fait n'est pas corroboré par des valeurs plus importantes du D_{50} des sédiments prélevés sur le haut de l'avant-plage comparativement au D_{50} des sédiments du reste de la plage (Fig. 19) et doit par conséquent trouvé son explication dans des processus autres que ceux gouvernés par la granulométrie. Pensons ici aux processus d'infiltration/exfiltration qui contrôlent le transport sédimentaire par jet de rive (*swash-backwash*) sur le haut de l'avant-plage, et qui sont fort probablement mal représentés par l'équation de Dean. Une pente d'équilibre ne peut être calculée avec l'équation de Dean ni avec l'équation à deux segments de Inman (Inman et al. 1993) pour le bas de l'avant-plage (c.-à-d. de la zone de déferlement jusqu'au fond du canal) puisque cette section de l'avant-plage est caractérisée par une morphologie complexe (marche, plateau, «barre», etc.) et des variations multiples dans l'angle de la pente. La cassure au pied de la plage n'est pas considérée dans l'analyse des

profils de pente puisqu'elle est fortement contrôlée par la structure du canal et non par la granulométrie et les processus en place.

4.1.1.1 Modélisation numérique du profil de plage de l'Exp-1

Tel que mentionné ci-haut, le point initial de la pente calculée pour l'Exp-1 a dû être manuellement ajusté afin de correspondre à la limite extérieure du sommet de la berme. Cet exercice est très simple à accomplir *a posteriori*, mais difficile d'application *a priori*, soit dans le cadre d'un exercice de prévision de la pente d'équilibre d'un projet de recharge donné. En effet, autant le x que le z du point initial ont dû être ajustés afin de correspondre aux valeurs connues du profil final, mais n'auraient pu être ajustées avec certitude au préalable. Une approche numérique a donc été explorée afin d'identifier la hauteur et la position de la berme *a priori* pour un projet de recharge donné, soit l'Exp-1, et de valider l'efficacité du modèle numérique XBeach-G pour la simulation de profil de plage de gravier.

Depuis 2009, le logiciel libre XBeach (voir www.xbeach.org) offre une plate-forme gratuite, accessible et testée pour modéliser l'évolution d'un profil de plage. Plus récemment, une extension du logiciel, XBeach-G, est apparue. XBeach-G est toujours en développement. Ce modèle a été développé afin de mieux répliquer les processus qui sont propres aux plages dominées par le gravier tel que les processus d'infiltration/exfiltration et leur impact sur le transport sédimentaire et l'évolution du profil de plage (Jamal et al., 2014; McCall et al., 2014). Pour ce rapport, un modèle numérique d'évolution du profil de plage a été créé à l'aide de XBeach-G avec, comme intrants, les paramètres du modèle physique de l'Exp-1 ($D_{50}=12\text{mm}$, niveau d'eau=3,5 m, $H_s=0,84$ m, $T_p=5,6$ sec, géométrie initiale, durée de l'expérience = 16 heures). Le profil de plage final de la modélisation numérique est présenté à la figure 20.

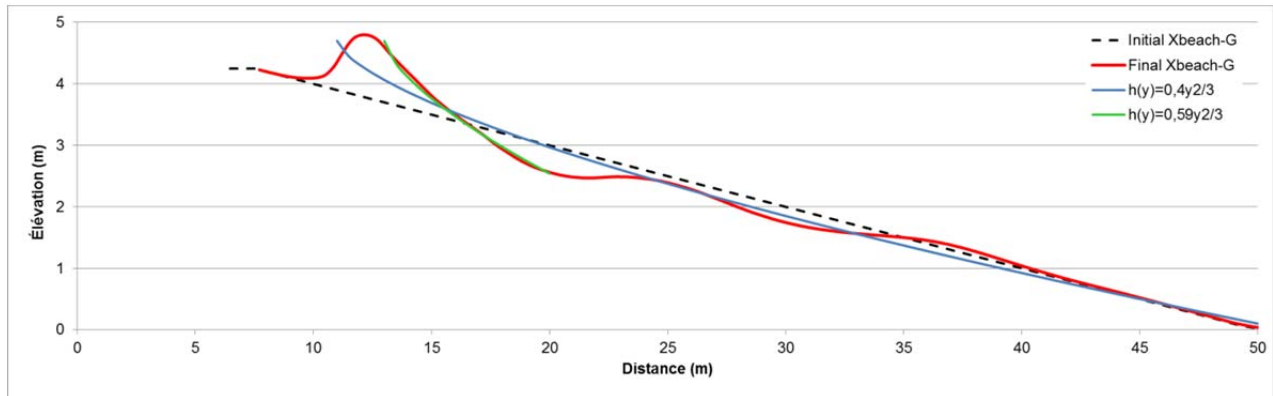


Figure 20. Profil initial et final (après 16h00 de vagues) de la plage pour la simulation numérique XBeach-G avec les paramètres intrants de l'Exp-1. Le profil d'équilibre selon l'équation de Dean pour un D_{50} de 12 mm ($h(y) = 0,4y^{2/3}$) est superposé au profil final et a le même point initial que pour la figure 19. Un D_{50} de plus de 60 mm ($A=0,59$) doit être utilisé afin d'approximer la pente caractérisant le haut de l'avant-plage à l'aide de l'équation de Dean.

Le profil de pente final modélisé par le logiciel XBeach-G n'offre que peu de ressemblance avec le profil de pente final mesuré en canal; le haut de l'avant-plage est beaucoup plus abrupt, la marche et le plateau sont absents, et une série de 2 barres sont présentes au bas de l'avant-plage. Par contre, la berme est bien présente au sommet de l'avant-plage et témoigne de l'accrétion de la plage sous l'effet des vagues de tempête. La hauteur maximale de la berme est identique (4,78 m) pour l'Exp-1 comme pour la simulation numérique, mais la position et la largeur de la berme diffèrent, excluant la possibilité d'utiliser ce logiciel dans sa version actuelle afin de délimiter le point initial pour le calcul de la pente d'équilibre selon l'équation de Dean dans le cadre d'un exercice de prévision de la pente d'équilibre d'un projet de recharge donné.

4.1.2 Expérience 2

L'expérience 2 est caractérisée par une pente initiale de 1:10, un niveau d'eau variable simulant deux marées complètes avec un marnage de 1,4 m (2,4 m à 3,8 m), une hauteur significative des vagues générées de 1 m, une période de 6 secondes pour une durée totale de l'expérience de 14 heures. Le profil final est ici présenté (Figure 21) et discuté dans un contexte de calcul de la pente d'équilibre.

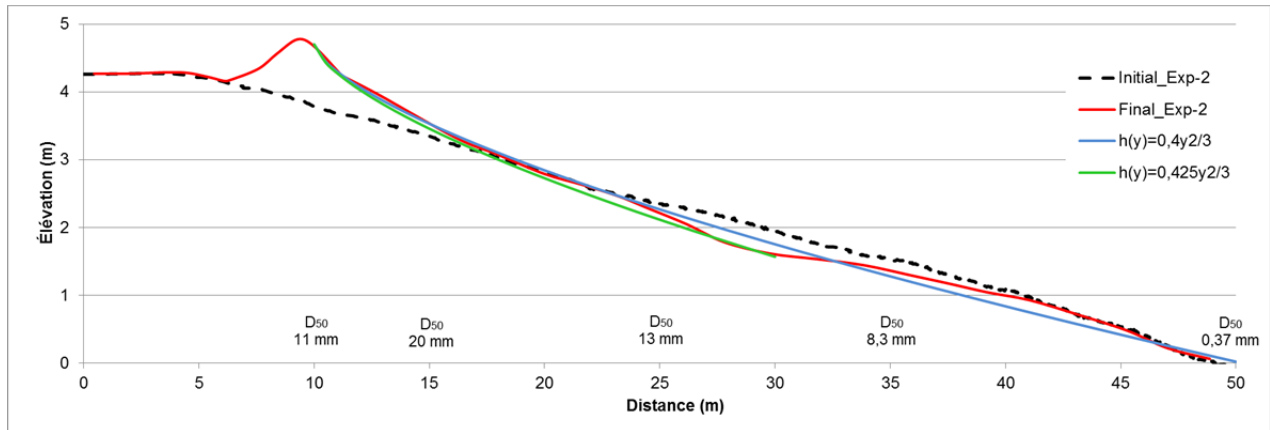


Figure 21. Profil initial et final (après 14h00 de vagues) de la plage pour l'Exp-2. Le profil d'équilibre selon l'équation de Dean pour un D_{50} de 12 mm ($h(y) = 0,4y^{2/3}$) est superposé au profil final offrant une bonne corrélation avec le profil mesuré en canal. Un profil d'équilibre basé sur un D_{50} de 15 mm ($h(y) = 0,425y^{2/3}$) est superposé sur la pente du haut de l'avant-plage. Le D_{50} des échantillons prélevés le long du profil final est indiqué au bas du graphique.

Le profil final de l'Exp-2 se démarque par sa morphologie beaucoup plus modérée que le profil de l'Exp-1. Le lissage des particularités morphologiques de l'avant-plage est attribué à la dispersion de l'énergie des vagues sur une plus grande surface due à l'effet de la marée. Ici encore on dénote une zone de progradation et d'accrétion sur le haut de l'avant-plage qui se présente sous la forme d'une berme mesurant 60 cm de hauteur et 5,5 m de largeur. Cette accumulation de gravier résulte de l'érosion de la plage dans la zone de déferlement et du transport sédimentaire presque exclusivement dirigé vers le haut de la plage, sauf pour une mince couche de sable moyen à grossier qui s'est déposé au pied de la plage.

Tout comme pour l'Exp-1, le profil d'équilibre dérivé de l'équation de Dean pour un D_{50} de 12 mm ($h(y) = 0,4y^{2/3}$) offre une bonne corrélation avec l'aspect général de la pente finale de l'Exp-2, indiquant que la plage en canal a atteint un profil d'équilibre suite à 14 heures de vagues de tempête et deux cycles complets de marée (Figure 21). Ici encore le point initial de la pente calculée a dû être manuellement ajusté afin de correspondre à la limite 'marine' (ou extérieure) du sommet de la berme. Quoiqu'encore présents, la marche et le plateau qui sont caractéristiques des plages de gravier sont moins prononcés que pour l'Exp-1 et se retrouvent plus bas sur l'avant-plage, soit sous la zone de déferlement à marée basse. Ceci a une implication directe sur la morphologie du haut de l'avant-plage qui double en longueur tout en préservant une valeur de pente plus élevée que l'ensemble du profil, mieux représentée par un D_{50} de 15 mm ($A=0,425$) avec l'équation de Dean.

La plage finale de l'Exp-2 présente un tri granulométrique qui est commun sur les plages de gravier; autant les plages mixtes que les plages de gravier pur se caractérisent par une augmentation de la taille des graviers avec l'augmentation de l'élévation du profil de plage, plus particulièrement au niveau du haut de l'avant-plage (Bluck, 1967; Carter & Orford, 1984; Buscombe & Masselink, 2006). La présence de sédiments ayant un D_{50} plus élevé sur le haut de l'avant-plage peut aussi être partiellement expliquée par le fait que l'Exp-2 se soit terminé à marée basse (2,45 m), le jet de rive ne se rendant pas jusqu'au sommet de la berme, mais s'infiltrant plutôt sur le haut de l'avant-plage, transportant avec lui des graviers plus grossiers vers le haut de la plage. Cette zone de gravier grossier aurait fort probablement migré vers la berme lors d'un cycle de marée montante subséquent.

4.1.2.1 Modélisation numérique du profil de plage de l'Exp-2

L'exercice de modélisation numérique à l'aide du logiciel XBeach-G a été répété avec comme intrants les paramètres de l'Exp-2 ($D_{50}=12\text{mm}$, niveau d'eau variable entre 2,4 m et 3,8 m pour 2 cycles de marée complets, $H_s=0,84$ m, $T_p=5,6$ sec, géométrie initiale, durée de l'expérience= 14 heures). Le profil de plage final de la modélisation numérique est présenté à la figure 22.

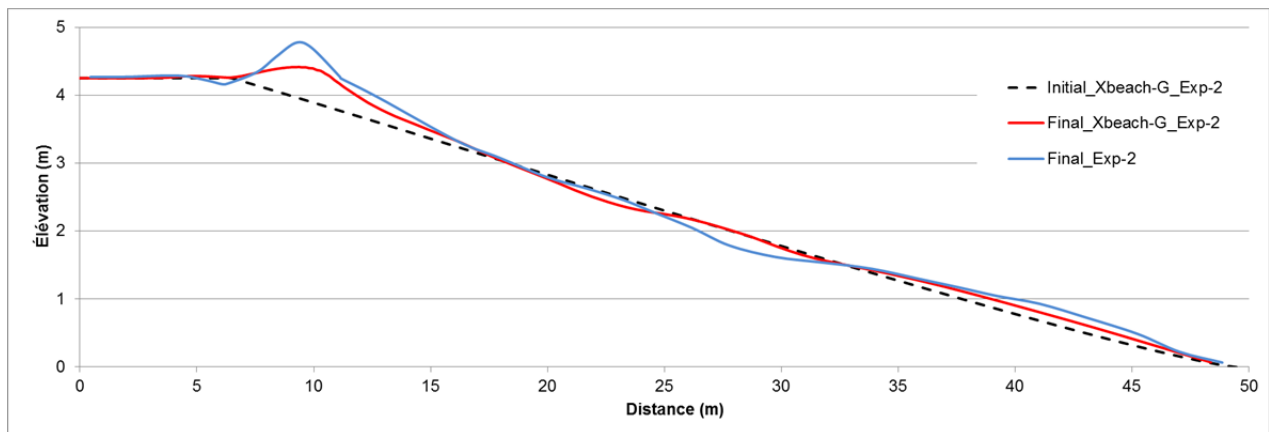


Figure 22. Profil initial et final (après 14h00 de vagues) de la plage pour la simulation numérique XBeach-G avec les paramètres intrants de l'Exp-2. Le profil final de l'Exp-2 en canal est aussi présenté à titre comparatif.

Le profil de pente final modélisé par le logiciel XBeach-G offre plusieurs similarités avec le profil final de l'Exp-2. L'accrétion au bas de l'avant-plage est présente sur les deux profils, quoique de façon plus importante sur le profil du modèle physique. L'érosion de la plage dans la zone de déferlement est aussi présente sur les deux profils, mais à des endroits différents et

son importance est sous-estimée dans le modèle numérique. L'accumulation de sédiments en haut de plage au niveau de la berme est grandement sous-estimée (d'environ 40 cm de hauteur) par le modèle numérique malgré que sa position soit similaire pour les 2 profils. Les résultats de la simulation numérique de l'Exp-2 excluent la possibilité d'utiliser ce logiciel dans sa version actuelle afin de délimiter le point initial pour le calcul de la pente d'équilibre selon l'équation de Dean dans le cadre d'un exercice de prévision de la pente d'équilibre d'un projet de recharge donné. Il serait cependant intéressant de manipuler les paramètres intrants du modèle afin de connaître leurs impacts respectifs sur le profil final. Plus particulièrement, l'augmentation de la durée de l'expérience numérique de 2 à 3 ou 4 cycles de marée pourrait influencer la position et la hauteur de la berme.

4.1.3 Expérience 3

L'Exp-3 est caractérisée par une pente initiale de 1:1, deux niveaux d'eau statiques pour des périodes données (2,5 m et 3,5 m), une hauteur significative des vagues générées de 1 m (premier niveau haut) et de 1,5 m (premier niveau bas et deuxième niveau haut), une période de 6 secondes pour une durée totale de l'expérience de 11 heures. Le profil final est ici présenté (Figure 23) et discuté dans un contexte de calcul de la pente d'équilibre.

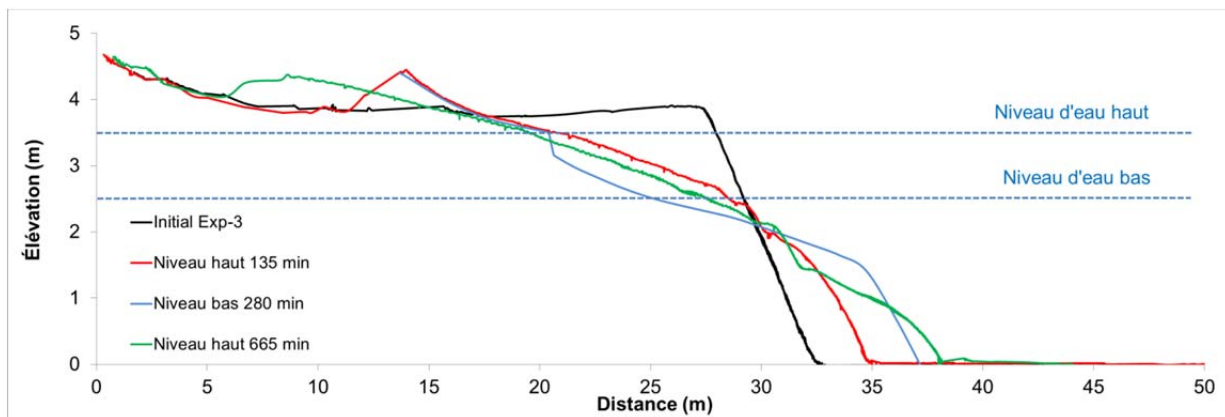


Figure 23. Évolution du profil de plage lors de l'Exp-3. La durée totale de l'expérience est de 11 heures et est séparée en 3 segments dont la durée est indiquée en minutes cumulatives sur ce graphique.

L'évolution du profil de plage pour l'Exp-3 met en évidence les processus de transport sédimentaire prédominants des plages de gravier. L'infiltration d'eau dans la plage résultant de la haute perméabilité des graviers est responsable de l'asymétrie du jet de rive (c.-à-d. la

vitesse et le volume du jet de rive sont grandement supérieurs au jet de retour) (Packwood, 1983; Carter & Orford, 1984; 1993). Cette asymétrie favorise le transport sédimentaire vers le haut de plage et limite grandement le transport du gravier vers le large. Le transport sédimentaire lié aux vagues et au jet de rive est responsable du développement d'une berme en haut de plage (courbes rouge et bleue sur la figure 23). La migration de la berme (courbe verte sur la figure 23) sur le haut de plage est une réponse typique des plages de gravier aux conditions de tempête extrême lors du dépassement de la crête par le jet de rive (*overwashing*). L'asymétrie du jet de rive faisant en sorte que le transport sédimentaire se fait presque uniquement vers la terre sous l'action des vagues, à long terme les plages de gravier ont tendance à migrer vers la terre par l'intermédiaire de cycles répétés d'accrétion et de migration de la berme (Carter & Orford, 1984; 1993).

La progradation du pied de plage résultant du transport du gravier vers le large est pour sa part fortement dominée par les processus gravitaires, eux-mêmes favorisés par l'instabilité de la pente initiale et les turbulences dans la colonne d'eau dues aux vagues. Ce transfert sédimentaire vers le large par gravité est insuffisant afin de rétablir l'équilibre du profil. Au final, l'équilibre du profil n'a pas été atteint malgré l'exposition de la plage à 11 heures de vagues, dont près de 400 minutes (6h20) pendant lesquelles les vagues avaient une hauteur significative de 1,5 m et le niveau d'eau était de 3,5 m (conditions de tempête extrême). Les résultats de l'Exp-3 témoignent de la grande inertie des plages de gravier qui découle de la haute valeur de cisaillement critique associée au transport du gravier (Carter & Orford, 1984; 1993; Forbes et al., 1991; 1995). À titre d'exemple, un courant de l'ordre de 80 à 130 cm s⁻¹ est nécessaire afin de transporter un gravier de 12 mm et un courant de plus de 130 cm s⁻¹ est nécessaire afin de l'éroder (c.-à-d. l'extraire de la plage) (Figure 24; McCave, 1984). Le temps et les conditions nécessaires à l'obtention d'un profil d'équilibre dans le cas d'un profil initial de 1:1 ne peut être calculé, mais est estimé être trop long pour qu'un profil initial aussi abrupte soit viable dans le cas d'une recharge de plage à caractère récréotouristique.

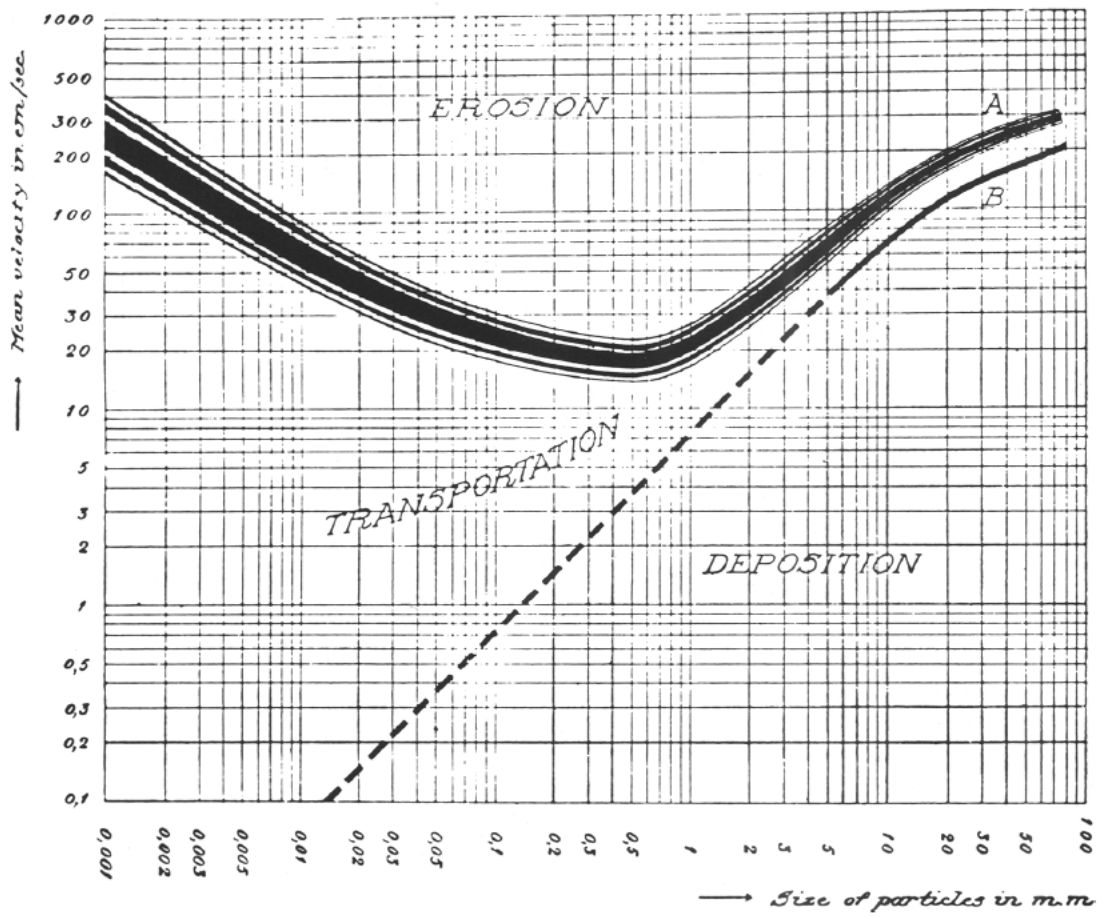


Figure 24. Diagramme des conditions critiques d'érosion, de transport et de dépôt des sédiments en milieu marin (Figure 1 dans McCave, 1984).

4.1.4 Expériences 4 à 6

L'Exp-4 est caractérisée par une pente initiale de 1:5, un niveau d'eau de 3,5 m, une hauteur significative des vagues générées de 1,5 m, une période de 6 secondes pour une durée totale de l'expérience de 6 heures. Le profil final est ici présenté (Fig. 25) et discuté dans un contexte de calcul de la pente d'équilibre.

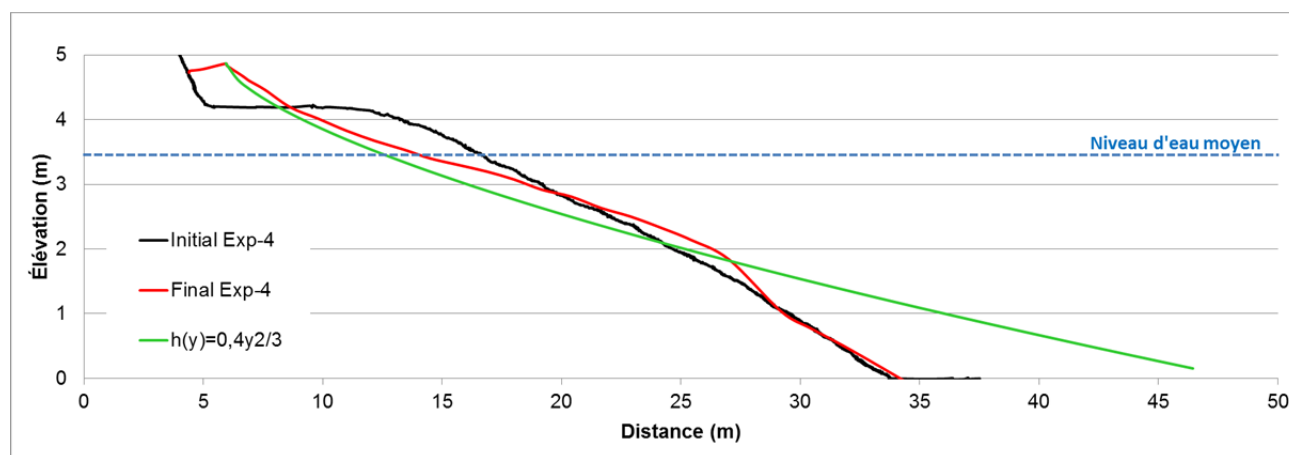


Figure 25. Profil initial et final (après 6h00 de vagues) de l'Exp-4. Le profil d'équilibre selon l'équation de Dean pour un D_{50} de 12 mm ($h(y) = 0,4y^{2/3}$) est superposé aux profils.

Le profil de plage final mesuré pour l'Exp-4 suite à 6 heures de vagues de tempête ne peut être considéré comme un profil mature ou en équilibre. Le profil d'équilibre dérivé de l'équation de Dean pour un D_{50} de 12 mm ($A=0,4$) est peu représentatif du profil final en canal. Deux pentes distinctes sont présentes; le haut de l'avant-plage est mieux représenté par un D_{50} de 7 mm ($A=0,335$) et le bas de l'avant-plage par un D_{50} de 30 mm ($A=0,495$) dans l'équation de Dean. La pente initiale de 1:5 étant plus stable au niveau de l'angle de repos des graviers que la pente initiale de l'Exp-3 de 1:1, les processus gravitaires n'ont pas été aussi actifs et la progradation du pied de plage est nulle dans le cas de l'Exp-4.

Un fait fort intéressant qui ressort des expériences 1 à 4 et qui est directement lié à l'angle de la pente initiale est la dynamique érosive qui découle d'une pente plus abrupte que la pente d'équilibre théorique pour un D_{50} donné. En effet, les expériences 1 et 2 sont dominées par une dynamique de progradation et d'accrétion du trait de côte alors que les expériences 3 et 4 démontrent un recul marqué du trait de côte de l'ordre de 7 à 12 mètres. Cette dynamique s'explique par la particularité du gravier à être principalement transporté vers la rive dû à l'asymétrie du jet de rive. En ce sens, l'atteinte de l'équilibre du profil n'est possible que par le

recul du haut de l'avant-plage puisque la progradation du bas de l'avant-plage n'est pas assurée par des processus de transport sédimentaire performants. Cette règle est répétée pour les expériences 5 et 6 (Figures 26 et 27).

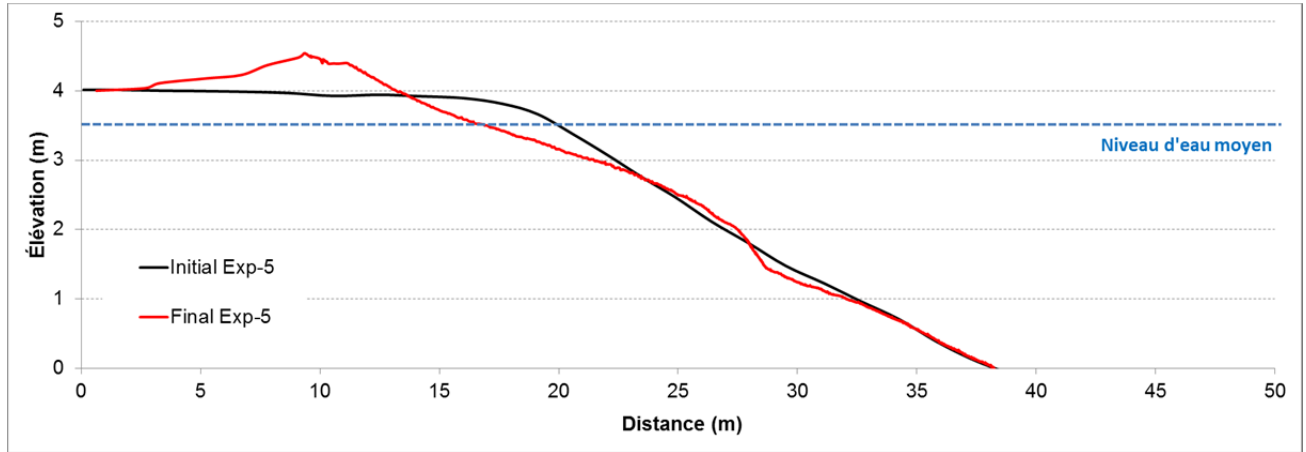


Figure 26. Profil initial et final de l'Exp-5. L'Exp-5 est caractérisée par une pente initiale de 1:5, un niveau d'eau de 3,5 m, une hauteur significative des vagues générées de 1 m, une période de 6 secondes pour une durée totale de l'expérience de 8 heures.

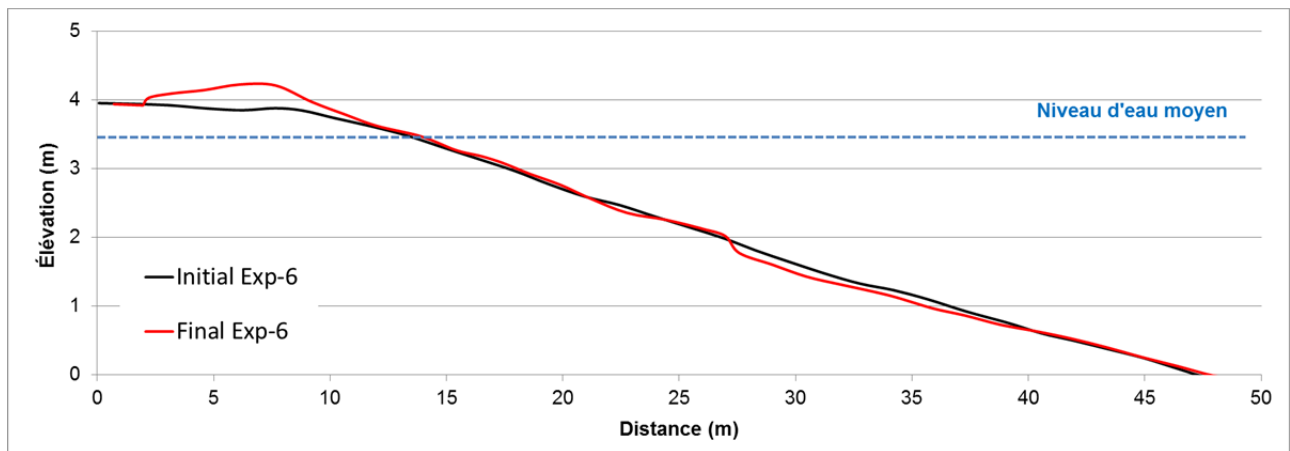


Figure 27. Profil initial et final de l'Exp-6. L'Exp-6 est caractérisée par une pente initiale de 1:10, un niveau d'eau de 3,5 m, une hauteur significative des vagues générées de 1,5 m, une période de 6 secondes pour une durée totale de l'expérience de 4 heures.

4.2 Hydrodynamique

L'hydrodynamique des vagues est fortement liée à la topographie du terrain et aux variations de profondeur d'eau au-dessus de la plage. Lorsque la morphologie de la plage se

stabilise, il en va de même pour l'hydrodynamique, en supposant que les conditions au pied de la plage demeurent les mêmes. Les variations de profondeur dans le temps influence donc la transformation des vagues et modifient entre autre la position du déferlement et la hauteur des vagues en un point donné. La Figure 28 présente la variation de la hauteur significative (H_s) des vagues au point de déformation maximal de la plage, situé dans la zone de déferlement pour l'Exp-1. La variation rapide de H_s au départ, visible sur le graphique, illustre à quel point la plage subit des changements importants dans les premiers instants de l'expérience (trois premières heures). Ces changements continuent à s'opérer par la suite, mais de façon moins rapide. La hauteur significative finit par se stabiliser au bout de 10 heures environ, signe que la plage est près d'atteindre ou a atteint son profil d'équilibre.

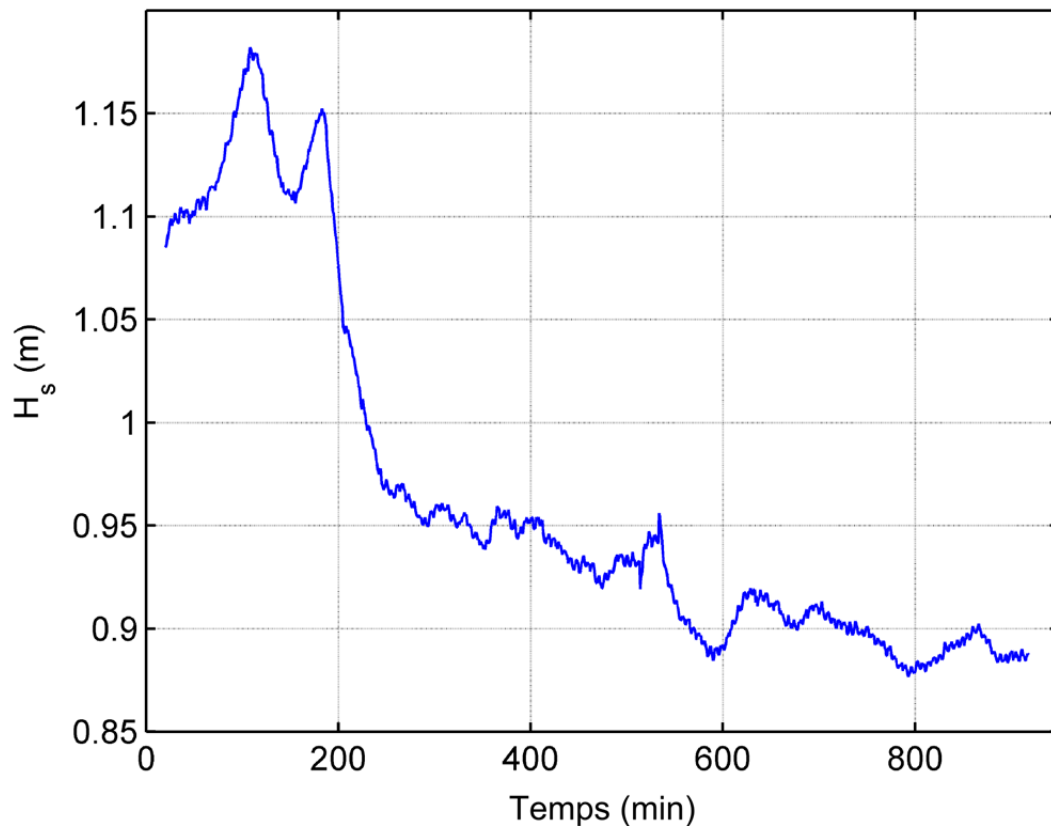


Figure 28. Exp-1 – Évolution de la hauteur significative des vagues dans la zone de déferlement, au point de déformation maximal de la plage ($x=25$ m).

La même analyse peut se faire pour l'Exp-2, sauf que dans ce cas, la variation du niveau d'eau par les effets de marée complexifie l'analyse. La Figure 29 présente à la fois le niveau d'eau dans le canal et la hauteur significative au milieu de la zone de déferlement (à $x=27$ m) en fonction du temps. Le point de déferlement, associé à l'endroit où la hauteur des

vagues est maximale, se déplace avec la marée. Les maximums locaux visibles sur le graphique correspondent donc au passage du point de déferlement vis-à-vis le point de mesure à $x=27$ m.

La baisse de la hauteur significative suivant ces maximums locaux peut correspondre à deux phénomènes distincts. Le premier se produit lorsque la marée est montante. Le point de déferlement s'éloigne vers le haut de la plage et une baisse de la hauteur significative est constatée puisqu'en amont du point de déferlement les vagues ont subi moins de transformation et ont gagné moins d'amplitude. Le deuxième phénomène se produit lors de la marée descendante. À ce moment, le point de déferlement recule derrière le point de mesure. La diminution de hauteur des vagues correspond alors au fait qu'une vague ayant déjà déferlé a perdu beaucoup d'énergie et est plus petite. La diminution est alors plus rapide qu'à marée montante. L'augmentation des hauteurs significatives s'explique par les mêmes phénomènes, mais dans le sens inverse.

Bref, bien qu'il soit difficile de conclure quant à l'atteinte du profil d'équilibre par l'étude de l'évolution de H_s en présence d'une marée, les grandes variations de hauteur significative en un point donné (autour de 50% de variation) montrent que le point de déferlement se déplace beaucoup avec le cycle de marée. La zone touchée par le déferlement des vagues est donc beaucoup plus grande qu'en l'absence de marée et une plus grande portion de la plage est affectée. Cela a pour effet de répartir l'énergie du déferlement sur une plus grande distance et ainsi d'observer un creux moins localisé dans la plage.

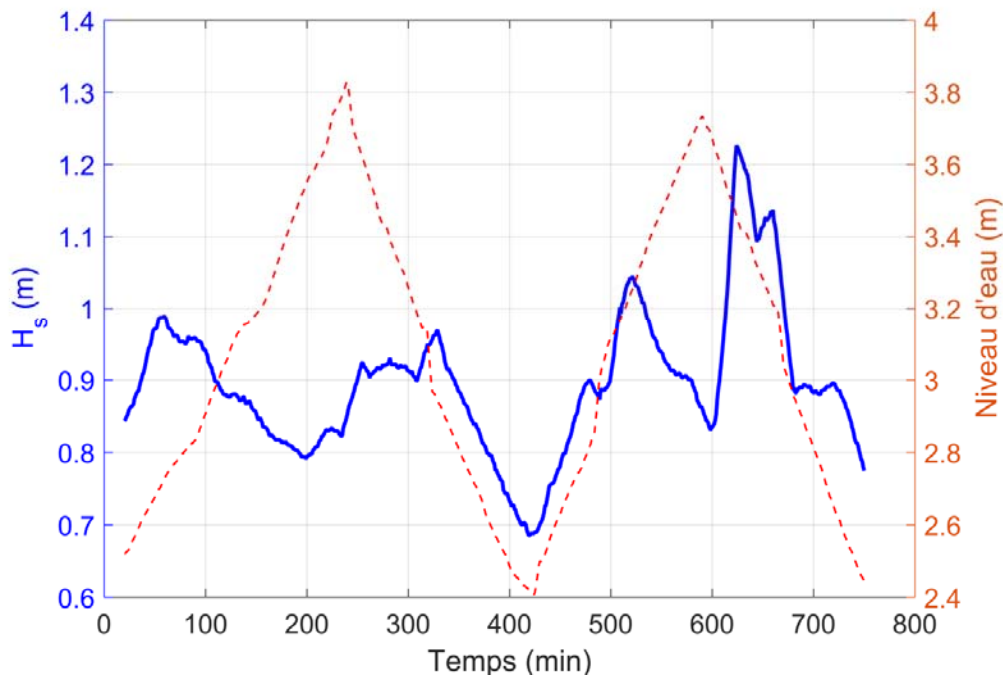


Figure 29. Exp-2 – Évolution de la hauteur significative des vagues au milieu de la zone de déferlement ($x=27$ m) et variation du niveau d'eau dans le canal.

4.3 Transport sédimentaire

4.3.1 Charriage

Dans les expériences réalisées en grand canal hydraulique, un transport sédimentaire orienté de la zone de déferlement vers le haut de plage a été observé. Ce transport sédimentaire est composé essentiellement de sédiments très grossiers (galets) qui sont mis en mouvement dans la zone de déferlement par les vagues et transportés par charriage jusqu'en haut de plage où les galets finissent par s'accumuler et former une berme de galets très bien triés. Pour expliquer physiquement ce phénomène, les profils de vitesses dans la zone précédant le déferlement (stations 9 et 10, figure 10) sont analysés à partir des données de l'Aquadopp et des Vectrino I pour l'Exp-2. Il est ainsi possible d'estimer l'importance du cisaillement des courants au fond. Cette grandeur est très importante, car elle est proportionnelle à la force par unité de surface (c.-à-d., pression) qui déplace les sédiments de la plage. Le transport net, incluant la matière en suspension et le charriage, est principalement

une expression de cette contrainte et des propriétés physiques du sédiment (Bagnold, 1956; 1966; Collins & Rigler 1982; Van Rijn, 1984a; 1984b).

La première constatation est que les orbitales de courant ne sont pas symétriques dans cette section, tel qu'anticipé (Grasso, Michallet, & Barthelemy 2011). Ceci implique que les vitesses sont plus grandes au passage des vagues que sous les creux. Au-dessus du fond et juste avant la zone de déferlement, les vitesses moyennes maximales atteignent $0,60 \text{ m s}^{-1}$ et $0,75 \text{ m s}^{-1}$ (Figure 30) aux stations 9 et 10, respectivement. Ces vitesses sont assez élevées pour transporter le gravier ($d_{50}=12 \text{ mm}$) vers le haut de la plage (Figure 31). Les vitesses minimales moyennes sont un peu plus faibles sous les creux des vagues, allant de $-0,50 \text{ m s}^{-1}$ à $-0,60 \text{ m s}^{-1}$ (Figure 30). L'accélération brutale créée par l'effondrement du front d'onde de la vague dans la zone de déferlement et du jet de rive peut générer des vitesses encore plus élevées. Théoriquement, ces vitesses sont de l'ordre de $1,0 \text{ m s}^{-1}$ à $1,5 \text{ m s}^{-1}$, pouvant même atteindre jusqu'à 5 m s^{-1} dans certains cas (Hughes et al., 1997). De telles vitesses horizontales dépassent largement la vitesse limite de mise en mouvement des sédiments fins tels que les sables, et sont suffisantes pour mettre en mouvement des galets ayant un diamètre inférieur à 30 mm . Sous l'effet de la gravité, le jet de rive ralentit ensuite rapidement et atteint une élévation maximale sur la plage, où les sédiments grossiers charriés par le jet de rive vont former une berme. Ainsi, l'asymétrie des courants induit donc des vitesses de courant plus grandes vers le haut de plage permettant donc au sédiment plus grossier de s'y accumuler.

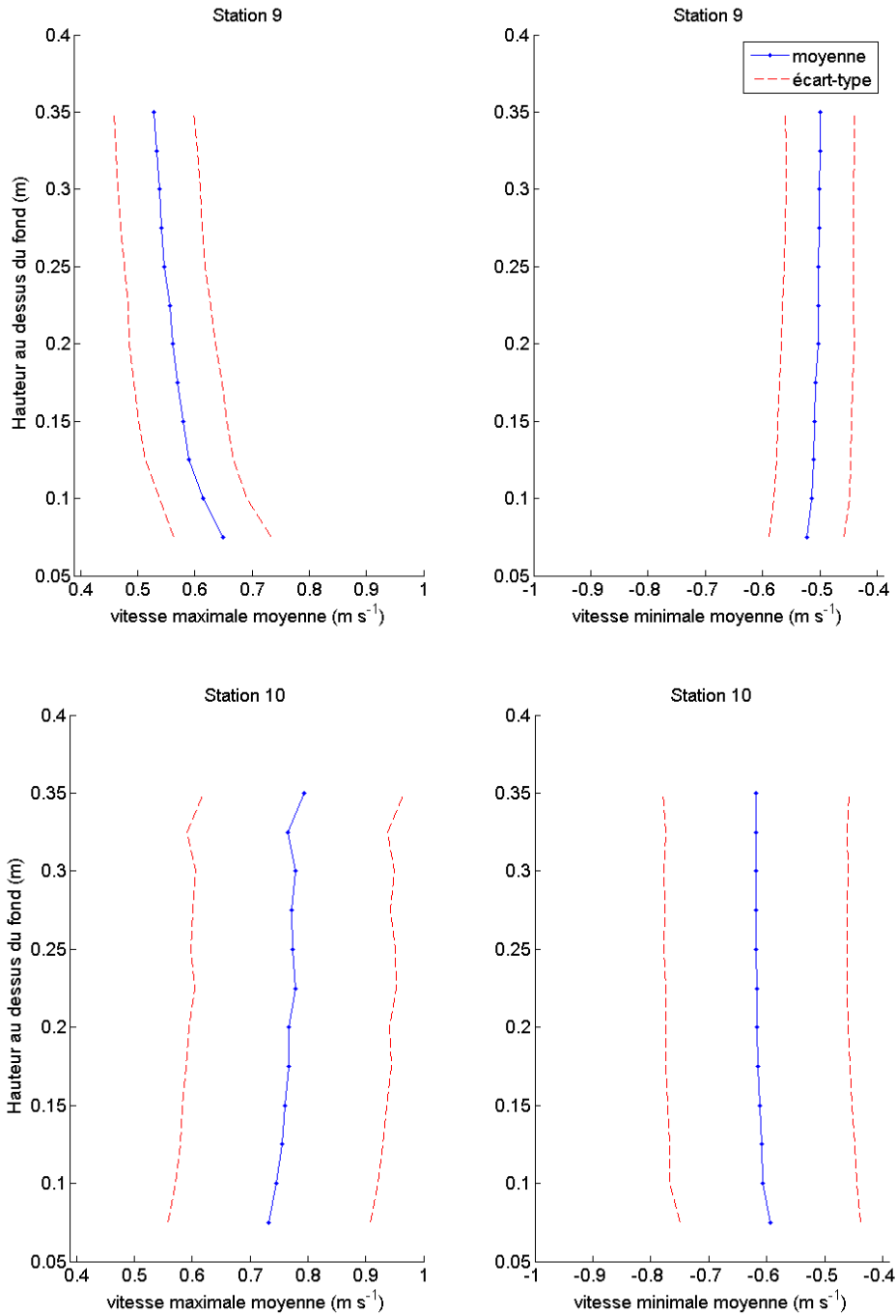


Figure 30. Vitesse maximale moyenne des courants en canal pour l'Exp-2 à la station 8 (au bas de l'avant-plage) et à la station 10 (près de la zone de déferlement, voir figure 10 pour plus de détail sur l'emplacement des sondes). Les valeurs positives indiquent un courant dirigé vers la plage et les valeurs négatives indiquent un courant vers le batteur.

4.3.2 Matière en suspension

Un transport sédimentaire secondaire a également été observé le long du profil. Celui-ci était orienté de la plage vers le large et était constitué essentiellement de sédiments fins (limons et sables très fins) mis en suspension par les déferlantes et transportés par les courants de retour vers le large. En fait, les particules effectuent une trajectoire sous forme orbitale au passage des vagues. Cette dernière est fermée pour des vagues linéaires. Cependant, ce n'est pas le cas pour des vagues non linéaires telles que mesurées sur la plage et dans la zone de déferlement.

Les mesures de vitesses obtenues dans la zone précédant le déferlement (stations 9 et 10) sont analysées à partir des données des Vectrino I et des Aquadopp pour l'Exp-2. Il fut observé que la vitesse moyenne n'est pas nulle dans cette zone. Selon les Vectrino I situés à 1 mètre du fond, les vitesses moyennes sont orientées vers le bas de plage et varient aux environs de -3 cm s^{-1} . Près du fond, les Aquadopp décrivent des vitesses de recul de l'ordre de -4 cm s^{-1} à -7 cm s^{-1} . Ce phénomène est dû au fait qu'il n'y ait pas de transport net d'eau vers la plage de sorte qu'un courant de retour s'installe afin d'avoir un flux d'eau nul vers la rive. Ainsi, les particules très fines qui demeurent en suspension, ayant une vitesse de chute très faible, reculent devant la plage. Elles se déposent là où les orbites des courants se referment et les vitesses moyennes deviennent plus faibles (c.-à-d., pour des profondeurs d'eau plus grande).

Les mesures de turbidité réalisées dans la zone précédant le déferlement (stations 9 et 10) sont analysées à partir des données des OBS3+ pour l'Exp-2. Les concentrations de cette matière en suspension atteignent les 0.7 g L^{-1} au début de l'expérience près du fond (Figure 31), et ce, là où les vitesses de recul sont les plus importantes. Cette fraction fine du sédiment sort du système en se déposant au-delà de la zone de déferlement et en forme une couche relativement homogène et uniforme de sédiments fins. Ces dépôts étant situés bien en dessous de la profondeur d'action des vagues, ils ne peuvent plus être remis en suspension et constituent donc une perte nette pour le budget sédimentaire côtier. Les concentrations de matière en suspension diminuent au cours de l'expérience (0.4 g L^{-1}) au fur et à mesure que les sédiments fins sont érodés de la surface de la plage.

Il faut dire que les zones de jet de rive et de déferlement situées tout juste après la section de mesure (zone de surf) sont les régions les plus dynamiques de la plage. Elles sont caractérisées par un écoulement transitoire non uniforme, une forte turbulence ainsi que la

présence de grandes quantités de sédiments et de bulles d'air (Longo et al., 2002; Puleo et al., 2003; Masselink & Puleo, 2006). C'est aussi la zone de la plage où l'essentiel du transport sédimentaire a lieu, une quantité importante de sédiments y étant transportée lors de chaque épisode de jet de rive (run-up) et de retrait (run-down) (Elfrink & Baldock, 2002; Masselink & Puleo, 2006). La concentration de sédiments en suspension peut y être 10 fois supérieure à l'ordre de grandeur rencontré dans la zone de surf (Osborne & Rooker, 1999).

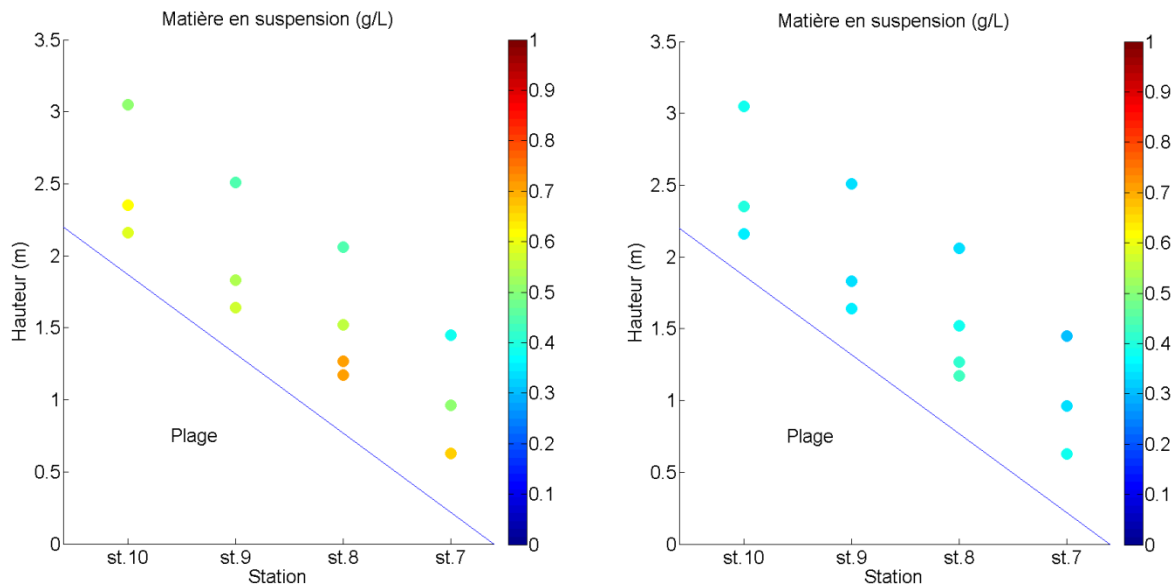


Figure 31. Concentration de la matière en suspension (en g L^{-1}) à marée haute mesurée par les OBS3+ pour l'expérience 2. Gauche : début de l'expérience. Droite : après un cycle de marée.

4.4 Granulométrie

Dans l'Exp-1, une berme de 50 cm de haut s'est rapidement développée à la limite du jet de rive, tandis qu'un creux d'avant-côte de 43 cm s'est formé dans la zone de déferlement. Dans le même temps, la crête de la plage a progradé de 3,7 m et la pente de la plage est passée de 1:10 à 1:6, tandis que le profil sous-marin (au-delà de la zone de déferlement) est resté proche de la pente initiale de 1:10. La plage a gagné $425 \text{ m}^3/\text{m}$ tandis que la plage sous-marine a perdu environ $350 \text{ m}^3/\text{m}$ dans la zone de déferlement. Un triage des sédiments constituant la plage a pu être observé le long du profil :

- La berme de tempête qui s'est développée en haut de plage était constituée de galets très bien triés. Deux modes dominaient la distribution granulométrique : des galets fins (voir tableau 9 pour les détails concernant la nomenclature utilisée) avec un diamètre médian (D_{50}) de 12 mm,

constituant 33% des sédiments présents, et des galets très grossiers ayant un D_{50} de 40 mm et constituant 31% des sédiments présents dans la berme. Les sables et les limons étaient quant à eux virtuellement absents de la berme, ne représentant que 12% et 1,3% respectivement des sédiments échantillonnés. De plus, ces sédiments fins n'ont été observés que dans les couches les plus profondes de la berme.

- La plage proprement dite était formée d'une couche de 15 à 20 cm d'épaisseur de galets fins bien triés ayant un D_{50} de 10 mm et constituant plus de 55% du sédiment présent. Sous cette couche de galets, le mélange initial de sable, graviers et galets pouvait être observé. Les galets grossiers et très grossiers étaient moins abondants sur la plage qu'au niveau de la berme, ne constituant respectivement que 10% et 14% du sédiment présent. Les granulométries plus fines, telles que les sables et les limons, étaient présentes dans les mêmes proportions que celles observées dans les couches profondes de la berme, avec respectivement 12,7% pour les sables et 2,6% pour les limons.
- Dans la zone de déferlement et au niveau du creux d'avant-côte, la granulométrie consistait en un mélange peu trié de sables moyens et grossiers ($D_{50} = 1$ mm; 52,5%), de graviers et de galets fins (44,6%) avec des traces de galets grossiers (2,2%) et de limons (0,6%).
- Au-delà de la zone de déferlement, la plage sous-marine était essentiellement constituée d'un mélange bimodal de galets fins à moyens ($D_{50} = 17$ mm; 43%) et de galets grossiers à très grossiers (43%), avec de faibles concentrations de sables (10%) et des traces de limons (2%).
- Finalement, une couche de 5 à 10 cm d'épaisseur de limons grossiers à très grossiers ($D_{50} = 40$ μm) a été observée au-delà du pied de la plage, à une distance de 50 m et plus du haut de la plage. Les limons constituaient 69% du sédiment trouvé dans cette zone, les sables très fins à fins constituant l'autre classe granulométrique dominante avec 29%. Seules des traces de sables très grossiers (1%) ont été observées tandis que les graviers et les galets sont totalement absents de cette zone. Des rides de courant ont également été observées à la surface de cette couche de sédiments fins.

Tableau 9. Classification granulométrique utilisée (d'après Wentworth (1924) et modifié par Ingram (1982)).

Classes granulométriques	Tailles
Cailloux	$D_{50} > 64 \text{ mm}$
Galets très grossiers	$25 < D_{50} \leq 64 \text{ mm}$
Galets grossiers	$19 < D_{50} \leq 25 \text{ mm}$
Galets moyens	$13 < D_{50} \leq 19 \text{ mm}$
Galets fins	$6 < D_{50} \leq 13 \text{ mm}$
Galets très fins ou graviers	$2 < D_{50} \leq 6 \text{ mm}$
Sables très grossiers	$1 < D_{50} \leq 2 \text{ mm}$
Sables grossiers	$0.5 < D_{50} \leq 1 \text{ mm}$
Sables moyens	$0.25 < D_{50} \leq 0.5 \text{ mm}$
Sables fins	$0,115 < D_{50} \leq 0.25 \text{ mm}$
Sables très fins	$0,063 < D_{50} \leq 0,125 \text{ mm}$
Limons très grossiers	$0,031 < D_{50} \leq 0,063 \text{ mm}$
Limons grossiers	$0,016 < D_{50} \leq 0,031 \text{ mm}$
Limons moyens	$0,008 < D_{50} \leq 0,016 \text{ mm}$
Limons fins	$0,002 < D_{50} \leq 0,008 \text{ mm}$
Argiles	$D_{50} \leq 0,004 \text{ mm}$

L'Exp-2 a consisté à évaluer les effets d'une variation de niveau d'eau sur l'évolution du profil de plage pour des conditions hydrodynamiques similaires à celles testées dans l'Exp-1. La variation du niveau d'eau tend à distribuer l'énergie des vagues sur une plus grande section du profil de plage, ce qui a pour résultat de « lisser » les structures morpho-sédimentaires qui se développent le long du profil, telles que la berme et le creux d'avant-côte.

Si la berme de tempête qui se développe en haut de plage, dans la zone de jet de rive de haute mer, atteint approximativement la même hauteur que dans l'Exp-1, le creux d'avant-côte qui se développe dans la zone de déferlement est significativement moins profond dans l'Exp-2 que dans l'Exp-1, atteignant à peine 0,35 m au lieu de 0,43 m. La largeur de l'arrière-plage a augmenté de 3 m et la pente d'équilibre s'est stabilisée à 1:7 sous l'influence combinée des vagues et de la variation de niveau d'eau.

La distribution granulométrique observée le long du profil de plage dans l'Exp-2 sous l'influence de variations de niveau d'eau est quasiment identique au triage granulométrique observé dans l'Exp-1 sans variation de niveau d'eau :

- La berme de tempête était formée de galets fins très bien triés ayant un diamètre médian (D_{50}) de 12 mm et formant 92% du sédiment total, tandis que les galets grossiers à très grossiers constituaient à peine 8% du sédiment présent dans la berme. Les sables et les limons étaient complètement absents de la berme, probablement parce que les couches les plus profondes de la berme de tempête n'ont pas été échantillonnées lors de l'Exp-2.
- La plage proprement dite était encore formée d'une couche de 15 à 20 cm d'épaisseur de galets grossiers bien triés (53%) mélangés à des galets très grossiers (30%). Les fractions plus fines (sables et limons) ne constituaient respectivement que 11% et 0,7% du sédiment présent.
- Dans la zone de déferlement et au niveau du creux d'avant-côte, la granulométrie consistait principalement de galets (97%), les galets fins constituant près de 66% du sédiment. Seules des traces de sables (2,2%) et de limons (0,4%) ont été observées dans cette zone. Cette différence par rapport à l'Exp-1 peut s'expliquer par la variation du niveau d'eau. Cette zone du profil correspond en effet à la plage de basse mer. La granulométrie de cette section du profil est donc plus proche de la granulométrie bien triée et plus grossière typique de la zone de plage que de celle, plus hétérogène et plus riche en sables, observée dans la zone de déferlement dans l'Exp-1.
- Au-delà de la zone de déferlement, la granulométrie consistait en un mélange peu trié de graviers et de galets fins ($D_{50} = 8$ mm; 63%) et de sables (20%), avec des traces de limons (2,7%).
- Enfin, au-delà du pied de la plage, la même couche de 5 à 10 cm d'épaisseur de limons grossiers à très grossiers ($D_{50} = 37$ μ m) a de nouveau été observée. Les limons constituaient plus de 72% du sédiment trouvé dans cette zone, tandis que les sables très fins à fins constituaient 27%.

Le tri granulométrique propre aux plages de gravier n'a pas atteint sa maturité à la fin des expériences, et ce pour toutes les expériences en canal. L'évolution vers une maturité du tri granulométrique pourrait à terme contribuer à la diminution de la valeur de la pente en haut de l'avant-plage. Masselink et Li (2001) ont calculé que l'asymétrie du jet rive résultant de la porosité propre aux plages de gravier et de l'infiltration d'eau qui y est rattachée augmentent de

façon significative, mais non linéaire pour une granulométrie supérieure à 1,5 mm. Cette relation est dépendante du degré de triage des graviers composant la plage; une plage composée de graviers bien triés (distribution unimodale rapprochée) est caractérisée par une conductivité hydraulique plus faible (Figure 32) qui se traduit par un profil de plage moins abrupte que pour un D_{50} équivalent, mais moins bien triés.

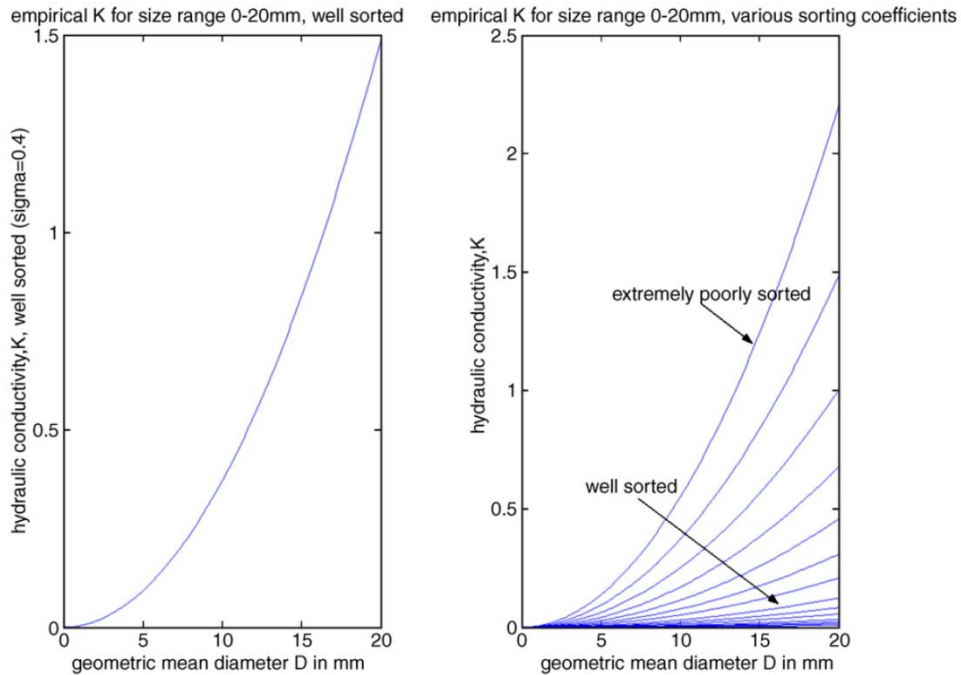


Figure 32. Relation entre la conductivité hydraulique, le D_{50} et le tri granulométrique pour le gravier. Figure tirée de la page 36 de Buscombe et Masselink (2006).

4.5 Réflectivité

Un aspect important des plages à considérer, lorsque celles-ci sont envisagées comme un ouvrage de protection côtière, est leur capacité à dissiper l'énergie des vagues. Lorsqu'une vague arrive sur une plage, une partie de son énergie est dissipée et/ou transmise à l'intérieur de la plage, tandis que le reste de l'énergie est réfléchi en direction du large. Le coefficient de réflexion de la plage peut se définir comme :

$$K_r = \frac{H_r}{H_i}$$

où H_i est la hauteur de la vague incidente et H_r est la hauteur de la vague réfléchi. De même, le coefficient de dissipation de la plage peut se définir comme :

$$K_d = 1 - K_r$$

Les processus de réflexion et de dissipation qui se produisent au niveau de la plage sont principalement contrôlés par deux caractéristiques de la plage soit la pente et la perméabilité. Sur une plage en pente douce, les vagues déferleront loin du rivage et une grande partie de leur énergie sera dissipée avant d'atteindre la plage, de sorte que la réflexion au niveau de la plage sera très limitée. Ces plages sont dites « dissipatives ». Inversement, des plages présentant une pente abrupte, comme des plages de gravier ou de galets, le déferlement des vagues se produira plus près du rivage et la pente générera une plus grande réflexion au niveau de la plage. Ces plages sont alors dites « réfléchives ». Le manuel d'ingénierie côtière américain (CEM, 2003) recommande d'utiliser la relation empirique développée par Seelig (1983) pour estimer le coefficient de réflexion théorique K_r d'un ouvrage de protection présentant une pente. Par contre, cette relation empirique ne prend en considération que la cambrure des vagues et la pente de la plage (Seelig & Ahrens, 1981) :

$$K_r = \frac{a\xi^2}{(b+\xi^2)}$$

où $a = 1.0$ et $b = 5.5$, et ξ est le paramètre de similarité, ou nombre d'Iribarren, défini comme (Battjes, 1974) :

$$\xi = \tan\beta \sqrt{\frac{L_o}{H_i}}$$

où $\tan\beta$ est la pente de la plage, L_o est la longueur d'onde de la vague en eau profonde et H_i est la hauteur de la vague incidente en eau profonde. Cependant, cette équation ne peut expliquer les résultats obtenus en laboratoire, car la porosité de l'ouvrage n'est pas prise en compte dans ces équations (Tableau 10). Une relation empirique alternative à celle de Seelig a été développée par Postma (1989) pour des pentes rocheuses sans débordements par les vagues qui s'approche davantage de nos résultats. Postma a introduit dans son équation la perméabilité k de la roche ou du sédiment, la pente de la plage β et la cambrure de la vague (H/L) pour arriver à la relation suivante (CEM, 2003) :

$$K_r = 0.071k^{-0.082} \cdot \cotan\beta^{-0.62} \cdot \left(\frac{H}{L}\right)^{-0.46}$$

La relation existant entre la granulométrie du sédiment constituant la plage et la pente de celle-ci a été démontrée par de nombreux auteurs qui établissent également un lien avec la

perméabilité du sédiment et les infiltrations du jet de rive dans la plage (p.ex. Bascom, 1951; McLean and Kirk, 1969; Sunamura, 1984; Masselink and Li, 2001; Wilson et al., 2008). La valeur de perméabilité k [$m s^{-1}$], aussi appelée la “conductivité hydraulique”, est une mesure de la facilité avec laquelle un fluide s’écoule au travers d’un matériau perméable. Il dépend des propriétés du sédiment (porosité, granulométrie et triage granulométrique) ainsi que des propriétés du fluide s’écoulant au travers du sédiment (densité ρ [$kg m^{-3}$] et viscosité dynamique μ [$kg m^{-1} s^{-1}$]). La perméabilité augmente lorsque la granulométrie du sédiment, le triage granulométrique et la porosité augmentent (Bascom, 1951; Pryor, 1973; Hughes et al., 1997; Masselink and Li, 2001; Reis & Gama, 2010). Une plage formée de sédiments grossiers aura une porosité et une perméabilité élevées, et une grande partie de l’énergie des vagues incidentes sera ainsi dissipée par les infiltrations du jet de rive dans la plage et par les écoulements inter-granulaires dans le sédiment. À l’inverse, une plage constituée de sédiments fins aura une faible porosité et une faible perméabilité, de sorte que les infiltrations seront moins importantes et une plus grande partie de l’énergie des vagues incidentes sera réfléchiée vers le large par la plage. Plusieurs auteurs (Barnes, 1995; López de San Román Blanco, 2003) fournissent des valeurs de perméabilité typiques pour le sable fin ($10^{-4} m s^{-1}$), le sable moyen ($10^{-3} m s^{-1}$), le sable grossier ($0,0065$ à $0,01 m s^{-1}$) et les graviers ($0,01$ à $10 m s^{-1}$). En utilisant une porosité de $0,01$ pour le gravier (López de San Román Blanco, 2003), les coefficients sont trop faibles pour expliquer la réflexion observée pour le mélange de gravier-galet du canal. Cependant, la perméabilité de plages constituées de sédiments mélangés (plages mixtes) est plus difficile à estimer, car si la perméabilité de plages purement de sable est faible et si la perméabilité des plages purement de galets est significativement plus élevée, la perméabilité des plages mixtes de sable et de galets dépend énormément des paramètres suivants (She *et al.*, 2007) : le triage granulométrique, les différentes classes granulométriques constituant le mélange sédimentaire et la proportion de ces différentes classes granulométriques dans le mélange sédimentaire.

Tableau 10. Coefficient de réflexion de différents ouvrages maritimes pour des paramètres de vagues incidentes similaires calculé en grand canal hydraulique entre 2012 et 2014.

Expériences en canal	H_s (m)	T_s (sec.)	L (m)	penne (y/x)	L_0/H	K_r mesuré	ξ	K_r (Seelig)	K_r (Postma)
Enrochement	1	6	33	0,17	33,0	0.04	0,96	0,14	N.A.
Enrochement	1,5	6	33	0,17	22,0	0.04	0,78	0,10	N.A.
Exp canal 2013	1,2	6	33	0,10	27,5	0.18	0,52	0,05	0,11
Exp-1	0,8	6	33	0,10	41,3	0.17	0,64	0,07	0,14
Grand canal mur	1,2	8	46	N.A.	38,3	0.45	N.A.	N.A.	N.A.

Ainsi, si les espaces inter-granulaires du sédiment grossier sont remplis de sédiments plus fins, ce qui se produit si la proportion de sédiment grossier dans le mélange sédimentaire est faible par rapport à la proportion de sédiment fin, la perméabilité de la plage sera relativement faible et sera proche de celle de plages constituées exclusivement de sédiments fins. Par contre, si les espaces inter-granulaires du sédiment grossier ne sont pas entièrement remplis de sédiments plus fins, parce que ceux-ci sont présents en de plus faibles proportions ou parce que le sédiment est mieux trié, la perméabilité du mélange sera plus élevée et sera plus proche de celle d'une plage exclusivement constituée de sédiments grossiers.

Holmes et al. (1996) a aussi réalisé des expériences en laboratoire à petite échelle en utilisant des modèles physiques de plages, constituées d'un mélange bimodal (50/50) de sable moyen (0,5 mm) et de sable très grossier (1,5 mm). Ces plages étaient soumises à des régimes de vagues irrégulières afin d'étudier l'influence des principaux facteurs sur l'évolution du lit sableux. L'évolution du profil de plages constituées d'un mélange bimodal s'est révélée être similaire à l'évolution du profil de plages constituées exclusivement de sables fins, malgré qu'un triage sédimentaire important ait été observé au cours de ces expériences. Holmes et al. (1996) démontrent que la perméabilité est essentiellement contrôlée par les 10% des sédiments les plus fins du mélange, et ils concluent que la perméabilité des sédiments est le principal paramètre qui contrôle l'évolution du profil des plages.

Mason et Coates (2001) ont également conduit plusieurs expériences à petite échelle afin d'étudier plus en détail la perméabilité de mélanges de sable et de galets. Les mélanges

étaient constitués de graviers fins ayant un D_{50} de 4 mm mélangés à des concentrations croissantes (par intervalle de 10%) de sables fins ($D_{50} = 0.159$ mm), de sables moyens ($D_{50} = 0.356$ mm) et de sables grossiers ($D_{50} = 0.846$ mm) bien triés. Les résultats de Mason et Coates montrent que la présence de sable enclavé au sein de la population de galets et comblant les espaces inter-granulaires a une très grande influence sur la perméabilité des plages mixtes comparées aux plages de galets pures. Un mélange contenant seulement 20% de sables moyens et 80% de galets présente une perméabilité réduite de 65% par rapport à celle d'une plage constituée exclusivement de galets. Lorsqu'il s'agit de 20% de sables fins, la perméabilité de la plage diminue de près de 90%. Mason explique cette réduction importante de la perméabilité pour une concentration croissante de sable par le fait que les espaces inter-granulaires des galets sont peu à peu remplis par le sable, la perméabilité du mélange se rapprochant de plus en plus de celle d'une plage constituée exclusivement de sable lorsque la proportion de sable dans le mélange atteint approximativement 30 à 40%.

Une autre observation intéressante faite par Mason est que l'ajout de 10 à 60% de galets à un mélange riche en sable n'augmente pas la perméabilité du mélange comme on pourrait intuitivement le croire, mais réduit au contraire la perméabilité du mélange sédimentaire. Mason explique ce phénomène par le fait que de telles concentrations de galets ne font qu'augmenter la complexité du chemin que le fluide doit parcourir au sein du sédiment, réduisant ainsi l'efficacité du mélange sédimentaire à dissiper et transmettre l'énergie des vagues à l'intérieur de la plage. Seules des concentrations de galets supérieures à 60% permettent d'augmenter significativement la perméabilité du mélange et de réduire efficacement la réflectivité de la plage.

En se basant sur les résultats de Mason et sur la composition granulométrique du mélange sédimentaire utilisé dans le cadre nos expériences à grande échelle en canal hydraulique, la perméabilité de la plage modélisée en canal peut être estimée à environ $0,007 \text{ m s}^{-1}$, le mélange sédimentaire utilisé contenant approximativement 30% de sable grossier.

Une fois la perméabilité de notre plage connue, l'équation de Postma (page 68) peut être utilisée pour évaluer le coefficient de réflexion théorique de la plage. Les résultats, présentés dans le tableau 11, indiquent que le coefficient de réflexion varie entre 8% pour des vagues de 1,5 m d'amplitude et 4 secondes de période, et 14% pour des vagues de 1 m d'amplitude et 8 secondes de période. Ces valeurs théoriques sont proches des coefficients de

réflexion déterminés par calcul à partir des mesures de vagues faites dans le canal durant les expériences (Tableau 10).

Bien que les valeurs théoriques calculées pour la plage soient proches des coefficients de réflexion déterminés à partir des mesures faite en laboratoire, l'erreur demeure très grande (35 %). Ceci vient principalement du fait que l'on doit connaître, outre la pente de la plage, la cambrure des vagues et la conductivité hydraulique du sol. L'incertitude sur les valeurs de référence fait en sorte qu'il est plus précis, dans ce cas, de déterminer le coefficient de réflexion en laboratoire selon la mixture de sédiments et le spectre de vagues appropriés. Bien que les valeurs théoriques calculées pour la plage (Tableau 11) soient proches des coefficients de réflexion déterminés à partir des mesures faites en laboratoire (Tableau 10), l'erreur demeure très grande (35 %). Ceci vient principalement du fait que l'on doit connaître, outre la pente de la plage, la cambrure des vagues et la conductivité hydraulique du sol.

Tableau 11. Coefficients de réflexion théorique de la plage modélisée en canal pour différentes amplitudes et périodes de vagues.

H	T	Kr
1,5	4	0,08
1,5	6	0,10
1,5	8	0,11
1,2	4	0,09
1,2	6	0,11
1,2	8	0,13
1	4	0,10
1	6	0,12
1	8	0,14

5. Conclusions et recommandations

La littérature scientifique traitant des plages de gravier naturelles atteste du fort niveau de résilience des plages naturelles de gravier face aux tempêtes et aux niveaux d'eau extrêmes (e.g. Carter & Orford, 1984; Orford et al., 2003; St-Hilaire-Gravel et al., 2012). Dans une revue exhaustive des projets de recharge de plage avec du gravier dans la région du Détroit de Puget en Oregon, Shipman (2001) confirment que cette approche connaît un grand succès dans la réduction de l'érosion côtière sur les côtes paraglaciaires de cette région de l'Oregon. De plus, les quelques expériences de terrain documentées combinant la recharge de gravier et les murs de protections témoignent d'une grande stabilité de la recharge, de la protection du pied du mur de protection et d'une diminution du franchissement des vagues en plus de la création d'une surface de plage pouvant servir à des fins récréotouristiques (Cammelli et al. 2004; Kumada et al., 2010). En ce sens, l'adaptation de cette méthode douce de contrôle de l'érosion côtière aux conditions propres au Québec maritime Laurentien mérite d'être sérieusement envisagée.

La modélisation physique d'une recharge de gravier en canal hydraulique a permis de conclure les faits suivants et d'avancer les recommandations citées ci-bas.

Le concept de pente d'équilibre tel que calculé à l'aide de l'équation de Dean offre une bonne corrélation avec l'aspect général des pentes finales des expériences 1 et 2, indiquant que la plage en canal a atteint un profil d'équilibre lors de ces 2 expériences et validant l'utilisation de cette équation pour les plages de gravier. Par contre, le point initial de la pente calculée doit être manuellement ajusté afin de correspondre à la limite 'marine' (ou extérieure) du sommet de la berme. En effet, le calcul de la pente d'équilibre à partir de l'intersection du niveau moyen de l'eau et de la plage tel que recommandé par Dean (2002) ne tient pas compte de la progradation et de l'accrétion de la berme de gravier par l'activité des vagues, sous-estimant grandement le volume de sédiment nécessaire à l'atteinte d'un profil d'équilibre. En ce sens, le calcul de la pente d'équilibre selon l'équation de Dean ne peut être utilisé à des fins prédictives.

Le logiciel XBeach-G de simulation numérique de l'évolution du profil de plage de gravier n'a su répliquer les profils finaux des modèles physiques des expériences 1 et 2 malgré

que les intrants aient été identiques. Conséquemment, ce logiciel ne peut être utilisé avec confiance en tant qu'outil de prévision de l'évolution d'un profil de plage de gravier. De plus, le logiciel XBeach-G n'a pas su répliquer la position (Exp-1) et la hauteur (Exp-2) de la berme et ne peut donc pas être utilisé dans sa version actuelle afin d'identifier, *a priori*, le point initial du calcul de la pente d'équilibre dans un contexte de recharge de plage avec du gravier. La modélisation numérique de l'évolution d'un profil de plage offre tout de même un potentiel intéressant en tant qu'outil de prévision des recharges de gravier. Le logiciel libre XBeach-G requiert par contre d'être encore amélioré et étalonné avec des modèles physiques afin d'améliorer sa fiabilité avant de pouvoir être utilisé avec confiance.

La pente initiale de la recharge a un impact important sur la dynamique du trait de côte au cours des événements de tempête suivant la mise en place de la recharge. En effet, une pente initiale plus abrupte que la pente théorique calculée pour un D_{50} donné conduit à une dynamique érosive et à une migration du trait de côte vers la terre sous l'effet des vagues. À l'opposé, une pente initiale de recharge plus faible ou similaire à la pente théorique calculée pour un D_{50} donné mène à la progradation du trait de côte sous l'action des vagues de tempête.

De plus, l'atteinte d'un profil d'équilibre est relativement rapide (après environ 10 heures de vague pour l'Exp-1) dans le cas d'une pente initiale de recharge plus faible ou similaire à la pente théorique calculée pour un D_{50} donné. Dans ces cas, la recharge démontre un haut niveau de résilience et de stabilité sous l'effet des vagues de tempête. À l'opposé, les recharges ayant une pente initiale de 1:1 ou de 1:5 n'atteignent pas un profil d'équilibre dans un délai raisonnable, même après 11 heures de vague de tempête et des niveaux d'eau élevés.

L'équation de Dean simplifie grandement la complexité morphologique des plages de gravier. Ainsi, la pente du haut de l'avant-plage peut être sous-estimée de façon significative. Ceci a des conséquences majeures lorsque la recharge se veut une méthode douce de contrôle de l'érosion côtière dans un contexte de plage à valeur récréotouristique. Le haut de l'avant-plage est la partie de la plage où les touristes marchent et profitent du soleil. Une forte pente peut nuire à ces activités. Il est donc nécessaire de garder en tête que le haut de l'avant-plage aura probablement une pente plus abrupte que celle calculée pour le profil entier avec l'équation de Dean.

La variation du niveau d'eau tend à distribuer l'énergie des vagues sur une plus grande section du profil de plage, ce qui a pour résultat de « lisser » les structures morpho-sédimentaires qui se développent le long du profil, telles que la berme et le creux d'avant-côte.

Les expériences en grand canal hydraulique ont confirmé que la fraction de sédiments les plus fins a tendance à être rapidement mise en suspension par la dynamique des jets de rive et à être transportée vers le large où elle sort du système côtier et constitue une perte nette pour le bilan sédimentaire de la plage.

Le calcul du coefficient de réflexion des vagues est fondamental pour la conception d'ouvrages maritimes. Il a été observé lors de nos expériences que la plage composée de sable et gravier avait un coefficient de réflexion plus grand que l'enrochement de pente douce mais beaucoup plus faible que pour un mur vertical sans déflecteur. L'incertitude sur les valeurs de référence fait en sorte qu'il est plus précis, dans ce cas, de déterminer le coefficient de réflexion en laboratoire selon la mixture de sédiments et le spectre de vagues appropriés. Des études plus approfondies sur la composition de la plage en pourcentage de sables, graviers et galets, permettraient d'optimiser la mixture de la recharge pour qu'elle soit la plus absorbante possible.

5.1 Recommandations

Il est recommandé de déposer le sédiment de la recharge de sorte à ce que la géométrie initiale de la recharge se rapproche le plus possible de la pente d'équilibre théorique calculée pour un D_{50} donné afin d'assurer la stabilité ou la progradation du trait de côte.

Il est déconseillé d'utiliser le calcul de la pente d'équilibre à partir de l'intersection du niveau moyen de l'eau et de la plage tel que recommandé par Dean (2002) en tant qu'outil de prévision de l'évolution d'un profil de plage de gravier dans un contexte de recharge.

Il est recommandé d'utiliser une granulométrie à distribution uni-modale comprise entre le gravier fin et le gravier grossier, avec des concentrations de sables les plus faibles possibles et un bon triage granulométrique. Cette composition granulométrique favorise la perméabilité de la plage ce qui améliore de façon significative sa capacité à dissiper l'énergie des vagues incidentes et à protéger le littoral.

L'utilisation d'un mélange sédimentaire présentant une distribution granulométrique étendue (hétérogène) et mal triée est déconseillée car la fraction fine tend à sortir rapidement du système côtier et conduit à une sous-estimation des volumes nécessaires à l'atteinte du profil d'équilibre et de la largeur de berme souhaités par les concepteurs de la recharge.

5.2 Travaux futurs

Les expériences rapportées dans ce rapport ont été réalisées en utilisant une seule distribution granulométrique. Des études complémentaires sont nécessaires afin de préciser l'influence de la granulométrie, du triage et des mélanges de plusieurs granulométries différentes sur le profil d'équilibre de la recharge et sur son efficacité à dissiper l'énergie des vagues incidentes. Des études plus approfondies sur la composition de la plage en pourcentage de sable, gravier et galets, permettraient d'optimiser la mixture de la recharge pour qu'elle soit la plus absorbante possible.

Les spectres de vagues de l'estuaire et du golfe du St-Laurent sont méconnus et très peu de données de terrain existent afin de palier à cette lacune. En ce sens, une meilleure caractérisation des spectres de vague typiques des régions du St-Laurent qui sont affectées par l'érosion côtière doit être faite à partir d'études de terrain telles que celle réalisée pour ce rapport. Cette meilleure caractérisation des spectres de vague typiques des régions du St-Laurent permettra d'étalonner le spectre de vague produit en canal hydraulique afin d'utiliser un spectre de vague plus représentatif lors de modélisations physiques futures.

Plus de temps devrait être alloué aux expériences en grand canal ainsi qu'aux expériences en modélisation numérique afin de s'assurer de l'atteinte d'un profil d'équilibre et de quantifier le temps nécessaire à l'atteinte d'un tel équilibre pour des conditions données.

Le modèle physique en canal hydraulique tel que développé pour ce contrat ignore le rôle du transport sédimentaire par dérive littoral. Ce processus doit être étudié et quantifié afin de prévoir la durée de vie d'une recharge.

Bibliographie

- Allan C.J., Geitgey R. and Hart R, (2005). Dynamic Revetment for Coastal Erosion in Oregon, Final report for Oregon Dept. of Transportation. SPR620, 90 p.
- Allard, M. (1981). L'Anse aux Canards, Île d'Orléans, Québec : évolution holocène et dynamique actuelle. *Géographie physique et Quaternaire*, 35, 133-154.
- Anthony, E., Cohen, O., et Sabatier, F. (2011). Chronic offshore loss of nourishment on Nice beach, French Riviera: A case of over-nourishment of a steep beach? *Coastal Engineering*, 58, 374-383.
- Basco, D.R. (1998). The economic analysis of 'soft' versus 'hard' solutions for shore protection: an example. Proceedings of 26th Conference on Coastal Engineering, Copenhagen, Denmark, 1449-1460.
- Bascom, W. N. (1951). The relationship between sand size and beach-face slope. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 32(6), 866-874.
- Battjes. J. A. (1974). Surf Similarity. Proceedings of the 14th International Conference on Coastal Engineering. American Society of Civil Engineers, Copenhagen, Denmark 466-479.
- Benedet, L., Finkl, C., Campbell, T., and Klein, A. (2004). Predicting the effect of beach nourishment and cross-shore sediment variation on beach morphodynamic assessment. *Coastal Engineering*, 51, 839-861.
- Benoit, M., Teisson, C. (1994). Laboratory study of breakwater reflection – effect of wave obliquity, wave steepness and mound slope. International Symposium: Waves – physical and numerical modelling. Canadian Society of Civil Engineers; 1021-1030
- Bernabeu, A., Medina, R., et Vidal, C. (2003a). Wave reflection on natural beaches: an equilibrium beach profile model. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*, 57, 577-585.

- Bernabeu, A., Medina, R., et Vidal, C. (2003b). A morphological model of the beach profile integrating wave and tidal influences. *Marine Geology*, 197, 95-116.
- Bernatchez, P., et Dubois, J.-M. (2004). Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime. *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 58, n° 1, 45-71.
- Bernatchez, P., et Fraser, C. (2012). Evolution of coastal defence structures and consequences for beach width trends, Québec, Canada. *Journal of Coastal Research* 28 (6), pp. 1550-1566.
- Bodge, K. (1992). Representing equilibrium beach profiles with an exponential expression. *Journal of Coastal Research*, 8, 47-55.
- Bretschneider, C. L. (1959). Wave variability and wave spectra for wind-generated gravity waves. Technical memo 118 (No. TM-118), ed. by Corps Of Engineers Washington DC Beach Erosion Board, USA. 196 pages.
- Browder, A., and Dean, R. (2000). Monitoring and comparison to predictive models of the Perdido Key beach nourishment project, Florida, USA. *Coastal Engineering*, 39, 173-191.
- Bruun, P. (1954). *Coastal erosion and the development of beach profiles*. Beach Erosion Board Tech. Mem. 44. Washington D.C., USA: US Army Corps of Engineers.
- Buscombe, D., Masselink, G. (2006). Concepts in gravel beach dynamics. *Earth-Science Reviews*, 79, 33-52.
- Capobianco, M., Hanson, H., Larson, M., Steetzel, H., Stive, M. J. F., Chatelus, Y., Karambas, T. (2002). Nourishment design and evaluation: applicability of model concepts. *Coastal Engineering*, 47(2), 113-135.
- Carter, R.W.G., Orford, J.D. (1984). Coarse clastic barrier beaches: a discussion of the distinctive dynamic and morphosedimentary characteristics. *Marine Geology*, 60, 377-389.
- Daigneault, M. (2001). *Processus d'altération/érosion à l'interface océan/continent/atmosphère: aspects quantitatifs et semi-quantitatifs. Exemple des falaises de l'est du Canada (Gaspésie)*. École nationale des Mines de Sainte-Étienne, Saint-Étienne, France:

- Dean, R. (1977). *Equilibrium beach profiles: U.S., Atlantic and Gulf coasts. Ocean Eng. Tech. Rep. 12*. Newark, DE, USA: University of Delaware.
- Dean, R. (1991). Equilibrium beach profiles: Characteristics and applications. *Journal of Coastal Research*, 7, 53-84.
- Dean, R. (2002). *Beach nourishment – Theory and practice*. Singapour: World Scientific.
- Dionne, J-C. (1986). Érosion récente des marais intertidaux de l'estuaire du Saint-Laurent. *Géographie physique et Quaternaire*, 40 : 307-323.
- Dionne, J-C. (1999). L'érosion des rives du Saint-Laurent : vue d'ensemble et état de la question, p. 2-19. Dans Actes : Colloque régional sur l'érosion des berges : vers une gestion intégrée des interventions en milieu marin (Baie-Comeau, 19 au 21 février 1999). Municipalité régionale de comté (MRC) de Manicouagan et Comité de la Zone d'intervention prioritaire (ZIP) de la rive nord de l'estuaire, Baie-Comeau, 207 p.
- Di Risio, M., Lisi, I., Beltrami, G., and De Girolamo, P. (2010). Physical modeling of the cross-shore short-term evolution of protected and unprotected beach nourishments. *Ocean Engineering*, 37, 777-789.
- Dubois, J.-M. (1999). Dynamique de l'érosion littorale sur la Côte-Nord du Saint-Laurent. *Colloque régional sur l'érosion des berges: vers une gestion intégrée des interventions en milieu marin*, (pp. 20-52). Baie-Comeau, QC, Canada.
- Elfrink, B. and Baldock, T. (2002). Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone : a review and perspectives. *Coastal Engineering* 45, 149–167.
- Elko, N., and Wang, P. (2007). Immediate profile and planform evolution of a beach nourishment project with hurricane influences. *Coastal Engineering*, 54, 49-66.
- Fenneman, N. (1902). Development of the profile of equilibrium of the subaqueous shore terrace. *Journal of Geology*, 10, 1-32.
- GENIVAR (2012). *Analyse de solutions en érosion côtière à l'anse aux Coques, Sainte-Luce*. Rapport de GENIVAR inc. à la municipalité de Sainte-Luce. 131 p. et annexes.
- GIEC. (2013). *Climate Change 2013 - The Physical science basis*. Cambridge University Press.

- GIEC. (2014). *Climate Change - Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press.
- Goda, Y., and Suzuki, T. (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. Proceedings of 15th Conference on Coastal Engineering, Honolulu, Hawaii, 828-845.
- Grasso, F. M., and Barthélemy, E. (2011). Experimental simulation of shoreface nourishments under storm events: A morphological, hydrodynamic, and sediment grain size analysis. *Coastal Engineering*, 58, 184-193.
- Grunnet, N., and Ruessink, B. (2005). Morphodynamic response of nearshore bars to a shoreface nourishment. *Coastal Engineering*, 52(2), 119-137.
- Hamm, L. C. (2002). A summary of European experience with beach nourishment. *Coastal Engineering*, 47, 237-264.
- Hanson, H. B. (2002). Beach nourishment projects, practices and objectives - a European Overview. *Coastal Engineering*, 47, 81-111.
- Haslett, S. K. (2009). *Coastal Systems*. Routledge, New York.
- Hugues, S. A. (1993). *Physical Models and Laboratory Techniques*. World Scientific, London.
- Inman, D., Elwany, M., and Jenkins, S. (1993). Shorerise and bar-berm profiles on ocean beaches. *Journal of Coastal Research*, 98 (C10), 18181-18199.
- Jackson, N. N. (2010). Effects of nourishment on the form and function of an estuarine beach. *Ecological Engineering*, 36(12), 1709-1718.
- Kamphuis, W. J. (1974). Practical Scaling of Coastal Models. *International conference in coastal engineering (ICCE)*. Copenhagen, Denmark, pp. 2086-2101.
- Kamphuis, W. J., and Naim, R. (1984). Scale effects in large coastal mobile bed models. *International conference in coastal engineering (ICCE)*. Houston, TX, pp. 2322-2338.
- Karunaratna, H., Reeve, D., and Spivack, M. (2009). Beach profile evolution as an inverse problem. *Continental Shelf Research*, 29, 2234-2239.

- Kumada, T., Uda, T., Matsu-Ura, T., and Sumiya, M. (2010). Field experiment on beach nourishment using gravel at Jinkoji coast. Proceedings of the 32nd Conference on Coastal Engineering. Shanghai, China, pp. 2503-2515.
- Komar, P., and Allan, J. C. (2010). "Design with Nature" strategies for shore protection—The construction of a cobble berm and artificial dune in an Oregon State Park, in Shipman, H., Dethier, M.N., Gelfenbaum, G., Fresh, K.L., and Dinicola, R.S., eds., Puget Sound Shorelines and the Impacts of Armoring—Proceedings of a State of the Science Workshop, May 2009: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5254, p. 117-126.
- Komar, P., and McDougal, W. (1994). The analysis of exponential beach profiles. *Journal of Coastal Research*, 10, 59-69.
- Larson, M., Kraus, N., and Wise, R. (1999). Equilibrium beach profiles under breaking and non-breaking waves. *Coastal Engineering*, 36, 59-85.
- Lee, P. (1994). The submarine equilibrium profile: a physical model. *Journal of Coastal Research*, 10, 1-17.
- Li, F., Dyt, C., and Griffiths, C. (2006). Multigrain sedimentation/erosion model based on cross-shore equilibrium sediment distribution: Application to nourishment design. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 67, 664-672.
- Long, B. (2006). Étude hydrodynamique, sédimentologique et biologique des sites de Maria, Saint-Siméon, Bonaventure, Newport et Cap-d'Espoir dans la baie des Chaleurs, Québec, Canada. Québec, Canada: rapport scientifique, Institut national de la recherche scientifique - centre eau terre environnement, 121 pages + annexes.
- Long, B., & Xhardé, R. (2014). Rapport des visites de plage en août et septembre 2013. Rapport d'étape pour le Ministère de la Sécurité Publique, 39 pp. + annexes.
- Long, B., et Xhardé, R. (2009). Fusion des données aéroportées obtenues par LiDAR aéroporté topographique et bathymétrique lors des projets RES#LON et FUDOTERAM. Québec, Canada: rapport scientifique, Institut national de la recherche scientifique - centre eau terre environnement, 217 pages.

- Longo, S., Petti, M. and Losada, I. J. (2002). Turbulence in the swash and surf zones : a review. *Coastal Engineering*, 45, 129–147.
- López de San Román-Blanco B. (2003). *Dynamics of gravel and mixed, sand and gravel, beaches*. Ph.D. Thesis Imperial College, University of London, Londres, Royaume-Uni.
- Masselink, G. and Hughes, M. G. (1998). Field investigation of sediment transport in the swash zone. *Continental Shelf Research*, 18, 1179–1199.
- Masselink, G. and Puleo, J. A. (2006). Swash-zone morphodynamics. *Continental Shelf Research* 26, 661–680.
- Masselink, G., Li, L. (2001). The role of swash infiltration in determining the beachface gradient: a numerical study. *Marine Geology* 176, 139–156.
- Mason, T., and Coates, T.T. (2001). Sediment Transport Processes on Mixed Beaches: A Review for Shoreline Management. *Journal of Coastal Research*, 17 (3), 645-657.
- McLean, R. F., and Kirk, R. M. (1969). Relationships between grain size, size-sorting, and foreshore slope on mixed sand-shingle beaches. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 12(1), 138-155.
- McCave, I.N., 1984. Erosion, transport and deposition of fine-grained marine sediments. Geological Society, London, Special Publications 15, 35-69.
- Moore, B. (1982). *Beach profile evolution in response to changes in water level and wave height (M.Sc. Thesis)*. Newark, USA.: Dept. of Civil Engineering, University of Delaware.
- Morneau, F., Michaud, M., Lecours, F., Côté, L., et Roy, D. (2001). *Étude d'impact sur l'environnement: projets de protection des berges le long de la route 132 autour de la péninsule gaspésienne*. Québec, QC, Canada: Gouvernement du Québec - Ministère des transports du Québec.
- Nordstrom, K.F. (2005). Beach Nourishment and Coastal Habitats: Research Needs to Improve Compatibility. *Restoration Ecology*, 13: 215–222. doi: 10.1111/j.1526-100X.2005.00026.x
- Orford, J.D., Jennings, S.C., and Pethick, J.(2003). Extreme storm effect on gravel-dominated barriers. Coastal Sediments '03. In: Davis, R.A. (Ed.), Proceedings of the International Conference on Coastal Sediments, 1-14.

- Osborne, P. D. and Rooker, G. A. (1999). Sand re-suspension events in a high energy infragravity swash zone. *Journal of Coastal Research* 15, 74–86.
- Pilkey, O., Young, R., Riggs, S., Smith, A., Wu, H., and Pilkey, W. (1993). The concept of shoreface profile of equilibrium: a critical review. *Journal of Coastal Research*, 9(1), 255-278.
- Plante, S., Chouinard, O., et Bernatchez, P. (2007). *Politiques, gouvernance et renforcement des capacités communautaires d'adaptation aux changements climatiques des zones côtières, insulaires et continentales*. Rimouski, QC, Canada: Centre de recherche sur le développement territorial (CRDT).
- Postma, G.M. (1989). *Wave reflection from rock slopes under random wave attacks*. PhD thesis, Delft University of Technology, Pays-Bas, 112 pages.
- Pryor, W. A. (1973). Permeability-porosity patterns and variations in some Holocene sand bodies. *AAPG Bulletin*, 57(1), 162-189.
- Puleo, J. A., Holland, K. T., Plant, N., Slinn, D. N. and Hanes, D. M. (2003). Fluid acceleration effects on suspended sediment transport in the swash zone. *Journal of Geophysical Research*, 108, 3350.
- Reis, A. H., and Gama, C. (2010). Sand size versus beachface slope—An explanation based on the Constructal Law. *Geomorphology*, 114(3), 276-283.
- Roberts, T., and Wang, P. (2012). Four-year performance and associated controlling factors of several beach nourishment projects along three adjacent barrier islands, west-central Florida, USA. . *Coastal Engineering*, 70, 21-39.
- Romańczyk, W., Boczar-Karakiewicz, B., and Bona, J. (2005). Extended equilibrium beach profiles. *Coastal Engineering*, 52, 727-744.
- Ropars, Y. (2013). Protection de la berge - Sainte-Luce, Québec. Québec, Canada: rapport technique, Consultants Ropars Inc., 49 pages.
- Seelig, W. N. (1983). Wave Reflection from Coastal Structures. Proceedings of Coastal Structures '83, American Society of Civil Engineers, Arlington, VA, USA, pp 961-973.

- Seelig, W. N., and Ahrens, J. P. (1981). *Estimation of Wave Reflection and Energy Dissipation Coefficients for Beaches, Revetments and Breakwaters*. Technical Paper 81-1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- She, K. Horn, D., Canning, P. (2007). *Influence of permeability on the performance of shingle and mixed beaches*. R&D Technical Report FD1923/TR, ed. DEFRA, London, UK. 105 pages.
- Shi, F., Cai, F., Kirby, J., and Zheng, J. (2013). Morphological modeling of a nourished bayside beach with a low tide terrace. *Coastal Engineering*, 78, 23-34.
- Shipman, H. (2001). Beach nourishment on Puget Sound—A review of existing projects and applications, in Puget Sound Research Conference, 2001, Bellevue, Wash., February 12–14, 2001, Proceedings: Seattle, Wash., Puget Sound Partnership.
- Spielmann, K., Astruc, D., and Thual, O. (2004). Analysis of some key parametrizations in a beach profile morphodynamical model. *Coastal Engineering*, 51, 1021-1049.
- St-Hilaire-Gravel, D., Forbes, D.L. and Bell T. (2012). Multitemporal Analysis of a Gravel-Dominated Coastline in the Central Canadian Arctic Archipelago. *Journal of Coastal Research*, 28 (2), 421-441.
- Stive, M. J., and De Vriend, H. J. (1995). Modelling Shoreface Profile Evolution. *Marine Geology*, 126, 271-287.
- Sunamura, T. (1984). Quantitative predictions of beach-face slopes. *Geological Society of America Bulletin*, 95(2), 242-245.
- Sutherland, T. F., P. M. Lane, C. L. Amos, and John Downing. 2000. “The Calibration of Optical Backscatter Sensors for Suspended Sediment of Varying Darkness Levels.” *Marine Geology* 162 (2): 587–97.
- U.S. Army Corps of Engineers (2002). *Coastal Engineering Manual (CEM), Engineer Manual 1110-2-1100*. Washington D.C.
- Van de Graaf, J., Niemeyer, H., and Van Overeem, J. (1991). Beach nourishment, philosophy and coastal protection policy. *Coastal Engineering*, 16, 129-146.

- Van Leeuwen, S. D. (2007). Linear evolution of a shoreface nourishment. *Coastal Engineering*, 54, 417-431.
- Van Oorschot, J., and Van Raalte, G. (1991). Beach nourishment: execution methods and developments in technology. *Coastal Engineering*, 16, 23-42.
- Van Rijn, L., Walstra, D., Grasmeyer, B., Sutherland, J., Pan, S., and Sierra, J. (2003). The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based Profile models. *Coastal Engineering*, 47, 295-327.
- Van Wellen, E., Chadwick, A.J., and Mason, T. (2000). A review and assessment of longshore sediment transport equations for coarse-grained beaches. *Coastal Engineering*, 40, 243-275.
- Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30, 377-392.
- Wang, P., Davis Jr, R. A. (1998). A beach profile model for a barred coast: Case study from Sand Key, West-Central Florida. *Journal of Coastal Research*, 981-991.
- Wilson, A. M., Huettel, M., and Klein, S. (2008). Grain size and depositional environment as predictors of permeability in coastal marine sands. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 80(1), 193-199.
- Wright, L., and Short, A. (1984). Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine Geology*, 56, 93-118.
- Xhardé, R., Long, B., and Forbes, D. (2011). Short-Term Beach and Shoreface Evolution on a Cuspate Foreland Observed with Airborne Topographic and Bathymetric LIDAR. *Journal of Coastal Research*, SI62, 50-62.

Annexe A

Résultats des levées stratigraphiques et granulométriques sur la plage de l'Anse-aux-Coques en septembre 2013

CONTEXTE GÉOLOGIQUE

La plage de Sainte-Luce s'est mise en place par-dessus les sédiments de Goldthwait qui forment le soubassement de la plage et qui recouvrent le substratum rocheux des Appalaches. Elle est creusée dans la terrasse de Mitis décrite par Dionne (2002) comme étant une formation caractéristique des rives du Saint-Laurent estuarien. La ligne de rivage Micmac de J. W. Goldthwait (1911) est une notion complexe. Telle que décrite il y a plus de 90 ans, elle comprend trois unités (Fig. A1) :

- 1) une falaise morte (falaise Micmac) taillée tantôt dans le substrat rocheux du Cambro-ordovicien pour la rive sud et les îles, tantôt dans des dépôts meubles quaternaires ou holocènes. Sur la rive sud, elle s'étend, presque sans interruption, entre Lévis et Sainte-Anne-des-Monts (Gaspésie). On la retrace aussi à plusieurs endroits sur la rive nord entre Québec et Blanc-Sablon, sur la plupart des îles y compris Anticosti, et dans le secteur du haut estuaire en amont de Québec.
- 2) une basse terrasse d'accumulation (terrasse de Mitis), de plusieurs dizaines à quelques centaines de mètres de largeur, édifiée au pied de la falaise morte.
- 3) une plate-forme intertidale taillée tantôt dans le roc, tantôt dans des matériaux meubles principalement argileux.

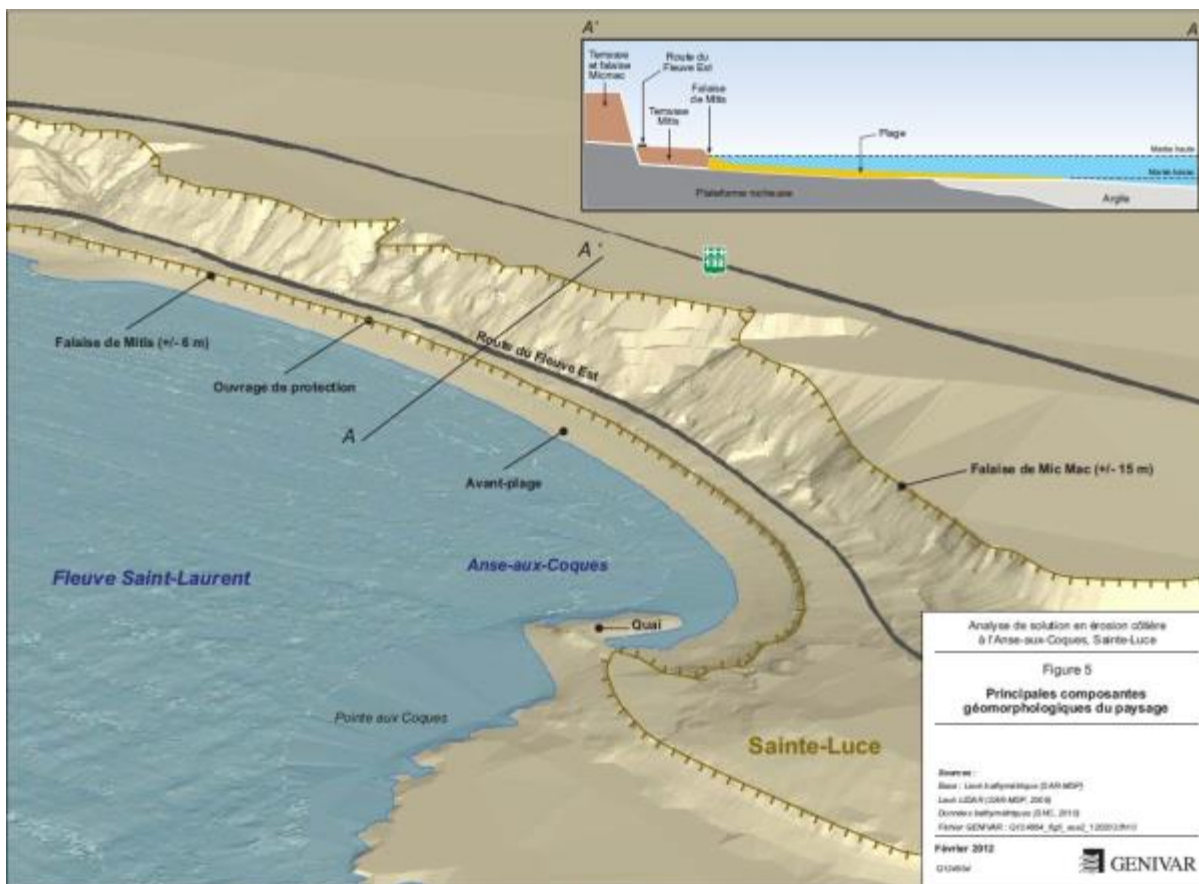


Figure A1. Principales composantes géologiques et géomorphologiques de l'Anse aux Coques, Sainte-Luce-sur-mer (d'après GENIVAR, 2012).

Ces trois composantes présentent des variations morpho-sédimentologiques d'un endroit à l'autre. La basse terrasse a été datée dans 36 localités réparties sur les deux rives du Saint-Laurent estuarien. La médiane ($n=43$) est de 2030 ± 80 ans BP. À cette époque, le niveau marin relatif était de 3,5 à 4,5 m au-dessus du niveau actuel. La falaise et la plate-forme intertidale taillées dans les formations meubles furent façonnées à deux reprises lors de fluctuations du niveau marin relatif, à l'Holocène supérieur. Quant à la falaise et à la plate-forme rocheuses, il s'agit d'un complexe morphologique ancien, datant au moins du Sangamonien, car des marques glaciaires sur la plate-forme ainsi que des dépôts wisconsinien confirment l'existence de la surface rocheuse avant le passage du dernier glacier.

Au niveau de la plage de Sainte-Luce, les sédiments de Goldthwait forment la terrasse sur laquelle est construite la ville de Sainte-Luce sur Mer et qui a été entaillée au niveau de la plage par l'action des vagues depuis la stabilisation du niveau marin il y a 1500 ans. Cette

entaille a été recouverte par un "lag" grossier constitué de galets et blocs pouvant atteindre de 5 à 50 cm de diamètre. Ces deux formations constituent le soubassement de la plage. La plage au sens strict n'est représentée que par une faible couche sableuse. Plus au large, l'estran présente des sédiments de Goldthwait remaniés en surface qui comblent les dépressions dues aux variations topographiques du toit du substratum rocheux constitué par des shales des Basses-Terres du Saint Laurent.

CAMPAGNE DE TERRAIN DE 2013

Deux profils ont été établis à l'aide d'un LiDAR topographique terrestre. Chaque profil débute le long du mur de soutien de la promenade et s'étend perpendiculairement sur environ 100 m au large, ce qui est suffisant pour couvrir l'ensemble de la plage sédimentaire actuelle (Fig. A2 et A3).

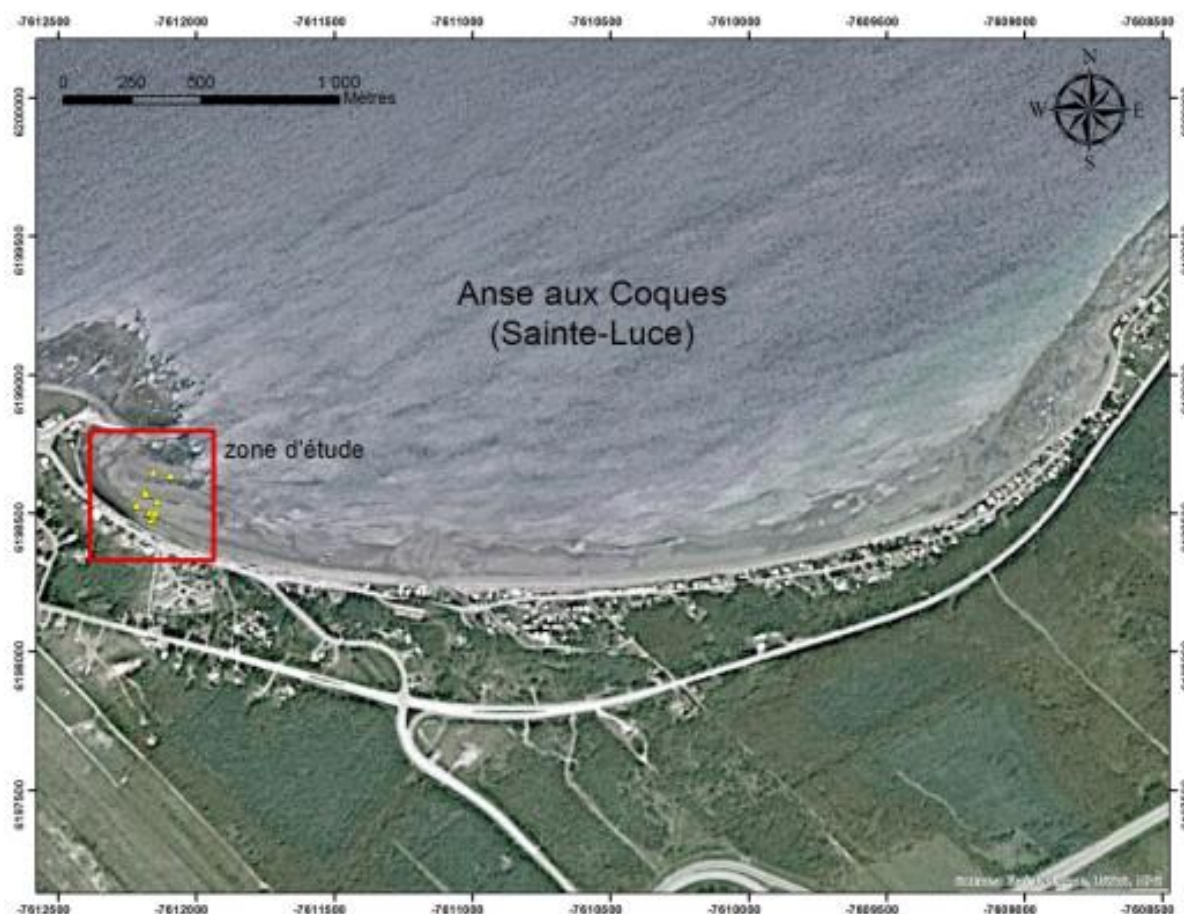


Figure A2. Vue générale de la plage de Ste-Luce-sur-mer. La zone étudiée lors de la campagne de terrain de 2013 est indiquée en rouge.



Figure A3. Localisation des deux profils topographiques relevés par station laser et identification des huit trous de sondage réalisés sur la plage de Sainte-Luce.

Afin d'échantillonner la plage, un tracteur appartenant à la municipalité a été requis afin de creuser des trous de sondage aussi profonds que possible. Ceci a permis de relever la stratigraphie de la plage à partir de huit (8) trous situés sur deux profils de plage parallèles et distants d'environ 50 m.

Six (6) carottes sédimentaires ont également été prélevées aux stations 1, 5 et 6 (Fig. A4). Pour chacune de ces trois stations, une première carotte, de 30 cm de longueur, était prélevée dans les dépôts sableux de surface. Une seconde carotte, de 20 cm de longueur, était prélevée dans les sédiments compacts sous-jacents.

Enfin, treize échantillons de surface ont été prélevés afin de réaliser des granulométries et de décrire les variations granulométriques (Tableau A1 et Fig. A5).

Tableau A1. Position des échantillons de surface.

	Latitude	Longitude
#1	48.54779 N	-68.38123 W
#2	48.54779 N	-68.38123 W
#3	48.54787 N	-68.38115 W
#4	48.54795 N	-68.38107 W
#5	48.54811 N	-68.38172 W
#6	48.54809 N	-68.38168 W
#7	48.54793 N	-68.38130 W
#8	48.54794 N	-68.38126 W
#9	48.54818 N	-68.38104 W
#10	48.54839 N	-68.38141 W
#11	48.54835 N	-68.38140 W </td
#12	48.54880 N	-68.38115 W
#13	48.54874 N	-68.38059 W



Figure A4. Localisation des six carottes sédimentaires prélevées sur la plage de Sainte-Luce.



Figure A5. Localisation des treize échantillons sédimentaires de surface prélevés sur la plage de Sainte-Luce.

RÉSULTATS

Les 6 carottes sédimentaires prélevées sur la plage de l'Anse-aux-Coques ont permis d'identifier trois unités sédimentaires bien distinctes (Fig. A6) :

- A. Une couche de sable ayant une épaisseur variant entre 45-50 cm au pied du mur de protection de la promenade côtière, 30 cm sur le haut estran, 7 à 20 cm sur le moyen estran et 5 cm sur le bas estran, où elle tend même à disparaître. Ces dépôts sableux sont constitués à plus de 98% de sables moyens ayant un D_{50} compris entre 275 μm et 350 μm . Ces dépôts peuvent contenir des traces de graviers (0,1% à 0,5%), de limons (1%) et d'argiles (0,1%), ainsi que des traces de matière organique (0,5% à 1,1%) et de débris coquilliers (1% à 4%). (Fig. A7)

-
- B. Un lag de galets et de blocs de roche ayant des tailles comprises entre 10 cm et plus de 30 cm de diamètre pour les plus gros blocs observés au sein d'une matrice de sables moyens en grossiers ($280 \leq D_{50} \leq 570 \mu\text{m}$) (Fig. A8). L'épaisseur de ce lag atteint une trentaine de centimètres au pied du mur et diminue progressivement pour atteindre une dizaine de centimètres sur le moyen et le bas estran.
- C. Une couche argilo-silteuse très compacte renfermant du matériel plus grossier identifiée comme des argiles marines de Goldthwait mélangées à des matériaux de fonte et de déballastage des glaces. Cette unité est formée en majeure partie d'un mélange de limons de 15 à 56 μm (25 à 35%), de sables fins de moins de 200 μm (30 à 50%) et de graviers de 2 à 20 mm (10 à 25%), auxquels peuvent s'ajouter des argiles (5 à 10%) et des traces de matière organique (0,5 à 3%) et de débris coquilliers (2 à 4%). La compaction des dépôts, mesurée par pénétromètre sur les échantillons prélevés par carottage, varie entre 1,75 kg/cm² et 4,6 kg/cm². Cette unité s'observe à une profondeur de 80-90 cm au pied du mur de protection, à 60 cm sur le haut estran, à 20-25 cm sur le moyen estran et à seulement 15 cm de profondeur sur le bas estran. Plus au large, les sédiments de Goldthwait affleurent en surface et sont le siège d'un champ de rides de plage ("ripple-marks") indiquant un remaniement par les vagues et les courants (Figure A7).

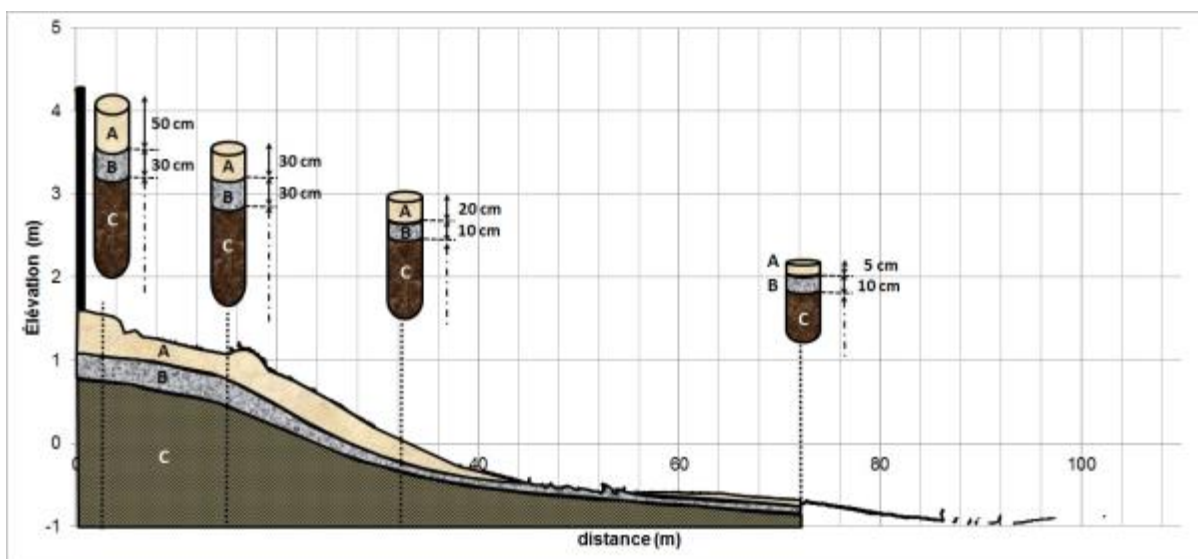


Figure A6. Profil de plage réalisé par topographie laser et stratigraphie observée. Les sondages mettent en évidence trois unités sédimentologiques différentes : (A) les dépôts sableux récents, qui se sont mis en place depuis la fin de la remontée relative du niveau marin il y a environ 1500 ans, (B) une surface d'érosion, ou lag, composé de galets et de blocs rocheux de grande dimension (≥ 30 cm) et (C) des dépôts argilo-silteux très compacts identifiés comme étant des argiles de Goldthwait et qui se sont mises en place à la fin de la dernière glaciation, durant la phase de transgression marine de Goldthwait qui s'est déroulée dans l'Estuaire du Saint-Laurent entre 11 000 et 14 000 ans BP.



Figure A7. Exemple de dépôts sableux riches en matières organiques (à gauche) et de sédiments fins (argiles de Goldthwait) remaniés par les courants sur le bas estran de la plage de Sainte-Luce.



Figure A8. Types de sédiments observés sur la plage de Sainte-Luce-sur-mer. La photographie de gauche donne un exemple de bloc rocheux formant le soubassement de la plage, La photographie de droite montre l'épaisseur du sable au-dessus des blocs constituant le lag séparant les dépôts sableux récents des argiles marines compactes de Goldthwait.

ANALYSES STRATIGRAPHIQUES ET GRANULOMÉTRIQUES

Les six carottes sédimentaires prélevées à Sainte-Luce-sur-mer ont été passées au scanner à rayons X par le laboratoire multidisciplinaire de tomodensitométrie pour les ressources naturelles et le génie civil (LTRG). Elles ont ensuite été ouvertes et des échantillons ont été prélevés manuellement dans les différentes unités stratigraphiques à fin d'analyse granulométrique. Pour ce faire, la fraction granulométrique des échantillons inférieurs à 1,5 mm a été analysée au moyen d'un compteur de particule laser *Beckman Coulter LS 13320* tandis que la fraction granulométrique supérieure à 1,5 mm a été analysée au moyen d'une série de tamis allant de 1/16" à 1" avec un intervalle de maillage de 1/4". La courbe granulométrique a été par la suite reconstruite en tenant compte du pourcentage de la fraction inférieure à 1,5 mm et de celle supérieure à 1,5 mm. Les paramètres statistiques mesurés sont la moyenne (*Moy.*), les modes (*Modes*), le coefficient d'asymétrie (*Asym. ou skewness*) et le coefficient d'aplatissement (*Aplat. ou kurtosis*).

La première carotte (GPS1), qui a été prise dans les dépôts sableux de surface au pied du mur de protection de la promenade, met en évidence cinq unités de sédiments laminés, caractéristiques des périodes calmes durant lesquelles la plage se développe par aggradation

ou progradation (Fig. A9). Ces unités de dépôts laminés sont séparées par des surfaces d'érosion caractéristiques des épisodes de tempête. L'unité sédimentaire située à la base de la carotte peut s'interpréter comme le développement par progradation d'une petite berme de plage dont la partie sommitale a été érodée par une tempête. Cette première unité est surmontée successivement par des dépôts organiques (3 cm), puis par des dépôts horizontaux drapant dont le sommet est lui-même érodé. Au-dessus de ces dépôts, une série aggradante formée d'une alternance de sables laminés et de dépôts organiques complète l'ensemble.

La deuxième carotte (GPS1A) a été prélevée dans les sédiments compacts de Goldthwait. Les sédiments qui la composent sont massifs et hétérogènes. Ils varient des argiles aux graviers grossiers de 1,5 cm de diamètre. En moyenne, ces sédiments sont constitués de 25% de graviers, 40% de sable et 35% de silt. Le pourcentage de sédiment de la taille des argiles est toujours inférieur à 1%. Ces sédiments anciens ne constituent pas une source sédimentaire pour la régénération de la plage, excepté au niveau du bas estran où ils affleurent et peuvent être remobilisés par l'action des vagues et des courants.

Les troisième et quatrième carottes ont été prélevées à la station 5, sur le moyen estran. La carotte de surface (C#5) recoupe la couche sable fin/silt de surface sur 20 cm et le niveau grossier sur 5 cm (Figure A10). La couche de surface est constituée de quatre unités contenant de la matière organique proche de la partie sommitale et d'un petit niveau de sable moyen de 2 cm d'épaisseur à 14 cm de la surface. Dans le niveau grossier basal les graviers peuvent atteindre 1 cm de diamètre. La carotte C#5A a été prélevée, quant à elle, au sommet des sédiments de Goldthwait dans lesquels des sédiments grossiers (galets pouvant atteindre 3 cm) sont incorporés. Cette carotte met en évidence un pourcentage moyen de 20% de graviers, entre 25 et 70% de sable et entre 10 et 50% de silt. La fraction argileuse est absente.

Sainte Luce sur Mer, Station #1

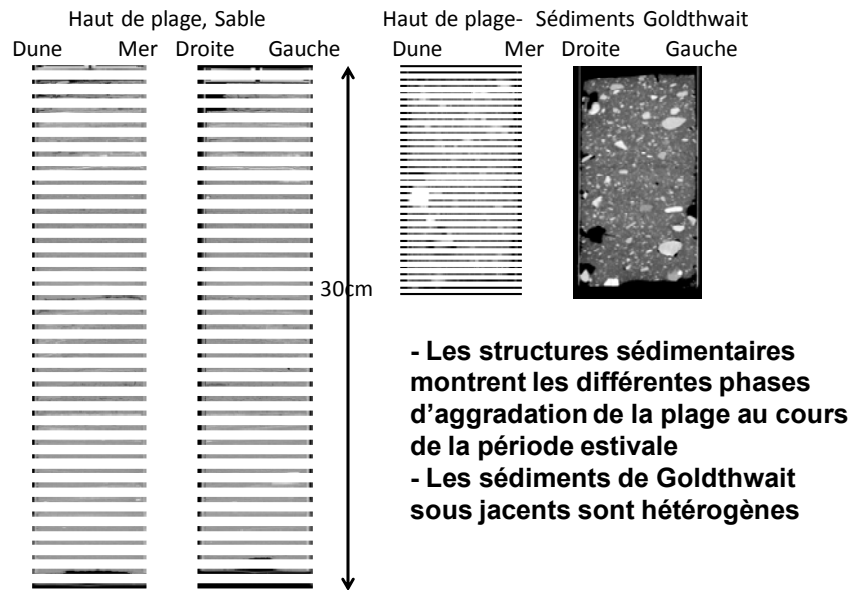


Figure A9. Carottes prélevées au pied du mur (station #1). La carotte de gauche a été collectée dans la colonne sableuse tandis que la carotte de droite a été prélevée dans les sédiments de Goldthwait sous-jacents.

Sainte Luce sur Mer- Station #5

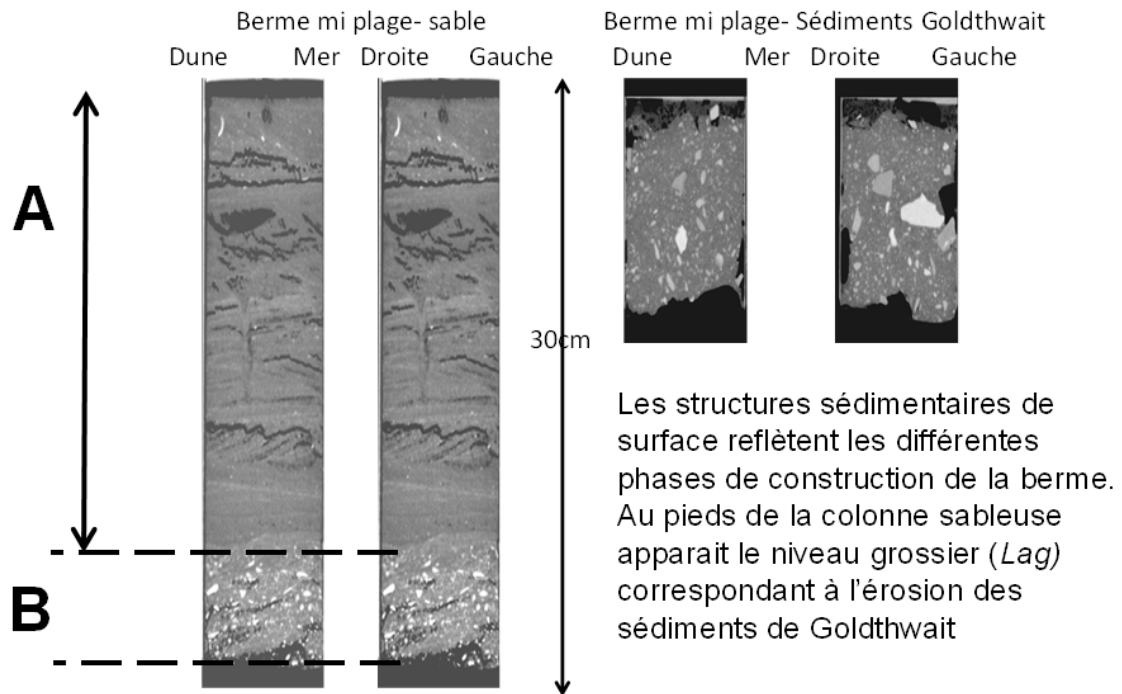


Figure A10. Logs des carottes de surface et de sédiments de Goldthwait à la station 5. L'unité A correspond aux dépôts sableux récents tandis que l'unité B correspond au lag de galets et de blocs rocheux surmontant les sédiments de Goldthwait et observé également dans les sondages de la plage.

Sainte Luce sur Mer – Station 6

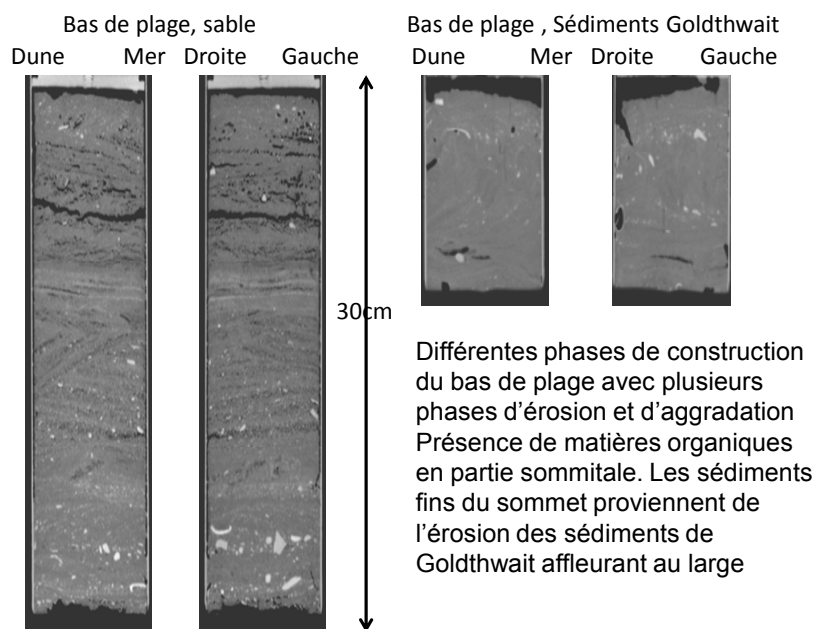


Figure A11. Logs des carottes de sable et de sédiments de Goldthwait à la station 6.

La carotte C#6 a été prélevée dans les sédiments de surface (Figure A11). Elle est constituée à la base d'un niveau grossier de 5 cm d'épaisseur, surmontée par un niveau de sable moyen à grossier de 10 cm d'épaisseur, fortement laminé et montrant deux épisodes de dépôt puis, dans la partie sommitale, ce niveau est surmonté par un mélange de silt et de sables fins sur 11 cm.

Dans cette dernière couche, des matières organiques sont mélangées (algues en décomposition). La carotte C#6A a été prélevée dans les sédiments de Goldthwait, se sont des sédiments fins massifs pouvant contenir des graviers et principalement du sable. La fraction silteuse est absente.

Enfin, des analyses granulométriques ont également été réalisées sur les treize échantillons prélevés en surface le long des deux profils topographiques P1 et P2. L'analyse granulométrique a consisté, tout comme pour les carottes sédimentaires, à séparer la fraction granulométrique des échantillons inférieurs à 1,5 mm et à l'analyser au moyen d'un compteur de particule laser *Beckman Coulter LS 13320*, tandis que la fraction granulométrique supérieure à 1,5 mm a été tamisée au moyen d'une série de tamis allant de 1/16" à 1" avec un intervalle

de maillage de ¼". Les courbes granulométriques ont été ensuite reconstruites en tenant compte du pourcentage de la fraction inférieur à 1,5 mm et de celle supérieure à 1,5 mm. Les paramètres statistiques mesurés sont la moyenne (*Moy.*), les modes (*Modes*), le coefficient d'asymétrie (*Asym. ou skewness*) et le coefficient d'aplatissement (*Aplat. ou kurtosis*).

Les résultats indiquent une distribution granulométrique différente le long des deux profils de plage (Fig. A12 et tableau A2). Le long du profil P1, le haut de plage est essentiellement constitué de sable moyen présentant un diamètre moyen de grain de 300 µm, tandis que l'estran moyen est constitué d'un mélange contenant 65 % à 75 % de sables fins (180 à 200 µm) et 25 % à 35 % de sables très grossiers (± 1100 µm). Le bas estran est constitué, pour sa part, de sables fins ayant un diamètre moyen de grain de 180 µm.



Figure A12. Répartition spatiale des moyennes granulométriques des échantillons de surface. Toutes les mesures sont en µm. Le haut de plage se caractérise par un sédiment grossier de 280 à 300 µm tandis que le bas estran se caractérise par des sables fins de de 150 à 180 µm.

Tableau A2. Analyse granulométrique des 13 échantillons de surface. Les modes correspondent à la valeur du mode et entre parenthèses son pourcentage par rapport à la courbe globale. Ainsi, « 200 (65) + 1050 (35) » indique la présence d'un mode à 200 µm représentant 65 % du volume total de l'échantillon et un second mode à 1050 µm représentant 35 % du total des sédiments.

	Moy.	Modes	Asym.	Aplat.
#1	300	300	P	
#2	300	300	P	
#3	400	200 (65) + 1050 (35)	S	
#4	280	180 (74) + 1100 (14) + 10000 (12)	N	
#5	150	5 (2) + 50 (1) + 150 (97)	N	
#6	150	5 (4) + 40 (5) + 150 (91)	N	
#7	200	200 (70) + 400 (30)	N	
#8	180	180 (92) + 500 (8)	N	
#9	180	45 (4) + 180 (82) + 600 (14)	N	
#10	150	45 (10) + 180 (75) + 600 (13) + 1150		
#11	320	45(6) + 450 (90) + 2000 (4)	NN	
#12	250	180	P	
#13	180	180	N	

Le long du profil P2 en revanche, le haut de plage est essentiellement constitué de sable fin présentant un diamètre moyen de grain de 150 µm, tandis que le bas estran est constitué, pour sa part, de sables fins ayant un diamètre moyen de grain variant localement entre 150 µm et 250 µm. On trouve également le long de ce profil un échantillon prélevé sur le bas estran (#11) montrant un diamètre moyen de grain significativement plus élevé que ceux avoisinant (320 µm) et contenant environ 4 % de sables très grossiers et de graviers fins (2000 µm). Ces résultats soulignent la grande hétérogénéité spatiale dans la distribution granulométrique des sédiments le long de la plage de Sainte-Luce.

Tableau A3. Synthèse de l'analyse granulométrique de la carotte C#1. Le tableau fournit le diamètre médian D₅₀ en µm ainsi que les proportions de graviers, sables, limons, argiles, débris coquilliers (CaCO₃) et de matière organique (MO) pour différents niveaux de la carotte sédimentaire.

Position de l'échantillon	D ₅₀ (µm)	Graviers (%)	Sables (%)	Limons (%)	Argiles (%)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
Surface	323,5	0,2	98,7	1,0	0,1	0,8	1,0
Sommet sup.	345,4	0,1	98,8	0,9	0,1	1,2	1,1
Sommet inf.	314,7	0,1	99,9	0,0	0,0	0,8	1,1
Milieu	339,0	0,2	98,8	0,9	0,1	0,7	1,1
Bas	349,4	54,0	98,7	0,6	0,1	0,8	1,1

Tableau A4. Synthèse de l'analyse granulométrique de la carotte C#1A. Le tableau fournit le diamètre médian D₅₀ en µm ainsi que les proportions de graviers, sables, limons, argiles, débris coquilliers (CaCO₃) et de matière organique (MO) pour différents niveaux de la carotte sédimentaire. La compaction du sédiment R (ou la résistance du sédiment à l'enfoncement) a été mesurée par pénétromètre et est indiquée en kg/cm².

Position de l'échantillon	D ₅₀ (µm)	Graviers (%)	Sables (%)	Limons (%)	Argiles (%)	CaCO ₃ (%)	MO (%)	R (kg.cm ⁻²)
Sommet sup.	71,2	26,5	35,1	29,1	9,1	3,6	2,9	4,4
Sommet inf.	194,2	18,4	50,0	23,9	7,6	2,9	2,9	4,6
Milieu sup.	15,8	20,0	30,9	35,7	13,3	3,7	2,9	3,6
Milieu inf.	20,5	25,5	32,2	30,7	11,3	3,7	2,9	3,4
Bas	56,1	27,9	31,2	31,3	9,4	3,6	2,8	0,8

Tableau A5. Synthèse de l'analyse granulométrique de la carotte C#5. Le tableau fournit le diamètre médian D50 en μm ainsi que les proportions de graviers, sables, limons, argiles, débris coquilliers (CaCO_3) et de matière organique (MO) pour différents niveaux de la carotte sédimentaire.

Position de l'échantillon	D ₅₀ (μm)	Graviers (%)	Sables (%)	Limons (%)	Argiles (%)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
Sommet sup.	278,7	0,5	98,5	0,9	0,1	1,7	0,7
Sommet inf.	275,0	0,1	98,8	1,0	0,1	1,7	0,9
Milieu sup.	348,6	0,2	98,8	0,9	0,1	1,6	0,2
Milieu inf.	329,8	6,0	93,0	1,0	0,1	2,1	0,3
Bas	567,4	15,5	83,6	0,8	0,1	3,2	0,5

Tableau A6. Synthèse de l'analyse granulométrique de la carotte C#5A. Le tableau fournit le diamètre médian D50 en μm ainsi que les proportions de graviers, sables, limons, argiles, débris coquilliers (CaCO_3) et de matière organique (MO) pour différents niveaux de la carotte sédimentaire. La compaction du sédiment R (ou la résistance du sédiment à l'enfoncement) a été mesurée par pénétromètre et est indiquée en kg/cm^2 .

Position de l'échantillon	D ₅₀ (μm)	Graviers (%)	Sables (%)	Limons (%)	Argiles (%)	CaCO ₃ (%)	MO (%)	R (kg/cm^2)
Surface	258,0	8,4	80,5	8,6	2,5	2,2	0,7	0,0
Sommet	25,1	16,4	37,9	35,5	10,3	3,7	0,9	2,25
Milieu	177,6	23,2	46,1	23,4	7,4	3,7	1,1	3,70
Bas	15,5	15,0	31,8	40,5	12,2	3,8	1,0	1,75

Tableau A7. Synthèse de l'analyse granulométrique de la carotte C#6. Le tableau fournit le diamètre médian D₅₀ en µm ainsi que les proportions de graviers, sables, limons, argiles, débris coquilliers (CaCO₃) et de matière organique (MO) pour différents niveaux de la carotte sédimentaire.

Position de l'échantillon	D ₅₀ (µm)	Graviers (%)	Sables (%)	Limons (%)	Argiles (%)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
Sommet	292,0	1,5	97,3	1,1	0,1	1,5	0,4
Milieu	319,9	0,3	98,2	1,3	0,1	1,4	0,4
Bas	346,1	2,6	96,0	1,2	0,1	2,3	0,4

Tableau A8. Synthèse de l'analyse granulométrique de la carotte C#6A. Le tableau fournit le diamètre médian D₅₀ en µm ainsi que les proportions de graviers, sables, limons, argiles, débris coquilliers (CaCO₃) et de matière organique (MO) pour différents niveaux de la carotte sédimentaire. La compaction du sédiment R (ou la résistance du sédiment à l'enfoncement) a été mesurée par pénétromètre et est indiquée en kg/cm².

Position de l'échantillon	D ₅₀ (µm)	Graviers (%)	Sables (%)	Limons (%)	Argiles (%)	CaCO ₃ (%)	MO (%)	R (kg.cm ⁻²)
Sommet	214,6	1,6	96,1	2,2	0,0	1,8	0,5	0,0
Milieu	200,7	1,5	97,0	1,5	0,0	2,5	0,5	1,00
Bas	192,0	0,6	96,2	3,2	0,0	1,9	0,5	0,50

Annexe B

Concept du profil d'équilibre de plage

Le concept de profil d'équilibre a été introduit par Fenneman dès 1902 (Fenneman, 1902) et développé plus tard par Bruun (Bruun, 1954) qui proposa l'équation empirique suivante pour décrire la forme du profil d'équilibre des plages à partir d'observations de profils de plage recueillies au Danemark et en Californie :

$$h(y) = Ay^{2/3} \quad (1)$$

où $h(y)$ représente la profondeur par rapport au niveau moyen de la surface libre à une distance horizontale y du trait de côte et A est un paramètre d'échelle exprimé en $[m^{1/3}]$. Par la suite, Dean (1977) compara 504 profils de plage, relevés le long de la côte des États-Unis et le Golfe du Mexique, à l'équation empirique de Bruun et trouva que cette dernière correspondait à une bonne approximation des profils de plage réels. Moore (1982) démontra ensuite l'existence d'une corrélation entre le paramètre d'échelle A et le diamètre moyen du sédiment D_{50} . Dean démontra plus tard que le paramètre d'échelle A peut également être corrélé à la vitesse de sédimentation w , suivant une relation approximativement linéaire sur un graphique log-log, au moyen de la relation empirique (Dean, 1991) :

$$A = 0.067 w^{0.44} \quad (2)$$

Après ces premières tentatives pour décrire et prédire mathématiquement le profil d'équilibre de plages naturelles, plusieurs autres équations ont été proposées pour modéliser le profil d'équilibre des plages. Ainsi, Bodge (1992) et Komar et McDougal (1994) ont proposés chacun une expression de type exponentielle dans l'espoir de décrire plus adéquatement le profil d'équilibre que l'équation de Bruun – Dean. Bodge propose ainsi une équation de type :

$$h(x) = B (1 - e^{-kx}) \quad (3)$$

où B et k sont deux paramètres empiriques correspondant respectivement à la profondeur et à l'inverse de la distance, tandis que Komar et McDougal suggèrent une expression légèrement différente :

$$h(x) = \frac{m}{k} (1 - e^{-kx}) \quad (4)$$

où m correspond à la pente de la plage et k est un paramètre empirique correspondant à l'inverse de la distance.

Lee (1994) suggère pour sa part qu'une relation logarithmique serait un meilleur choix pour décrire le profil d'équilibre des plages et propose la relation suivante :

$$h(x) = - \left[D + \frac{1}{F} \ln\left(\frac{x}{G} + 1\right) \right] \quad (5)$$

où G est un coefficient relié au diamètre du sédiment et F est un coefficient relié à la période des vagues incidentes selon la relation : $F = 4\pi^2/gT^2$

D'autres auteurs, considérant que de nombreuses plages naturelles se caractérisent par la présence d'une barre d'avant-côte, proposent plutôt de modéliser le profil d'équilibre des plages au moyen de deux segments décrits par une équation ayant la forme générale suivante (Inman, Elwany, et Jenkins, 1993) :

$$h_n = A_n(x - x_0)^{m_n} + h_{0,n} \quad (6)$$

où l'indice $n = (1, 2)$ indique un des deux segments du profil. Cependant, l'application de cette méthode nécessite la détermination de huit paramètres empiriques différents, ce qui la rend très difficile à utiliser pour prédire le profil d'équilibre d'une plage à partir des caractéristiques sédimentaires ou hydrodynamiques du site.

Cette approche du profil d'équilibre au moyen de deux segments (méthode « 2S-EBP ») a par la suite été étudiée et développée par d'autres auteurs (Wang & Davis, 1998; Larson, Kraus, & Wise, 1999; Bernabeu, Medina, & Vidal, 2003a; Bernabeu, Medina, & Vidal, 2003b) afin de prendre également en compte les processus de déferlement et de réflexion qui se déroulent dans la zone côtière, ainsi que les variations de niveau d'eau dues aux marées. Bernabeu et al. (2003a) proposent les équations suivantes pour modéliser les profils d'équilibre dans la zone de haut-fond (« shoaling zone ») et la zone de déferlement (« surf zone ») dans le cas d'un niveau d'eau constant :

Profil dans la zone de déferlement :
$$x_1 = \left(\frac{h}{A}\right)^{3/2} + \frac{B}{A^{3/2}}h^3 \quad (7)$$

Profil dans la zone de haut-fond :
$$x_2 = \left(\frac{h}{C}\right)^{\frac{3}{2}} + \frac{D}{C^{\frac{3}{2}}}h^3 - x_d \quad (8)$$

où A et C sont des coefficients qui dépendent respectivement de l'énergie dissipée par le déferlement des vagues dans la zone de déferlement et par la friction au niveau du fond dans la zone de haut-fond, et où B et D sont des coefficients qui dépendent des processus de réflexion qui se déroulent respectivement dans la zone de déferlement et dans la zone de haut-fond. Il faut noter que si ces deux coefficients sont égaux à zéro (par exemple, dans le cas de plages dissipatives avec très peu de réflexion), les équations 7 et 8 se réduisent à l'équation de Bruun-Dean (équation 1). En comparant ce modèle 2S-EBP avec un ensemble de profils de plage, Bernabeu et al. (2003b) ont pu déterminer les relations empiriques existant entre ces quatre coefficients de forme et le paramètre adimensionnel de vitesse de sédimentation Ω_{sf} développé par Wright & Short (Wright & Short, 1984) :

$$A = (0.21 - 0.02\Omega_{sf}) \quad (9)$$

$$B = 0.89^{-1.24\Omega_{sf}} \quad (10)$$

$$C = (0.06 - 0.04\Omega_{sf}) \quad (11)$$

$$D = 0.22^{-0.83\Omega_{sf}} \quad (12)$$

Avec $\Omega_{sf} = H_s/wT$ et où w représente la vitesse de sédimentation, H_s est la hauteur significative des vagues et T est la période des vagues (Wright & Short, 1984).

Le modèle 2S-EBP et les relations empiriques des coefficients de forme développés par Bernabeu et al. ont démontré un certain potentiel prédictif, mais cette méthode n'a pas encore été testée de façon approfondie et doit toujours être validée au moyen d'ensembles de données de terrain plus larges.

Enfin, plusieurs auteurs ont également essayé de modéliser le profil d'équilibre des plages au moyen d'expressions mathématiques plus complexes et rigoureuses utilisant les équations fondamentales gouvernant les principaux processus physiques impliqués dans la dynamique côtière tels que la physique des fluides, la dissipation de l'énergie des vagues, le transport sédimentaire, etc. (Stive et De Vriend, 1995; Van Rijn, Walstra, Grasmeijer,

Sutherland, Pan, et Sierra, 2003; Spielmann, Astruc, et Thual, 2004; Karunarathna, Reeve, et Spivack, 2009; Shi, Cai, Kirby, et Zheng, 2013). Cependant, ces modèles mathématiques et déterministes de profil d'équilibre basés sur les processus physiques reposent généralement sur un certain nombre de paramètres et de coefficients qui ne peuvent pas être quantifiés directement sur le terrain (coefficient de friction, coefficient de dissipation, viscosité dynamique, etc.). Ces paramètres doivent être déterminés *a posteriori*, et les modèles étalonnés, au moyen d'analyses statistiques réalisées sur de larges ensembles de données de terrain avant de pouvoir être utilisés de façon prédictive (Van Rijn, Walstra, Grasmeijer, Sutherland, Pan, et Sierra, 2003), ce qui les rend peu commodes à utiliser par les ingénieurs côtiers.

En conclusion, bien que de nombreuses équations aient été proposées au cours des 30 dernières années pour modéliser et prédire la forme du profil d'équilibre d'une plage en fonction de divers paramètres hydrodynamiques et morpho-sédimentaires, l'équation empirique développée par Bruun (Bruun, 1954) et améliorée par Dean (Dean, 1977; Dean, 1991), bien que très approximative, reste la seule équation réellement prédictive dont disposent actuellement les ingénieurs côtiers pour anticiper l'évolution des profils d'équilibre de plage. Or, le concept de profil d'équilibre de plage est devenu l'élément principal de la plupart des projets de rechargement de plage. L'équation du profil d'équilibre est utilisée pour déterminer de nombreux paramètres-clés tels que la granulométrie du sédiment de la recharge et le volume de matériel requis pour un agrandissement donné de la plage. Par conséquent, afin de fournir des résultats fiables, l'équation utilisée pour décrire le profil d'équilibre doit être la plus proche possible du profil de plage réel.

De plus, le concept de profil d'équilibre de plage repose également sur un certain nombre de simplifications que les ingénieurs côtiers ne prennent pas en considération lors de la conception de leurs projets, mais qui peuvent avoir une influence non négligeable sur la performance finale du rechargement (Pilkey, Young, Riggs, Smith, Wu, et Pilkey, 1993).

Ces hypothèses sont :

- le profil de plage n'est pas influencé par la géologie sous-jacente;
- le transport sédimentaire le long du profil de plage ne se fait que par l'interaction des vagues avec le fond, les courants ne sont pas pris en compte;

-
- il n'y a pas de transport sédimentaire vers le large au-delà d'une profondeur limite théorique (« point de fermeture » ou « closure depth » de la plage);
 - Les barres d'avant-côte ne jouent aucun rôle significatif dans le transport sédimentaire transversal;
 - La granulométrie des sédiments est la seule variable qui influence le profil de la plage;
 - Le transport sédimentaire est bidimensionnel (le transport littoral n'est pas pris en considération);
 - Les plages et les systèmes de barres d'avant-côte ne varient pas le long de la côte;
 - Toutes les plages du monde peuvent être décrites au moyen d'une seule équation dont la granulométrie est la seule variable.

Or, toutes les équations de profil d'équilibre présentées ci-dessus, y compris celle de Bruun – Dean qui est largement utilisée par le « Coastal Engineering Manual » du Corps des Ingénieurs de l'armée américaine (U.S. Army Corps of Engineers, 2002) ont démontré, à des degrés divers, leurs limites à modéliser adéquatement les profils de plage de la zone côtière et de la plage aérienne, car aucune plage réelle ne peut satisfaire simultanément à l'ensemble des hypothèses sur lesquelles repose le concept de profil d'équilibre de plage (Romańczyk, Boczar-Karakiewicz, et Bona, 2005).

Annexe C

Mesure des vagues et des niveaux d'eau sur le terrain

Des mesures de terrain ont également été menées sur la plage de l'Anse aux Coques, à Sainte-Luce, durant l'automne 2014 en collaboration avec l'équipe du professeur Pascal Bernatchez, de la chaire de recherche en géosciences côtières de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR). Le but de cette campagne de mesures était de récolter l'information nécessaire à l'interprétation de la déformation du profil de la plage. Pour se faire, cinq sondes de niveaux d'eau *RBR solo* ont été déployées dans la partie ouest de la baie (Tableau C1) où la recharge de plage a été effectuée. Pour des fins de calibration avec le modèle, des vitesses de courant ont également été enregistrées à l'aide d'un mini profileur acoustique Doppler (mini-ADP) de Sontek (Figure C1).

Le 23 octobre 2014, soit immédiatement après la recharge de plage qui a été réalisée sur la plage de l'Anse aux Coques, les senseurs de pression et le courantomètre ont été déployés afin d'obtenir des conditions initiales et incidentes sur la plage. L'UQAR avait également entrepris l'étude des profils de plage avant et après la recharge. Ces informations sur les conditions dans la baie sont donc complémentaires et étaient inexistantes. Une autre expédition terrain nous a également permis d'échantillonner la plage pour des fins d'études granulométrique et géochimique (27 au 30 octobre 2014). Les batteries des appareils ont dû être changées lors d'une autre visite, les 19 et 20 novembre 2014, et les senseurs ont été retirés le 8 décembre 2014 avant d'être pris dans les glaces.

Au final, 4 des 5 sondes de pression ont enregistré des données de niveau d'eau sur l'estran et sur la plage (Fig. C1 et C2). La hauteur des vagues à l'approche des côtes a également été mesurée. Les mesures de courant dans la baie ont également été sauvegardées et ont montré des résultats très intéressants.



Figure C1. Emplacement des sondes de pression RBR enterrées (rouge) et de l'ADP (bleu) sur la plage de l'Anse aux Coques, Sainte-Luce, Québec (source : Corinne. Brunelle-Bourgault).

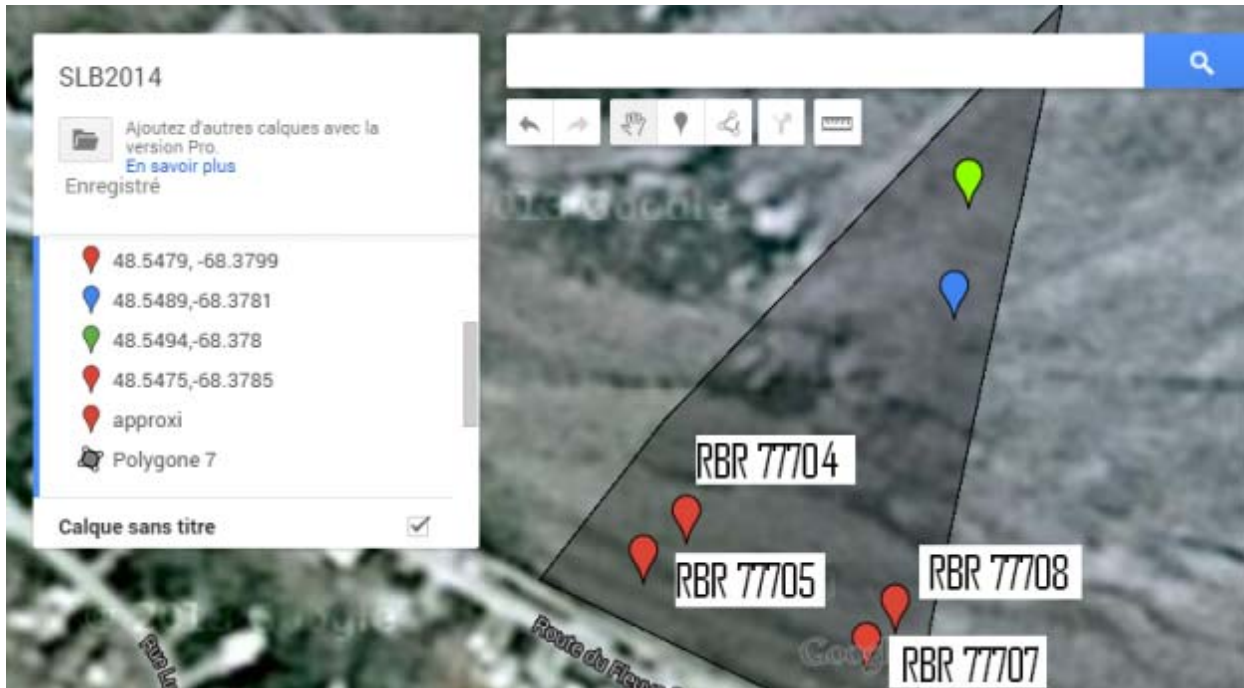


Figure C2. Identification et localisation des sondes de pression RBR enterrées (rouge) et de l'ADP (bleu) sur la plage de l'Anse aux Coques, Sainte-Luce, Québec. En vert : localisation du senseur RBR de l'équipe du Prof. Bernatchez, Chaire en géosciences côtières (source : Corinne Brunelle-Bourgault).

Tableau C1. Position des capteurs RBR à l'Anse aux coques : système de coordonnées MTM6.

Position RBR	Numéro	X (m)	Y (m)	Z (m)
Bas plage - EST	77707	5379159,05836	239821,01344	-0,00905
Estran - Est	77708	5379183,63433	239833,32299	-0,69508
Capteur de l'UQAR	-	5379358,15963	239954,00442	-1,59699
Bas plage - Ouest	77705	5379111,71928	239927,01953	0,16108
Estran - Ouest	77704	5379142,43878	239937,14349	-0,96252

Procédure pour la réalisation des spectres de vagues

1. Les données de la sonde RBR sont en voltage (V). Il faut donc en premier lieu convertir les données en pression à l'aide des constantes de calibration (a_0, a_1, a_2, a_3) fournies par le fabriquant :

$$p_{abs}[dbar] = a_0 + a_1V + a_2V^2 + a_3V^3$$

2. Il est ensuite possible de convertir la pression mesurée en hauteur d'eau. D'abord, les pressions sont ramenées en Pa, par rapport à la pression ambiante (la pression atmosphérique est soustraite). Ensuite, la conversion est effectuée selon la méthode proposée par le CEM (Coastal Engineering Manual) qui fait intervenir un facteur de correction pour tenir compte de la pression dynamique sous la vague (seule la composante statique doit être utilisée pour obtenir la hauteur de la colonne d'eau alors que la mesure de pression tient compte des deux). L'équation est la suivante :

$$\eta = \frac{p + \rho g z}{\rho g K_z}$$
$$K_z = \frac{\cosh\left(\frac{2\pi(z+d)}{L}\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)}$$

où p est la pression mesurée en Pa, ρ est la densité de l'eau (1020 kg m^{-3} pour une eau à 5°C et 26 g L^{-1} en salinité), z est l'élévation du capteur en mètre (la référence en élévation est à la surface), d est la profondeur (le fond est alors à $z=-d$) et L est une estimation de la longueur d'onde des vagues. Cette équation provient de la théorie linéaire des vagues. Une erreur peut donc se glisser dans le cas où l'amplitude des vagues est grande et/ou la profondeur est faible.

3. Un filtre passe-bas (essentiellement une moyenne mobile) est utilisé pour enlever une partie du bruit et pour soustraire la moyenne du signal au signal temporel. Il subsiste alors uniquement des oscillations (vagues) autour de zéro.
4. Une technique de « windowing » est employée. Elle consiste à traiter la totalité du signal par bloc. La longueur de ces blocs (fenêtre) est de 75 secondes (150 valeurs). La fenêtre utilisée est de type rectangulaire (aussi appelée boxcar ou Dirichlet).
5. J'effectue de façon séquentielle une fft sur chacune des fenêtres. Je prends la valeur absolue, je mets au carré (pour avoir l'énergie), je multiplie par 2 (pour tenir compte de

l'énergie des fréquences négatives), je divise par la fréquence d'échantillonnage (densité spectrale) et je normalise avec la longueur de mon signal :

$$S[m^2/Hz] = 2 * |FFT\{signal, NFFT\}|^2 / (L * Fs)$$

6. Je profite de la technique de « windowing » pour calculer la hauteur significative associée à chaque fenêtre. Je peux ainsi observer l'évolution de la hauteur significative dans le temps.

$$H_s = 4 \left[\int_0^{\infty} S df \right]^{\frac{1}{2}}$$

7. Pour avoir un spectre plus global et une hauteur significative moyenne sur toute la durée couverte par les fenêtres, je moyenne les spectres et les hauteurs obtenus avec chaque fenêtre.
8. La même procédure est employée pour les vagues en canal (étapes 3 à 7) mesurées à l'aide des jauges de niveau d'eau (jauge à capacitance). Dans ce cas, les fenêtres ont une longueur de 33 secondes (2000 valeurs). Aucune différence significative n'a été constatée en sous-échantillonnant à 2 Hz et en utilisant la même durée (67 valeurs).

function [F,Hs,freq] = FFT_Hs(x,f)

```
% Corinne B. Brunelle & Olivier Gauvin-Tremblay 2016

% Fast Fourier Transform
% Description : Dean and Darymple 1991
% Matlab référence :
% http://www.mathworks.com/help/signal/ug/psd-estimate-using-fft.html

% But : Retourne le spectre de densité de l'énergie et la hauteur de vague
% significative d'un signal de niveau d'eau

% x(:,1) : signal de niveau d'eau (m)
% f      : fréquence d'échantillonnage (Hz)
% F      : spectre de densité de l'énergie (m2/hz)
% Hs     : Hauteur significative des vagues (m)
% freq   : Axe des fréquences = plot(freq,F)

L=length(x);
NFFT = 2^nextpow2(L);
d=NFFT/2+1;

Y = fft(x,NFFT);
freq = f/2*linspace(0,1,d);
F = (2*abs(Y(1:d,1)).^2)/(L*f); % (m2/ hz)

int=freq(2)-freq(1);

for i=1:length(F)

    p(i,1)=int*F(i,1); % Intégration : méthode des rectangles

end

area=sum(p(2:length(p),1)); % Aire sous la courbe
Hs=4*sqrt(area);          % (par définition)
```

function [x] = pressure2elevation(A,f,T)

% Olivier Gauvin-Tremblay & Corinne B. Brunelle

%But : convertir pression en niveau d'eau

% A : signal du RBR Solo convertit en pression et dont la pression

% atmosphérique est soustraite

% A devrait être sous la forme : (a1+b1.*p+c1.*p.^2+d1.*p.^3-atm_press)

% où a1, b1, c1 et d1 sont donnés par la calibration du fabricant

% f : fréquence d'échantillonnage en (Hz)

% T : période significatives (s)

% 1) Moyenne mobile : Niveau d'eau moyen (peut varier dans le temps)

d=f*60*5; % 5 minutes de données

po=1025; % kg/m³

g=9.81; % m s⁻²

N=1; % égal à un pour la théorie linéaire

t=1;

for i=1+d/2:(length(A)-d/2)

z(t,1)=mean(A(i-d/2:i+d/2,1)); % mètre

t=t+1;

end

wl=A(d/2:length(A)-d/2-1);

for i=1:length(z);

if A(i,1)>0;

k(i,1)=smallawt(T,100*z(i,1)); % cm

Kz(i,1)=1./cosh(100*k(i,1)*z(i,1)); % mètre

x(i,1)=N*(10000*wl(i,1)-g*po*z(i,1))./(g*po*Kz(i,1));

else

x(i,1)=NaN;

end

end

% note : RBR est en decibar. l'expression po*g*z est en Pa.

% 1 Pa est égal à 1/100000 bar

end

function separate_wave_oli(nsd,nch,Amplitudes)

% Jérôme Landry, Corinne B. Brunelle & Olivier Gauvin-Tremblay 2016

% nsd : la longueur max de la série

% nch : nb de colonne de la matrice Amplitudes (!!)

dt=input('What is the sampling interval time (s)? '); % WG 60 hz

wdepth=input('What is the water depth (cm)? ');

dl=input('What is the interval distance of the 2 gauges (cm)? ');

period=input('What is the period of the incident wave (s) ');

start=input('Start cutting data at ');

pai=4*atan(1);

xk=smallawt_oli(pai,period,wdepth,irc);

nsd=length(Amplitudes(1,:));

nch=length(Amplitudes(:,1));

for j=start:nsd

 for i=1:nch

 sd(i,j-start+1)=Amplitudes(i,j);

 end

end

istart=1;

pbydt=period/dt;

pbydt12=period/(dt*12);

nn=(nsd-1)/floor(pbydt);

nn=((nsd-start)-1)/floor(pbydt);

disp('Number of data points in 1 wave=')

disp(pbydt)

disp('_____')

disp('Number of recorded waves=')

disp(nn)

disp('_____')

ietaf=1;

ietab=2;

skip=0;

for n=1:nn

 ristart=double(istart);

```

for k=1:13
    tpoint(k)=ristart+pbydt12*double(k-1);
    it1=floor(tpoint(k));
    it2=it1+1;

    if it2<=nsd
        etaf(k)=0;
        etab(k)=0;
        etaf(k)=sd(ietaf,it1)+(sd(ietaf,it2)-sd(ietaf,it1))/1*(tpoint(k)-double(it1));
        etab(k)=sd(ietab,it1)+(sd(ietab,it2)-sd(ietab,it1))/1*(tpoint(k)-double(it1));
    else
        nn=n;
        skip=1;
    end
end
if skip==0;
    istart=istart+floor(pbydt);
    a1(n)=((etaf(2)-etaf(6)-etaf(8)+etaf(12))*cos(pai/6)+(etaf(3)-etaf(5)-
etaf(9)+etaf(11))*cos(pai/3)+etaf(13)-etaf(7))/6;
    b1(n)=((etaf(2)+etaf(6)-etaf(8)-etaf(12))*sin(pai/6)+(etaf(3)+etaf(5)-etaf(9)-
etaf(11))*sin(pai/3)+etaf(4)-etaf(10))/6;
    a2(n)=((etab(2)-etab(6)-etab(8)+etab(12))*cos(pai/6)+(etab(3)-etab(5)-
etab(9)+etab(11))*cos(pai/3)+etab(13)-etab(7))/6;
    b2(n)=((etab(2)+etab(6)-etab(8)-etab(12))*sin(pai/6)+(etab(3)+etab(5)-etab(9)-
etab(11))*sin(pai/3)+etab(4)-etab(10))/6;

    win(n)=(1/abs(2*sin(xk*dl)))*((a2(n)-a1(n)*cos(xk*dl)-
b1(n)*sin(xk*dl)).^2+(b2(n)+a1(n)*sin(xk*dl)-b1(n)*cos(xk*dl)).^2).^(1/2);
    wref(n)=(1/abs(2*sin(xk*dl)))*((a2(n)-a1(n)*cos(xk*dl)+b1(n)*sin(xk*dl)).^2+(b2(n)-
a1(n)*sin(xk*dl)-b1(n)*cos(xk*dl)).^2).^(1/2);
    end
end

disp(' a1(1)=')
disp(a1(1))
disp('_____')
disp(' a2(1)=')
disp(a2(1))
disp('_____')
disp(' b1(1)=')
disp(b1(1))
disp('_____')
disp(' b2(1)=')
disp(b2(1))
disp('_____')
disp(' a1(2)=')
disp(a1(2))
disp('_____')

```

```

disp(' a2(2)=')
disp(a2(2))
disp('_____')

disp(' b1(2)=')
disp(b1(2))
disp('_____')
disp(' b2(2)=')
disp(b2(2))
disp('_____')
winmean=0;
wrefmean=0;

for n=1:nn
    %win(n)=win(n);
    %wref(n)=wref(n);
    winmean=winmean+win(n);
    wrefmean=wrefmean+wref(n);
end

winmean=winmean/double(nn);
wrefmean=wrefmean/double(nn);

disp(' incident wave amplitude=')
disp(winmean)
disp('_____')
disp(' reflected wave amplitude=')
disp(wrefmean)
disp('_____')

disp(' incident wave height=')
disp(winmean*2)
disp('_____')

disp(' reflected wave height=')
disp(wrefmean*2)
disp('_____')

disp('-----')
refcoe=wrefmean/winmean;
disp('reflection-coeff')
disp(refcoe)
disp('-----')

end

```

function xk=smallawt(periode,wdepth)

```
% Jérôme Landry, Corinne B. Brunelle & Olivier Gauvin-Tremblay 2016
% But: Calculer la longueur d'onde des vagues selon la théorie linéaire en fonction
% de la période et de la profondeur d'eau
% periode (s)
% wdepth (cm)

g=980;
pai2=2*3.1416;
angf=pai2/periode;
d=(wdepth/g)*(angf).^2;

stop=1;

if d>10
    xx=d;
    xk=xx/wdepth;
else
    if d<1
        x=sqrt(d);
    else
        x=d;
    end
    while stop==1
        cothx=1/tanh(x);
        xx=x-(x-d*cothx)/(1+d*((cothx.^2)-1));
        %xx=d*cothx;
        e=1-xx/x;
        x=xx;

        if abs(e)<0.005
            xk=xx/wdepth;
            stop=2;
        end
    end
end
end

% wlength=pai2*wdepth/xx;
% disp('_____')
% disp('Wave number=')
% disp(xk)
% disp('_____')
%
% disp('Wavelength=')
% disp(wlength)
% disp('_____')
```

end