Université du Québec INRS Eau, Terre et Environnement

Adaptation du SHOALS à la cartographie sédimentaire côtière peu profonde dans la Baie des Chaleurs, Québec, Canada.

Par Monsieur Antoine Cottin

Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophiae doctor (Ph.D.) en Doctorat en Sciences de la Terre

Jury d'évaluation

Président du jury

Examinateur interne

Examinateur externe

Examinateur externe

Directeur de recherche

Codirecteur de recherche

Dr. Monique Bernier, INRS-ETE

Dr. Pierre Francus, INRS-ETE

Dr. Paul LaRocque, Optech

Dr. Grady Tuell, Optech International

Dr. Bernard Long, INRS-ETE

Dr. Donald Forbes, NRCAN-CGC

©droits réservés de Antoine Cottin, 2008

Résumé

Ce travail a pour but d'adapter un LiDAR¹ bathymétrique, le SHOALS d'Optech, à la cartographie sédimentaire des zones côtières peu profondes en se basant uniquement sur les données du SHOALS. Ce système LiDAR émet à partir d'un support aéroporté, un double faisceau laser, un bleu-vert (532 nm) et un infra-rouge (1064 nm), qui ont pour vocation respective, de détecter les fonds marins et de localiser la surface du plan d'eau. Les LiDAR bathymétriques aéroportés assurent un relevé conjoint des zones terrestres et des premiers mètres des zones marines en évitant les zones où la navigation est hasardeuse voir impossible.

Pour réaliser cette adaptation, trois axes de recherches sont développés et portent sur : l'étude bathymétrique, l'étude des corps sédimentaires et des processus hydrodynamiques associés et la cartographie sédimentaire proprement dite.

Les sites d'études sont localisés sur la côte nord de la baie des Chaleurs dans les localités de Saint-Siméon-Bonaventure et Paspébiac qui représentent deux types d'environnements silico-clastique côtiers, de faible énergie et de moyenne énergie. Le matériel silico-clastique est composé de grès rouges fluviatiles et deltaïques d'environnement semi-aride constitués principalement de particules clastiques grossières de type conglomérats, grès, sitlstones et mudstones.

Ce travail a nécessité le développement sous IDL d'un objet informatique indispensable à la lecture, à l'utilisation et à la visualisation des données SHOALS utilisées pour ce projet. Les méthodes d'analyse de la bathymétrie et des corps sédimentaires se basent sur des profils d'élévation réalisés sur les modèles bathymétriques obtenus avec le SHOALS. A partir de ces profils, des amplitudes, des épaisseurs, des directions et des orientations sont déterminées. La méthode de cartographie sédimentaire s'appuie sur une triple analyse des données SHOALS qui consistent en une modélisation du signal de retour du fond par une gaussienne et d'en déterminer ses paramètres (sa moyenne, son écart type et son poids dans le mélange), en une analyse morphologique du signal de retour du fond

¹ Light Detection And Ranging

vi

suite à son extraction (amplitude, longueur et angle) et un filtrage de différents paramètres (rugosité, densité de points, pente) du fond marin.

L'étude des données bathymétriques du SHOALS montre qu'il est possible de réaliser des cartes bathymétriques rapidement. En outre, la précision des données de LiDAR bathymétrique est supérieure à la capacité cartographique et permet donc de mettre en évidence des structures sédimentaires et géologiques de taille décimétrique.

De plus, la comparaison bathymétrique des données du SHOALS avec d'autres sources montre des degrés de corrélations variables. Les corps sédimentaires et les processus hydrodynamiques se traduisent par des zones d'érosion, des flèches sableuses, des barres d'avant côte, des champs de dunes ou encore des chenaux fluviatiles et leur remplissage. De plus, l'empilement vertical de ces différentes structures permet de proposer une chronologie de mise en place, utile pour connaître l'évolution à court terme du système, qui est basée sur les relations topographiques et géométriques des différentes structures morpho-sédimentaires.

Les cartes sédimentaires, obtenues à partir des méthodes d'analyses développées, sont cohérentes, dans la majorité des cas, avec les investigations de terrain.

Les résultats obtenus à l'issue de ce travail démontrent l'apport majeur de l'utilisation des données de LiDAR bathymétrique pour l'étude et le suivi des zones côtières peu profondes, que ce soit dans des applications de cartographie bathymétriques à haute résolution, de cartographie des corps sédimentaires et de leur dynamique et de cartographie et de caractérisation de faciès sédimentaires.

Antoine COTTIN

Bernard LONG

à Jules, Octave, Marius et Adèle

х

Merci à :

Bernard Long, mon directeur et Don Forbes, mon codirecteur pour leurs précieux conseils et leur soutien. Le Centre d'Excellence Geoide pour avoir financé le projet FUDOTERAM. Optech, l'USACE et la NAVO pour le prêt du SHOALS, Dynamic Aviation pour l'avoir emmené dans les airs et l'équipe d'Optech pour leurs longues heures de travail nécessaires au post-traitement des données. Les membres du projet FUDOTERAM, directeurs de recherche et étudiants. Karen Francis, Paul LaRocque, David Reid et Wayne Szameitat (Optech) pour leur aide. Bjorn Roth, Fernando Santoro, James Jay Jones, Margaret Shippert, Mari P. Minari (support IDL). Duane Snyder et Michael Umansky (Applied Imagery). Alexander Goetz, Gary Fager, Nate Bloomingdale, Amanda Griffin (Analytical Spectral Device, Inc). Phoebe Hauff (Spectral International Inc.). Jennifer Wozencraft et Jeff Lillycrop (JABLTCX). Don Roman (USM). Danielle Romanick et Claude Labine (Campbell Scientific Canada). David Streutker, Ohad Gal et Stefano Gagliano. Les étudiants du laboratoire de Bernard Long. Monique Bernier (INRS-ETE), Pierre Francus (INRS-ETE), Paul LaRocque (Optech) et Grady Tuell (Optech International) pour leurs corrections.

Adèle, Dikka, Fatoumata, Michel, Michèle, Pierre, Suzanne et mes parents.

xii

Sommaire

1. Introduction	xxiii
1.1. Nécessité d'une meilleure connaissance des environnements littorau	ıx3
1.2. Une méthode d'avenir : le LIDAR bathymétrique	5
1.2.1. Le LiDAR Bathymétrique, un état des utilisations actuelles et de la signification	on des données
obtenues	8
1.2.2. Des travaux sur la déformation du signal de retour	9
1.2.3. Meilleure définition du trait de côte	9
1.2.4. Cartographie des fonds marins peu profonds	9
1.3. Un exemple de référence : la Baie des Chaleurs, Gaspésie (Québec)) 14
1.4. But et présentation du travail	
2. Matériels et Méthodes	
21 La campagne aéroportée	21
2.1.1 Le LiDAR hathymétrique d'Optech le SHOALS	21
2.1.1.1. Historique	
2.1.1.2. Description du système	
i. Le mode hydrographique	24
ii. Le mode topographique	24
iii. Paramètres de relevé	24
iv. Principe de fonctionnement	25
v. Shallow Green channel(SGC) et le Deep Green channel(DGC):	26
vi. Raman channel:	26
vii. Infra-red channel:	27
2.1.1.3. Contraintes de conceptions	
2.1.1.4. Paramètres d'erreur	
i. Dans l'air	
11. A l'interface air/eau	
in. Surface au pian a eau	20
W. Dans la colonne a eau	20
 7 1 1 5 Précision des données 	30
2.1.1.5. Trecision des données	30
2.1.1.7. Choix des paramètres de vol pour le relevé dans la Baie des Chaleurs. Gas	spésie. Ouébec.
Canada.	
2.1.1.8. Performance théorique du système durant la période de relevé	
2.1.1.9. Exemple de données	
2.1.1.10. Période et lieux de relevés	
2.2. Les campagnes hydrographiques	
2.2.1. Le Seistek-IBK	
2.2.1.1. Principe	35
2.2.1.2. Paramètres d'erreur	
2.2.1.3. Résolution spatiale	
2.2.1.4. Exemple de donnée	
2.2.1.5. Périodes de relevés	
2.2.2. Le Sonar à balayage latéral	
2.2.2.1. Principe	
2.2.2.2. Paramètres d'erreur	
2.2.2.3. Résolution spatiale	
2.2.2.4. Periode et lieux de releves	
2.2.2.5. Exemple de donnée	
2.2.3. Intesures de renectance avec le rieldspecto mandheid	
2.2.3.1. FIMUIPE 2.2.3.2. Paramàtres d'errour	

2233 Problèmes rencontrés	44
2.2.5.5. Existence at leave a relaxia	44
2.2.3.5 Feriode et field de releves	45
2.2.3.4. Exemple de donnees.	40
2.2.4. Mesures de disque de Secchi	47
2.2.4.1. Principe	47
2.2.4.2. Paramètres d'erreur	
2.2.4.3. Période et lieux de relevés	48
2.2.5. Echantillons d'eau	49
2.2.5.1. Principe	49
2.2.5.2. Traitement	49
2.2.5.3. Observations et limitations	49
2.2.5.4. Période et lieux de relevés	49
2.2.5. Vidéo sous-marine	50
2.2.5.1. Principe	50
2.2.5.2. Résolution spatiale	50
2.2.5.3. Période et lieux de relevés	50
2.2.5.4. Exemple de donnée	51
2.2.6. Échantillons sédimentaires	52
2.2.6.1 Traitement	
2.2.6.7 Période et lieux de relevés	52
2.2.6.2. Fyemple de donnée	53
2.2. Los compagnes de terroin	51
2.5. Les campagnes de terrain	
2.3.1. Echantillons sedimentaires	54
2.3.1.1. Traitement	54
2.3.1.2. Exemple de donnée	54
2.3.1.3. Période et lieux de relevé.	54
2.3.2. Mesures de réflectance hyperspectrale	54
2.3.2.1. Principes	54
2.3.2.2. Paramètres d'erreur	54
2.3.2.3. Exemple de données	54
2.3.2.4. Période et lieux de relevés	54
3. Description des sites d'études	55
3.1. Contexte géologique	55
3.2. Contexte hydrographique	
3 2 1 Les marées	58
3 2 2 1 Les haules	59
3.3. Contexta mátéorologique	50
2 2 1 Les vents	
2.4. Contexta hydrographiqua	
2.5. Description du site de Description	00
2.5.1. Céamamhalagia aitidhe	00
2.5.2. Los plagos	
3.5.2. Les plages	01
3.6. Description du site de Bonaventure	02
3.6.1. Geomorphologie cotiere	
3.6.2. Les plages	63
4. Conception des outils d'analyses et d'interprétations des données analytiques	65
4.1. Étude des données bathymétriques issues du SHOALS et comparaison	des
résultats obtenus avec des documents cartographiques antérieurs disponibles	67
4 1 1 Carte hydrographique SHC (1979)	67
4.1.2 Relevé bathymétrique Long (2006)	
4.1.2. Notive ballymentque Long (2000)	60
4.2 Dávalannament de techniques de viscolization et deselves des deselves des	071
4.2. Developpement de tecnniques de visualisation et d'analyse des données SHOAL	1101
4.2.1. Description de la structure des données fournies par Optech	71
4.2.1.1. Les fichiers de positionnements	71
4.2.1.2. Les fichiers contenant les signaux laser	72

4.2.1.3. Utilisation des fichiers de données	73
4.2.1.4. Linéarisation des données	73
4.2.2. SHOALS Viewer version Béta, un visualisateur de données sous IDL	75
4.2.2.1. Fonctions	75
4.2.2.2. Trois concepts nécessaires à la manipulation des données du SHOALS	76
i. Association dynamique des fichiers LAS et INW	76
ii. Subdivision des données selon des coordonnées géographiques (point, profil)	82
Subdivision vectorielle selon un vecteur.	83
Subdivision vectorielle selon un point	84
4.2.2.3. Concept de programmation objet sous IDL	85
4.2.2.4. Description de la Classe SHOALSOBJECT et ses méthodes	85
i. Les méthodes d'initialisations	86
i.1. SHOALSOBJECT::INIT	86
i.2. SHOALSOBJECT::LOAD DATA	86
i.3. SHOALSOBJECT::CHANGE	
i.4. SHOALSOBJECT::CLEANUP	
ii. Les méthodes d'informations	
ii 1 SHOALSOBJECT···HELP	88
ii 2 SHOALSOBJECT: GETPROPERTY	88
ii 3 SHOALSOBJECT: FLIGHT INFO	89
ii 4 SHOALSOBJECT: REPORT	89
iii. Les méthodes de travail	
iii 1 SHOALSOBJECT::PLOT	
iii 2. SHOALSOBJECT::WAVEFORM	90
iii 3 SHOALSOBJECT WAVEFORM ANALYSIS	
iii 4 SHOALSOBJECT···RIJFFER	
iii 5 SHOALSOBIECT"ROUND BUFFER	
4.2.3. Description d'un signal de retour typique	92
4.2.4. Analyse automatique du signal de retour, stratégies et limitations	93
4.2.4.1. Détection du retour de surface	94
4.2.4.2. Détection du retour du fond	94
4.2.4.3. Détection du début et de la fin de la colonne d'eau	94
4.2.4.4. Définitions des limites pour encadrer la recherche	95
4.2.4.5. Limitations	95
4.2.5. Analyse du signal de retour dans le but d'effectuer une classification sédimentaire du	ı fond
marin	97
4.2.5.1. Analyse par mixture gaussienne.	97
i. Théorie	97
ii. Fondement mathématique	98
ii.1. Définition de base	98
ii.2. Phase d'initialisation	98
ii.3. Phase d'itération	99
iii. Exemple de résultats obtenus	100
iv. Problèmes rencontrés et limitations	101
4.2.5.2. Analyse de la morphologie du signal du fond	101
i. Théorie	101
ii. Symétrie du signal	102
iii. Aplatissement du signal	102
iv. Amplitude du signal	102
v. Longueur totale du signal	102
vi. Longueur du côté gauche du signal	103
vii. Angle du côté gauche du signal	103
viii. Longueur du côté droit du signal	103
ix. Angle du côté droit du signal	103
x. Analyse globale du signal	103
xi. Analyse du nuage de points	104

xii Densité des points	104
xiji Rugosité de la topographie	104
riv Profondeur	104
riv 1 Correction du zéro des fichiers I 4S par rannort aux cartes hydrographiques	104
vv. Frample de résultate obtanue	104
xv. Exemple de resultais objernas xvi Problèmes rencontrés et limitations	100
4.2.6. Classification supervisés et classification sédimentaire	100
4.2.6. Unassification supervised et classification sedimentalie	109
4.2.6.1. Definition des snes d'apprentissage	111
4.2.6.2. Methode du nuage de points	112
4.2.6.3. Methode des images multi-bandes	115
1. Transformation des données multi-bandes par une analyse en composante principale	115
ii. Calcul des indices de séparabilité des régions d'apprentissages	. 115
iii. Calcul de la matrice de confusion pour estimer la qualité du résultat	117
4.2.6.4. Exemple de résultat obtenu sur la zone test n°5	118
4.2.6.5. Interprétation croisée avec un modèle 3D	122
i. Principe	122
ii. Interprétation	122
4.2.6.6. Généralisation de la procédure pour l'ensemble des zones d'études	124
i. Problèmes rencontrés	125
i.1. Limitation de la méthode	125
i.2. Limitation environnementale	126
ii. Optimisation des résultats obtenus grâce à un arbre de décision	127
4.2.7.1. Principes	129
5 Analyse des données du SHOALS obtenues dans la Baie des Chaleurs : significati	ons
5. Analyse des données du STICALS obtendes dans la Date des Chalcurs : signification	121
et vandite	131
5.1. Performance du SHOALS et qualité des résultats obtenus lors du relevé de jui	llet
2006 dans la Baie des Chaleurs, Québec, Canada.	134
5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté	134
5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté	134 135
5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté 5.1.2. Pénétration minimum et maximum 5.1.2.1. Estimation de la performance du SHOALS par Optech International	134 135 135
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté	134 135 135 surs.
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté	134 135 135 eurs, 136
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté	134 135 135 eurs, 136 138
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté	134 135 135 eurs, 136 138 139
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté	134 135 135 2015, 136 138 139
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté	134 135 135 2007, 136 138 139 139
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté	134 135 135 eurs, 136 138 139 139 139
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté	134 135 135 eurs, 136 138 139 139 139 145
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté	134 135 135 eurs, 136 138 139 139 139 145 150
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté	134 135 135 2015, 136 138 139 139 139 139 145 150 150
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté	134 135 135 2017s, 136 138 139 139 139 139 139 145 150 150 154
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté	134 135 135 2015, 136 138 139 139 139 145 150 150 154 154
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté	134 135 135 2017s, 136 138 139 139 139 139 145 150 150 154 154 154
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté	134 135 135 eurs, 136 138 139 139 139 139 145 150 150 154 154 158 159
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté	134 135 135 2007, 136 138 139 139 139 145 150 150 154 154 154 158 159 5 de
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté	134 135 135 2007, 136 138 139 139 139 145 150 150 154 154 154 158 159 5 de 159
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté. 5.1.2. Pénétration minimum et maximum. 5.1.2.1. Estimation de la performance du SHOALS par Optech International	134 135 135 2007, 136 138 139 139 139 145 150 150 154 154 158 159 5 de 159 5 sur
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté. 5.1.2. Pénétration minimum et maximum. 5.1.2.1. Estimation de la performance du SHOALS par Optech International. 5.1.2.2. Performance du SHOALS observée lors du relevé réalisé dans la Baie des Chale Canada, en juillet 2006. 5.1.3. Trous dans les jeux de donnés. 5.1.4. Comparaison bathymétrique entre les différentes sources de données. 5.1.4.1. Zone de Saint-Siméon-Bonaventure à Ruisseau-Leblanc. <i>i. Embouchure de la rivière Bonaventure à Ruisseau-Leblanc</i>. 5.1.4.2. Zone de Paspébiac à Saint-Godefroi. <i>i. barachois de Paspébiac</i>. <i>ii. Zone de Saint-Godefroi</i> 5.1.5. Conclusion 5.2.1. Description des structures sédimentaires à l'avant du barachois de Paspébiac. 5.2.1.2. Comparaison des deux modèles et de l'effet de la différence de densité de points au sol les structures cartographiées. 	134 135 135 2015, 136 138 139 139 139 145 150 150 154 154 158 159 5 de 159 5 sur 164
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté. 5.1.2. Pénétration minimum et maximum. 5.1.2.1. Estimation de la performance du SHOALS par Optech International. 5.1.2.2. Performance du SHOALS observée lors du relevé réalisé dans la Baie des Chale Canada, en juillet 2006. 5.1.3. Trous dans les jeux de donnés. 5.1.4. Comparaison bathymétrique entre les différentes sources de données. 5.1.4.1. Zone de Saint-Siméon-Bonaventure à Ruisseau-Leblanc. <i>i. Embouchure de la rivière Bonaventure à Ruisseau-Leblanc</i>. 5.1.4.2. Zone de Paspébiac à Saint-Godefroi. <i>i. barachois de Paspébiac</i>. 5.1.5. Conclusion 5.2.1. Description des structures sédimentaires à l'avant du barachois de Paspébiac. 5.2.1.2. Comparaison des deux modèles et de l'effet de la différence de densité de points au sol les structures cartographiées. 5.2.1.3. Interprétation. 	134 135 135 136 138 139 139 139 145 150 150 154 154 154 158 159 5 de 159 5 de 159 5 de
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté	134 135 135 137 138 139 139 139 139 145 150 150 154 154 158 159 5 de 159 5 de 159 5 de
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté. 5.1.2. Pénétration minimum et maximum. 5.1.2.1. Estimation de la performance du SHOALS par Optech International	134 135 135 137 138 139 139 139 139 145 150 150 154 155 155 155 159 s de 159 s de 159 s de 159 s de 165 165 265 : .
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté. 5.1.2. Pénétration minimum et maximum. 5.1.2.1. Estimation de la performance du SHOALS par Optech International	134 135 135 137 138 139 139 139 139 145 150 150 150 154 158 159 s de 159 s de 159 s urs, 164 165 165 165 165
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté. 5.1.2. Pénétration minimum et maximum 5.1.2.1. Estimation de la performance du SHOALS par Optech International 5.1.2.2. Performance du SHOALS observée lors du relevé réalisé dans la Baie des Chale Canada, en juillet 2006. 5.1.3. Trous dans les jeux de donnés. 5.1.4. Comparaison bathymétrique entre les différentes sources de données. 5.1.4.1. Zone de Saint-Siméon-Bonaventure à Ruisseau-Leblanc. <i>i. Embouchure de la rivière Bonaventure</i> <i>ii. Du marais de Saint-Siméon-Bonaventure à Ruisseau-Leblanc</i> 5.1.4.2. Zone de Paspébiac à Saint-Godefroi <i>i. barachois de Paspébiac</i> 5.1.5. Conclusion 5.2. Structures sédimentaires et processus hydrodynamiques 5.2.1. Description des différents ensembles morpho-sédimentaires à l'avant du barachois de paspébiac. 5.2.1.2. Comparaison des deux modèles et de l'effet de la différence de densité de points au sol les structures cartographiées. 5.2.1.3. Interprétation. <i>i. Un essai de séquence de mise en place</i> <i>ii. Existence d'un double sens dans les champs de dunes à l'avant du barachois de Paspébia</i> 5.2.2. Description duite de Saint-Godefroi 	134 135 135 137 138 139 139 139 139 139 139 139 145 150 150 150 154 154 158 159 s de 159 s de 159 s de 165 165 168 173
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté. 5.1.2. Pérétration minimum et maximum 5.1.2.1. Estimation de la performance du SHOALS par Optech International 5.1.2.2. Performance du SHOALS observée lors du relevé réalisé dans la Baie des Chale Canada, en juillet 2006. 5.1.3. Trous dans les jeux de donnés. 5.1.4. Comparaison bathymétrique entre les différentes sources de données. 5.1.4.1. Zone de Saint-Siméon-Bonaventure à Ruisseau-Leblanc <i>i. Embouchure de la rivière Bonaventure</i> <i>ii. Du marais de Saint-Siméon-Bonaventure à Ruisseau-Leblanc</i> 5.1.4.2. Zone de Paspébiac à Saint-Godefroi <i>i. barachois de Paspébiac</i> <i>ii. Zone de Saint-Godefroi</i> 5.1.5. Conclusion 5.2. Structures sédimentaires et processus hydrodynamiques 5.2.1.1. Description des différentes ensembles morpho-sédimentaires à l'avant du barachois de Paspébiac. 5.2.1.2. Comparaison des deux modèles et de l'effet de la différence de densité de points au sol les structures cartographiées. 5.2.1.3. Interprétation. <i>i. Un essai de séquence de mise en place</i> <i>ii. Existence d'un double sens dans les champs de dunes à l'avant du barachois de Paspébia</i> 5.2.2.1. Description (Figure 62). 	134 135 135 135 138 139 139 139 139 145 150 150 150 154 154 154 158 159 s de 159 s de 159 s de 159 s de 164 165 168 173 173
 5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté	134 135 135 135 138 139 139 139 139 139 139 145 150 154 154 154 154 154 155 159 s de 159 s de 159 s de 164 165 168 173 173

5.2.3.2 Plage à Norbert 181 5.2.3.2 Plage à Norbert 182 5.2.3.2 Port de Ruisseau-Leblanc 183 5.2.3.2 Porto Ruisseau-Leblanc 183 5.3.2 Arrochement de Caplan 184 5.3.2 Arrochement de Caplan 184 5.3.1 Méthode de fusion des données obtenues par les approches de modélisation et d'analyse du signal de retour du fond du SHOALS 186 5.3.2 Exremple de classification sédimentaire fine obtenue sur des zones tests (avant application de la wméthode de fusion des données »). 191 5.3.2.1 Classification sédimentaire fine de la zone 1 (Figure 75) 192 <i>i</i> . Description des résultats. 192 <i>i</i> . Description des résultats. 195 5.3.2.3 Classification sédimentaire fine de la zone 7 (Figure 77) 195 <i>i</i> . Description des résultats. 195 5.3.2 Classification sédimentaires proseites poservés 195 5.3.3 Classification sédimentaires fine de la zone 8 (Figure 79) 198 <i>i</i> . Description des résultats. 198 10 5.3.3 Lescription des résultats. 198 5.3.3 Lescription des résultats.	5 2 3 1 Hone Town	190
5.2.3.2. Embouchure de la petite Bonaventure [82] 5.2.3.2. Enrochement de Caplan [83] 5.2.3.2. Enrochement de Caplan [84] 5.2.4. Discussion [85] 5.3. Carte sédimentaires issue de la classification des données du SHOALS [86] 5.3.1. Méthode de fusion des données obtenues par les approches de modélisation et d'analyse du signal de retour du fond du SHOALS [86] 5.3.2. Exemple de classification sédimentaire fine obtenue sur des zones tests (avant application de la « méthode de fusion des données ») [92] 5.3.2. Exemple de classification sédimentaire fine de la zone 1 (Figure 75) [92] i. Description des rios faciès sédimentaires observés [92] i. Description des résultats [95] i. Description des résultats [95] i. Description des résultats [95] 5.3.2.3. Classification sédimentaire fine de la zone 8 (Figure 79) [95] 5.3.2.3. Classification sédimentaires observés [95] i. Description des résultats [96] i. Description des résultats [96] i. Description des résultats [96] 5.3.3.4. Classification-sédimentaires proposée sports fusion des données [96] 5.3.3.1. Description [96] Scittas sédimentaires proposée sorts fusio	5.2.3.2 Dlage à Norbert	191
5.2.3.2 Port de Ruisseau-Leblanc 183 5.2.3.2 Enrochement de Caplan 184 5.2.3.2 Enrochement de Caplan 185 5.3.3. Carte sédimentaires issue de la classification des données du SHOALS 186 5.3.1 Méthode de fusion des données obtenues par les approches de modélisation et d'analyse du signal de cretor du fond du SHOALS 186 5.3.2. Exemple de classification sédimentaire fine obtenue sur des zones tests (avant application de la « méthode de fusion des données »). 191 5.3.2.1. Classification sédimentaire fine de la zone 1 (Figure 75) 192 i. Description des résultas. 192 5.3.2.2. Classification sédimentaires observés 192 i. Description des résultas. 192 s.3.2.3. Classification sédimentaire fine de la zone 8 (Figure 79) 195 i. Description des résultas. 195 s.3.2.3. Classification sédimentaire fine de la zone 8 (Figure 79) 198 i. Description des résultas. 198 i. Description des résultas. 198 s.3.3. Cartes sédimentaires fine de la zone 8 (Figure 72) 201 s.3.3. Cartes sédimentaires proposées apres fusion des données	5.2.3.2. Filage a Noi oct	101
5.2.3.2 Enrochement de Capian 184 5.2.4. Discussion 185 5.3. Carte sédimentaires issue de la classification des données du SHOALS 186 5.3.1. Méthode de fusion des données obtenues par les approches de modélisation et d'analyse du signal de retour du fond du SHOALS 186 5.3.2. Exempte de classification sédimentaire fine obtenue sur des zones tests (avant application de la « méthode de fusion des données »). 191 5.3.2.1. Classification sédimentaire fine de la zone 1 (Figure 75) 192 i. Description des reis/aciès sédimentaires observés 192 5.3.2.2. Classification sédimentaire fine de la zone 7 (Figure 77) 195 5.3.2.3. Classification sédimentaires observés 193 i. Description des reing faciès sédimentaires observés 195 i. Description des réaultats. 195 5.3.2.3. Classification sédimentaires fine de la zone 8 (Figure 79) 198 i. Description des réaultats. 198 i. Description des réaultats. 198 i. Description des reing taciès neuf sédimentaires observés 198 i. Description des reing taciès neuf sédimentaires observés 198 i. Description des daciès neuf sédimentaires observés 198 i. Description des cartes sédimentaires proposées après fusion des données. 201	5.2.3.2. Diffuorentie de la petite Donaventure	102
12.2.2. Discussion 185 5.2.4. Discussion 185 5.3. Carte sédimentaires issue de la classification des données du SHOALS 186 5.3.1. Méthode de fusion des données obtenues par les approches de modélisation et d'analyse du signal de retour du fond du SHOALS 186 5.3.2. Exemple de classification sédimentaire fine obtenue sur des zones tests (avant application de la « méthode de fusion des données »). 191 5.3.2. L. Classification sédimentaire fine de la zone 1 (Figure 75). 192 i. Description des résultats. 192 5.3.2.2. Classification sédimentaire fine de la zone 7 (Figure 77). 195 i. Description des résultats. 192 5.3.2.3. Classification sédimentaire fine de la zone 8 (Figure 79) 198 i. Description des résultats. 195 5.3.2.3. Classification sédimentaires observés 198 i. Description des résultats. 198 i. Description des résultats. 198 i. Description des résultats. 198 5.3.3. Cartes sédimentaires proposées pour l'ensemble des sites d'étude 201 i. Site de Paspébiac : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72) 201 i. Site de Paspébiac : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72) 201 i. Site de Paspébiac : carte	5.2.3.2. For de Ruisseau-Leolanc	105
5.3. Carte sédimentaires issue de la classification des données du SHOALS 186 5.3. Carte sédimentaires issue de la classification des données du SHOALS 186 5.3. Exemple de classification sédimentaire fine obtenue sur des zones tests (avant application de la « méthode de fusion des données »). 191 5.3.2. Carte sedimentaire fine de la zone 1 (Figure 75) 192 i. Description des trois faciès sédimentaires observés 192 5.3.2. Cartes intentaires observés 192 5.3.2. Cartes intentaires intentaires observés 192 5.3.2. Cartes intentaires intentaires observés 195 i. Description des résultats 195 s.3.2. Classification sédimentaire fine de la zone 7 (Figure 77) 195 s.3.2. Cartes sition sédimentaires observés 198 i. Description des résultats 195 s.3.2. Cartes sédimentaires proposées pour l'ensemble des sites d'étude 201 5.3.3. Description des résultats 198 i. Description des résultats 198 i. Description des résultats 198 i. Description des résultats 198 s.3.3. Description des résultats 201 s.3.1. Description des résultats 201 s.3.2. Droblèmes rencontrés pour réaliser ces cartes	5.2.4 Discussion	104
5.3. Carte sectimentaires issue de la classification des données du SHOALS 186 5.3.1. Méthode de fusion des données obtenues par les approches de modélisation et d'analyse du signal de retour du fond du SHOALS 186 5.3.2. Exemple de classification sédimentaire fine obtenue sur des zones tests (avant application de la « méthode de fusion des données »). 191 s.3.2. L'Aussification sédimentaire fine de la zone 1 (Figure 75) 192 i. Description des rois faciés sédimentaires observés 192 5.3.2. Classification sédimentaire fine de la zone 7 (Figure 77) 195 i. Description des cinq faciés sédimentaires observés 195 i. Description des rois faciés sedimentaires observés 195 s.3.2. Classification sédimentaire fine de la zone 8 (Figure 79) 198 i. Description des faciés neuf sédimentaires observés 198 i. Description des résultats 198 s.3.3. Cartes sédimentaires proposées pour l'ensemble des sites d'etude 201 s.3.3. L Description 201 s.3.3. L des prébiac : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72) 201 i. Site de Paspébiac : carte solutentaire proposée après fusion des données 200 213 s.3.3. Description 201 5.3.3.2. Problèmes rencontrés pour réaliser ceartes de des prés fusion des données 201 s.3.4. Frobl	5.2.4. Discussion	185
5.3.1. Méthode de fusion des données obtenues par les approches de modélisation et d'analyse du signal de retour du fond du SHOALS. 186 5.3.2. Exemple de classification sédimentaire fine obtenue sur des zones tests (avant application de la « méthode de fusion des données »). 191 5.3.2. L'Acssification sédimentaire fine de la zone 1 (Figure 75). 192 <i>i. Description des trois faciès sédimentaires observés</i> . 192 <i>i. Description des rois faciès sédimentaires observés</i> . 192 5.3.2. Classification sédimentaire fine de la zone 7 (Figure 77). 195 5.3.2. Classification sédimentaire fine de la zone 8 (Figure 79) 198 s.3.3. Classification sédimentaires observés 198 <i>i. Description des faciès neuf sédimentaires observés</i> . 198 <i>i. Description des faciès neuf sédimentaires observés</i> . 198 s.3.3. Cartes sédimentaires proposées pour l'ensemble des sites d'étude 201 s.3.3.1. Description 201 <i>i. Site de Paspéhac : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72)</i> 201 <i>i. Site de Paspéhac : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72)</i> 201 <i>i. Site de Paspéhac : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72)</i> 201 <i>i. Site de Paspéhac : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72)</i> 201 <i>i. Site de Paspéhac : cartes</i>	5.3. Carte sedimentaires issue de la classification des données du SHOALS	186
signal de retour du fond du SHOALS 186 5.3.2. Exemple de classification sédimentaire fine obtenue sur des zones tests (avant application de la « méthode de fusion des données »). 191 5.3.2. L. Classification sédimentaire fine de la zone 1 (Figure 75) 192 <i>i. Description des rois facis sédimentaires observés</i> . 192 <i>i. Description des rois facis sédimentaires observés</i> . 192 5.3.2. Classification sédimentaire fine de la zone 7 (Figure 77) 195 <i>i. Description des résultats</i> . 195 5.3.2.3. Classification sédimentaires observés 195 5.3.2.3. Classification sédimentaires observés 198 <i>i. Description des résultats</i> . 198 <i>i. Description des faciès neuf sédimentaires observés</i> 198 <i>i. Description des résultats</i> . 198 <i>socription des faciès neuf sédimentaires observés</i> 198 <i>i. Description des résultats</i> . 198 <i>i. Description des résultats</i> . 198 <i>i. Description des faciès neuf sédimentaires observés</i> 198 <i>i. J. Description des faciès neuf sédimentaires observés</i> 198 <i>i. J. Description des faciès neuf sédimentaires observés</i> 201 <i>s. Site de Paspébiac</i> : <i>cartes brutes avant fusion des données</i> (Figure 72) 201	5.3.1. Méthode de fusion des données obtenues par les approches de modélisation et d'analy	/se du
5.3.2. Exemple de classification sédimentaire fine obtenue sur des zones tests (avant application de la « méthode de fusion des données »). 191 5.3.2.1. Classification sédimentaire fine de la zone 1 (Figure 75) 192 <i>i. Description des résultats</i> . 192 <i>i. Description des résultats</i> . 192 5.3.2.2. Classification sédimentaires observés 192 <i>i. Description des résultats</i> . 195 <i>i. Description des résultats</i> . 195 5.3.2.3. Classification sédimentaires observés 195 <i>i. Description des résultats</i> . 195 5.3.2.3. Classification sédimentaires observés 198 <i>i. Description des résultats</i> . 198 <i>i. Description des résultats</i> . 198 5.3.3. Cartes sédimentaires proposées pour l'ensemble des sites d'étude 201 5.3.3.1. Description 201 <i>i. Site de Paspébiac</i> : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72) 201 <i>ii. Site de Paspébiac</i> : cartes sédimentaires proposée après fusion des données 209 5.3.3.2. Problèmes rencontrés pour réalites res cartes sédimentaire proposée avec des photographies sous-marines collectées pendant la carte sédimentaire proposée avec des relevés de sonar à balayage latéral réalisés predatant l'été 2005. 217 <i>i. Site de Paspébiac</i> : 216 <	signal de retour du fond du SHOALS	186
« méthode de fusion des données »). 191 5.3.2.1. Classification sédimentaires fine de la zone 1 (Figure 75). 192 i. Description des trois faciès sédimentaires observés. 192 i. Description des cinq faciès sédimentaires observés. 192 5.3.2.2. Classification sédimentaires fine de la zone 7 (Figure 77). 195 i. Description des cinq faciès sédimentaires observés. 195 i. Description des résultats. 195 5.3.2.3. Classification sédimentaires fine de la zone 8 (Figure 79) 198 i. Description des résultats. 198 i. Description des résultats. 198 i. Description des résultats. 198 5.3.3.1. Description 201 i. Site de Paspébiac : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72) 201 i. Site de Paspébiac : cartes sédimentaires proposée après fusion des données 200 118. Site de Paspébiac : cartes sédimentaires proposée après fusion des données 200 5.3.3.2. Problèmes rencontrés pour réaliser ces cartes 211 5.3.3.3. Description 212 i. Site de Paspébiac : deux carte sédimentaire proposée après fusion des données 200 5.3.3.2. Problèmes rencontrés pour réaliser ces cartes 211 5.3.3.3. Sergébiac 213 i.1. Co	5.3.2. Exemple de classification sédimentaire fine obtenue sur des zones tests (avant application	1 de la
5.3.2.1. Classification sédimentaire fine de la zone 1 (Figure 75) 192 i. Description des trois faciés sédimentaires observés 192 ii. Description des résultats 192 5.3.2. Classification sédimentaire fine de la zone 7 (Figure 77) 195 i. Description des résultats 195 i. Description des résultats 195 5.3.2. Classification sédimentaire fine de la zone 8 (Figure 79) 198 i. Description des résultats 198 i. Description des résultats 198 5.3.3. Cartes sédimentaires proposées pour l'ensemble des sites d'étude 201 5.3.3. L Description 201 i. Site de Paspébiac : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72) 201 ii. Site de Paspébiac : cartes set vacut se sédimentaires proposée après fusion des données 200 203.3.2. Problèmes rencontrés pour réaliser ces cartes j. 3.3. Problèmes rencontrés pour réaliser ces cartes 211 5.3.3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des photographites sous-marines collectées pendant la carte sédimentaire proposée avec des relevés de sonar à balayage l.1. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des chantillons sédimentaires (Figure 87) collectés pendant la carte sédimentaire proposée avec des chantillons sédimentaires (Figure 87) collectés pendant la carte sédimentaire proposée avec des chantillons sédimentaires (Figure 87) collec	« méthode de fusion des données »).	191
i. Description des trois faciès sédimentaires observés 192 ii. Description des résultats 192 5.3.2. Classification sédimentaire fine de la zone 7 (Figure 77) 195 i. Description des cinq faciès sédimentaires observés 195 ii. Description des résultats 196 5.3.2. Classification sédimentaire fine de la zone 8 (Figure 79) 198 i. Description des résultats 198 i. Description des résultats 198 5.3.3. Cartes sédimentaires proposées pour l'ensemble des sites d'étude 201 5.3.3.1. Description 201 i. Site de Paspébiac : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72) 201 ii. Site de Paspébiac : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72) 201 ii. Site de Paspébiac : cartes vant ex earte sédimentaire proposée après fusion des données 209 5.3.3.2. Problèmes rencontrés pour réaliser ces cartes 212 i. Site de Paspébiac 213 1. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des photographies sous-marines collectées pendant la carte sédimentaire proposée avec des relevés de sonar à balayage latéral réalisés pendant la campage 2007. 216 i.2. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échantillons sédimentaires (Figure 87) collectés pendant la campage 2007. 219 i.3. Sité de Saint-Siméon-Bonaventure <td< td=""><td>5.3.2.1. Classification sédimentaire fine de la zone 1 (Figure 75)</td><td>192</td></td<>	5.3.2.1. Classification sédimentaire fine de la zone 1 (Figure 75)	192
ii. Description des résultats. 192 5.3.2.2. Classification sédimentaire fine de la zone 7 (Figure 77) 195 i. Description des résultats. 195 s.2.3. Classification sédimentaire fine de la zone 8 (Figure 79) 198 i. Description des résultats 195 5.3.2.3. Classification sédimentaires nul sédimentaires observés 198 ii. Description des résultats 198 i. Description des résultats 198 5.3.3. Cartes sédimentaires proposées pour l'ensemble des sites d'étude 201 5.3.3. L'obscription 201 i. Site de Paspébiac : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72) 201 ii. Site de Paspébiac : deux cartes sédimentaires proposées après fusion des données 209 5.3.3. Problemes rencontrés pour réaliser ces cartes 211 5.3.3. estimation de la qualité des résultats obtenus 212 i. Site de Paspébiac 213 i.1. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des relevés de sonar à balayage latéral réalisés pendant l'été 2005. 216 i.2. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des chantillons sédimentaires (Figure 87) collectés pendant la campagne 2007. 216 i.3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des relevés de sonar à balayage latéral réalisés pendant l'été 2005.	i. Description des trois faciès sédimentaires observés	192
5.3.2.2. Classification sédimentaire fine de la zone 7 (Figure 77) 195 <i>i. Description des résultats</i> 195 5.3.2.3. Classification sédimentaire fine de la zone 8 (Figure 79) 198 <i>i. Description des faciès neuf sédimentaires observés</i> 198 <i>i. Description des faciès neuf sédimentaires observés</i> 198 <i>i. Description des facieltats</i> 198 5.3.3. Cartes sédimentaires proposées pour l'ensemble des sites d'étude 201 5.3.3. Description 201 <i>i. Site de Paspébiac : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72)</i> 201 <i>ii. Site de Paspébiac : deux cartes sédimentaires proposées après fusion des données</i> 205 <i>iii. Site de Paspébiac : deux cartes sédimentaires proposée après fusion des données</i> 211 5.3.3. Problèmes rencontrés pour réaliser ces cartes 211 <i>i. Site de Paspébiac</i> 212 <i>i. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des photographies sous-marines collectées pendant la campage 2007</i> 216 <i>i.2. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échantillons sédimentaires (Figure 87) collectés pendant la campage 2007</i> 219 <i>i.3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échantillons sédimentaires (Figure 87) collectés pendant la campage 2007</i> 219 <i>i.3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échanti</i>	ii. Description des résultats	192
i. Description des cinq faciès sédimentaires observés 195 ii. Description des résultats 195 5.3.2. Classification sédimentaire fine de la zone 8 (Figure 79) 198 i. Description des résultats 198 ii. Description des résultats 198 5.3.3. Classification sédimentaires proposées pour l'ensemble des sites d'étude 201 5.3.3.1. Description 201 5.3.3.1. Description 201 i. Site de Paspébiac : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72) 201 ii. Site de Saint-Siméon-Bonaventure : carte sédimentaires proposée après fusion des données 205 iii. Site de Saint-Siméon-Bonaventure : carte sédimentaire proposée après fusion des données 211 5.3.3.2. Problèmes rencontrés pour réaliser ces cartes 211 5.3.3.2. setimation de la qualité des résultats obtenus 212 i. Site de Paspébiac 213 i.1. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des photographies sous-marrines collectées pendant l'été 2005 216 i.2. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des relevés de sonar à balayage latéral réalisés pendant l'été 2005 217 i.3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des cleas chantillons sédimentaires (Figure 87) collectés pendant l'été 2005 221 5.3.4. Conclusion	5.3.2.2. Classification sédimentaire fine de la zone 7 (Figure 77)	195
ii. Description des résultats	i. Description des cinq faciès sédimentaires observés	195
5.3.2.3. Classification sédimentaire fine de la zone 8 (Figure 79) 198 i. Description des faciès neuf sédimentaires observés 198 ii. Description des résultats. 198 5.3.3. Cartes sédimentaires proposées pour l'ensemble des sites d'étude 201 5.3.3. Loescription 201 i. Site de Paspébiac : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72) 201 ii. Site de Paspébiac : cartes sédimentaires proposées après fusion des données 209 201 5.3.3.2. Problèmes rencontrés pour réaliser ces cartes 211 5.3.3.2. Problèmes rencontrés pour réaliser ces cartes 211 5.3.3.2. Problèmes rencontrés pour réaliser ces cartes 211 5.3.3.1. Comparaison de la qualité des résultats obtenus 212 i. Site de Paspébiac 213 i.1. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des photographies sous-marines collectées pendant la campagne 2007 216 i.2. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des chantillons sédimentaires (Figure 87) collectés pendant l'été 2005. 217 i.3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des chantillons sédimentaires (Figure 87) collectés pendant l'été 2005. 217 i.3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des chantillons sédimentaires (Figure 87) collectés pendant l'été 2005. 217 i.3. Conparaiso	ii. Description des résultats	195
i. Description des faciès neuf sédimentaires observés 198 ii. Description des résultats 198 5.3.3. Cartes sédimentaires proposées pour l'ensemble des sites d'étule 201 i. Site de Paspébiac : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72) 201 ii. Site de Paspébiac : deux cartes sédimentaires proposées après fusion des données 205 iii. Site de Paspébiac : deux cartes sédimentaires proposée après fusion des données 201 s.3.3. Problèmes rencontrés pour réaliser ces cartes 211 5.3.3.1. Comparaison de la qualité des résultats obtenus 212 i. Site de Paspébiac : 213 i.1. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des photographies sous-marines 216 i.2. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des relevés de sonar à balayage 217 i.3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échantillons sédimentaires 219 i. Site de Saint-Siméon-Bonaventure 221 5.3.4. Conclusion 222 6. Discussion 225 6. 1. Étude bathymétrique 229 6. 1. Étude bathymétrique 230 6. 1. Étude bathymétrique sour mettre en évidence différentes populations d'algues 232 6. 2. Étude des structures morpho sédimentaires et des processu	5.3.2.3. Classification sédimentaire fine de la zone 8 (Figure 79)	198
ii. Description des résultats 198 5.3.3. Cartes sédimentaires proposées pour l'ensemble des sites d'étude 201 5.3.3.1. Description 201 i. Site de Paspébiac : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72) 201 ii. Site de Paspébiac : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72) 201 ii. Site de Paspébiac : deux cartes sédimentaires proposée après fusion des données 205 iii. Site de Saint-Siméon-Bonaventure : carte sédimentaire proposée après fusion des données 201 5.3.3.2. Problèmes rencontrés pour réaliser ces cartes 211 5.3.3.2. Problèmes rencontrés pour réaliser ces cartes 212 i. Site de Paspébiac 213 i.1. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des photographies sous-marines collectées pendant la carte sédimentaire proposée avec des relevés de sonar à balayage latéral réalisés pendant l'éc 2005. 217 i.3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échantillons sédimentaires (Figure 87) collectés pendant la campagne 2007. 219 ii. Site de Saint-Siméon-Bonaventure 225 6. Discussion 227 6.1. Étude bathymétrique 229 6.1.1. Décalage des isobathes. 230 6.1.2. Signification des « trous » dans les modèles bathymétriques 232 6.2. Étude des	i. Description des faciès neuf sédimentaires observés	198
5.3.3. Cartes sédimentaires proposées pour l'ensemble des sites d'étude 201 5.3.3.1. Description 201 <i>i. Site de Paspébiac : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72)</i> 201 <i>ii. Site de Paspébiac : deux cartes sédimentaires proposées après fusion des données</i> 205 <i>iii. Site de Paspébiac : deux cartes sédimentaires proposée après fusion des données</i> 205 <i>site de Paspébiac : deux cartes sédimentaires proposée après fusion des données</i> 201 5.3.3.2. Problèmes rencontrés pour réaliser ces cartes 211 5.3.3.3. estimation de la qualité des résultats obtenus 212 <i>i. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des photographies sous-marines collectées pendant la campagne 2007.</i> 216 <i>i.2. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des relevés de sonar à balayage latéral réalisés pendant l'été 2005.</i> 217 <i>i.3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échantillons sédimentaires (Figure 87) collectés pendant la campagne 2007.</i> 219 <i>i.4. Conclusion.</i> 227 61. Étude bathymétrique 229 6. Discussion 227 61. Étude bathymétrique 229 6.1.1. Décalage des isobathes. 230 61.1.2. Signification des « trous » dans les modèles bathymétriques 232 6.2. Étude des structures morpho sédimentaires et des processus ass	ii. Description des résultats	198
5.3.3.1. Description 201 i. Site de Paspébiac : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72) 201 ii. Site de Paspébiac : deux cartes sédimentaires proposée après fusion des données 209 205 iil. Site de Saint-Siméon-Bonaventure : carte sédimentaires proposée après fusion des données 209 5.3.3.2. Problèmes rencontrés pour réaliser ces cartes 211 5.3.3.1. Description 212 212 212 213 i. Site de Paspébiac. 213 213 214 213 i. 1. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des photographies sous-marines collectées pendant la carte sédimentaire proposée avec des relevés de sonar à balayage latéral réalisés pendant l'été 2005 216 i. 2. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échantillons sédimentaires (Figure 87) collectés pendant la campagne 2007. 211 i. 3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échantillons sédimentaires (Figure 87) collectés pendant la campagne 2007. 216 i. Site de Saint-Siméon-Bonaventure. 221 5.3.4. Conclusion 5.3.4. Conclusion 225 227 6.1. Étude bathymétrique 229 229 6.1.1. Décalage des isobathes. 230 230 6.1.2. Signification des « trous » dans les modèles bathymétriques 232 6.2. Étude des	5.3.3. Cartes sédimentaires proposées pour l'ensemble des sites d'étude	201
i. Site de Paspébiac : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72) 201 ii. Site de Paspébiac : deux cartes sédimentaires proposées après fusion des données 205 iii. Site de Saint-Siméon-Bonaventure : carte sédimentaire proposée après fusion des données 201 5.3.3.2. Problèmes rencontrés pour réaliser ces cartes 211 5.3.3.3. estimation de la qualité des résultats obtenus 212 i. Site de Paspébiac 213 i.1. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des photographies sous-marines collectées pendant la campagne 2007. 216 i.2. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des relevés de sonar à balayage latéral réalisés pendant l'été 2005. 217 i.3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échantillons sédimentaires (Figure 87) collectés pendant la campagne 2007. 219 ii. Site de Saint-Siméon-Bonaventure 221 5.3.4. Conclusion 225 6. Discussion 227 6.1.1. Décalage des isobathes. 230 6.1.2. Signification des « trous » dans les modèles bathymétriques 230 6.1.2. Signification des « trous » dans les modèles bathymétriques 232 6.2. Étude batstructures morpho sédimentaires et des processus associés 233 6.3.1. Nombre de faciès utilisés et précision des résultats. 236 <td>5.3.3.1. Description</td> <td>201</td>	5.3.3.1. Description	201
ii. Site de Paspébiac : deux cartes sédimentaires proposées après fusion des données 205 iii. Site de Saint-Siméon-Bonaventure : carte sédimentaire proposée après fusion des données 209 5.3.3.2. Problèmes rencontrés pour réaliser ces cartes 211 5.3.3.3. estimation de la qualité des résultats obtenus 212 i. Site de Paspébiac. 213 i.1. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des photographies sous-marines collectées pendant la campagne 2007. 216 i.2. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des relevés de sonar à balayage latéral réalisés pendant l'été 2005. 217 i.3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échantillons sédimentaires (Figure 87) collectés pendant la campagne 2007. 219 ii. Site de Saint-Siméon-Bonaventure. 221 5.3.4. Conclusion. 5.3.4. Conclusion 2227 6.1.1. Décalage des isobathes. 230 6.1.2. Signification des « trous » dans les modèles bathymétriques. 230 6.1.3. Analyse des modèles bathymétriques pour mettre en évidence différentes populations d'algues. 232 6.2. Étude des structures morpho sédimentaires et des processus associés 233 6.3.1. Nombre de faciès utilisés et précision des résultats. 236 6.3.1.1. Un paramètre constant dans la zone d'étude 236	i. Site de Paspébiac : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72)	201
iii. Site de Saint-Siméon-Bonaventure : carte sédimentaire proposée après fusion des données209 5.3.3.2. Problèmes rencontrés pour réaliser ces cartes .211 5.3.3.3. estimation de la qualité des résultats obtenus .212 i. Site de Paspébiac .213 i. I. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des photographies sous-marines .216 i. 2. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des relevés de sonar à balayage .216 i. 2. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des relevés de sonar à balayage .217 i. 3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échantillons sédimentaires .217 i. 3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échantillons sédimentaires .217 i. 3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échantillons sédimentaires .217 i. 3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échantillons sédimentaires .217 i. 3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échantillons sédimentaires .217 i. 5. de Saint-Siméon-Bonaventure .221 5.3.4. Conclusion .227 6. 1. Étude bathymétrique .229 6.1.1. Décalage des isobathes .230 6.1.2. Signification des « trous » dans les modèles bathymétriques .232 6.2. Étu	ii. Site de Paspébiac : deux cartes sédimentaires proposées après fusion des données	205
5.3.3.2. Problèmes rencontrés pour réaliser ces cartes 211 5.3.3.3. estimation de la qualité des résultats obtenus 212 i. Site de Paspébiac. 213 i.1. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des photographies sous-marines collectées pendant la campagne 2007. 216 i.2. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des relevés de sonar à balayage latéral réalisés pendant l'été 2005. 217 i.3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échantillons sédimentaires (Figure 87) collectés pendant la campagne 2007. 15.3.4. Conclusion. 225 6. Discussion 227 6.1. Étude bathymétrique 229 6.1.1. Décalage des isobathes. 230 6.1.2. Signification des « trous » dans les modèles bathymétriques 232 6.2. Étude des structures morpho sédimentaires et des processus associés 233 6.3. Adaptation du SHOALS à la cartographie sédimentaire côtière 234 6.3.1. Un paramètre constant dans la zone d'étude 236 6.3.1.2. Le nombre de faciès et leur limite. 236 7. Conclusion. 236 7. Conclusion. 236 7. Conclusion. 236 7. Conclusion. 236 </td <td>iii. Site de Saint-Siméon-Bonaventure : carte sédimentaire proposée après fusion des dont</td> <td>nées209</td>	iii. Site de Saint-Siméon-Bonaventure : carte sédimentaire proposée après fusion des dont	nées209
5.3.3.3. estimation de la qualité des résultats obtenus 212 i. Site de Paspébiac	5.3.3.2. Problèmes rencontrés pour réaliser ces cartes	211
i. Site de Paspébiac. 213 i.1. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des photographies sous-marines collectées pendant la campagne 2007. 216 i.2. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des relevés de sonar à balayage latéral réalisés pendant l'été 2005. 217 i.3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échantillons sédimentaires (Figure 87) collectés pendant la campagne 2007. 219 ii. Site de Saint-Siméon-Bonaventure. 221 5.3.4. Conclusion 225 6. Discussion 227 6.1.1. Décalage des isobathes. 230 6.1.2. Signification des « trous » dans les modèles bathymétriques 230 6.1.3. Analyse des modèles bathymétriques pour mettre en évidence différentes populations d'algues 232 6.2. Étude des structures morpho sédimentaires et des processus associés 233 6.3. Adaptation du SHOALS à la cartographie sédimentaire côtière 234 6.3.1.1. Un paramètre constant dans la zone d'étude 236 6.3.1.2. Le nombre de faciès et leur limite. 236 7. Conclusion 236 7. Conclusion 239 8. Bibliographie 247	5.3.3.3. estimation de la qualité des résultats obtenus	212
i.1. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des photographies sous-marines collectées pendant la campagne 2007. 216 i.2. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des relevés de sonar à balayage latéral réalisés pendant l'été 2005. 217 i.3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échantillons sédimentaires (Figure 87) collectés pendant la campagne 2007. 219 ii. Site de Saint-Siméon-Bonaventure. 221 5.3.4. Conclusion 225 6. Discussion 227 6.1.1. Décalage des isobathes. 220 6.1.2. Signification des « trous » dans les modèles bathymétriques 230 6.1.2. Étude bastructures morpho sédimentaires et des processus associés 232 6.2. Étude des structures morpho sédimentaires et des processus associés 233 6.3. Adaptation du SHOALS à la cartographie sédimentaire côtière 234 6.3.1.1. Un paramètre constant dans la zone d'étude 236 6.3.1.2. Le nombre de faciès et leur limite. 236 7. Conclusion 239 8. Bibliographie 247	i. Site de Paspébiac	213
collectés pendant la campagne 2007.216i.2. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des relevés de sonar à balayage latéral réalisés pendant l'été 2005.217i.3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échantillons sédimentaires (Figure 87) collectés pendant la campagne 2007.219ii. Site de Saint-Siméon-Bonaventure.2215.3.4. Conclusion2256. Discussion2276.1. Étude bathymétrique2296.1.1. Décalage des isobathes.2306.1.2. Signification des « trous » dans les modèles bathymétriques2306.1.3. Analyse des modèles bathymétriques pour mettre en évidence différentes populations d'algues2326.2. Étude des structures morpho sédimentaires et des processus associés2336.3. Adaptation du SHOALS à la cartographie sédimentaire côtière2346.3.1.1. Un paramètre constant dans la zone d'étude2367. Conclusion2398. Bibliographie247	i.1. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des photographies sous-m	arines
i.2. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des relevés de sonar à balayage latéral réalisés pendant l'été 2005	collectées pendant la campagne 2007.	216
latéral réalisés pendant l'été 2005. 217 i.3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échantillons sédimentaires (Figure 87) collectés pendant la campagne 2007. 219 ii. Site de Saint-Siméon-Bonaventure. 221 5.3.4. Conclusion. 225 6. Discussion 227 6.1. Étude bathymétrique 229 6.1.1. Décalage des isobathes. 230 6.1.2. Signification des « trous » dans les modèles bathymétriques 230 6.1.3. Analyse des modèles bathymétriques pour mettre en évidence différentes populations d'algues 232 6.2. Étude des structures morpho sédimentaires et des processus associés 233 6.3. Adaptation du SHOALS à la cartographie sédimentaire côtière 234 6.3.1.1. Un paramètre constant dans la zone d'étude 236 6.3.1.2. Le nombre de faciès et leur limite. 236 7. Conclusion. 239 8. Bibliographie 247	i.2. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des relevés de sonar à bal	ayage
i.3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échantillons sédimentaires (Figure 87) collectés pendant la campagne 2007. 219 ii. Site de Saint-Siméon-Bonaventure. 221 5.3.4. Conclusion 225 6. Discussion 227 6.1. Étude bathymétrique 229 6.1.1. Décalage des isobathes. 230 6.1.2. Signification des « trous » dans les modèles bathymétriques 230 6.1.3. Analyse des modèles bathymétriques pour mettre en évidence différentes populations d'algues 232 6.2. Étude des structures morpho sédimentaires et des processus associés 233 6.3. Adaptation du SHOALS à la cartographie sédimentaire côtière 234 6.3.1.1. Un paramètre constant dans la zone d'étude 236 6.3.1.2. Le nombre de faciès et leur limite. 236 7. Conclusion. 239 8. Bibliographie 247	latéral réalisés pendant l'été 2005.	217
(Figure 87) collectés pendant la campagne 2007.219ii. Site de Saint-Siméon-Bonaventure.2215.3.4. Conclusion.2256. Discussion2276.1. Étude bathymétrique2296.1.1. Décalage des isobathes.2306.1.2. Signification des « trous » dans les modèles bathymétriques.2306.1.3. Analyse des modèles bathymétriques pour mettre en évidence différentes populations d'algues.2326.2. Étude des structures morpho sédimentaires et des processus associés2336.3.1. Nombre de faciès utilisés et précision des résultats.2366.3.1.1. Un paramètre constant dans la zone d'étude2366.3.1.2. Le nombre de faciès et leur limite.2367. Conclusion.2398. Bibliographie247	i.3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échantillons sédiment	ıtaires
ii. Site de Saint-Siméon-Bonaventure. 221 5.3.4. Conclusion. 225 6. Discussion 227 6.1. Étude bathymétrique 229 6.1.1. Décalage des isobathes. 230 6.1.2. Signification des « trous » dans les modèles bathymétriques. 230 6.1.3. Analyse des modèles bathymétriques pour mettre en évidence différentes populations d'algues. 232 6.2. Étude des structures morpho sédimentaires et des processus associés 233 6.3. Adaptation du SHOALS à la cartographie sédimentaire côtière 234 6.3.1.1. Un paramètre constant dans la zone d'étude 236 6.3.1.2. Le nombre de faciès et leur limite. 236 7. Conclusion. 239 8. Bibliographie 247	(Figure 87) collectés pendant la campagne 2007.	219
5.3.4. Conclusion. 225 6. Discussion 227 6.1. Étude bathymétrique 229 6.1.1. Décalage des isobathes. 230 6.1.2. Signification des « trous » dans les modèles bathymétriques 230 6.1.3. Analyse des modèles bathymétriques pour mettre en évidence différentes populations d'algues 232 6.2. Étude des structures morpho sédimentaires et des processus associés 233 6.3. Adaptation du SHOALS à la cartographie sédimentaire côtière 234 6.3.1. Nombre de faciès utilisés et précision des résultats 236 6.3.1.1. Un paramètre constant dans la zone d'étude 236 7. Conclusion 239 8. Bibliographie 247	ii. Site de Saint-Siméon-Bonaventure	221
6. Discussion 227 6.1. Étude bathymétrique 229 6.1.1. Décalage des isobathes. 230 6.1.2. Signification des « trous » dans les modèles bathymétriques 230 6.1.3. Analyse des modèles bathymétriques pour mettre en évidence différentes populations d'algues 232 6.2. Étude des structures morpho sédimentaires et des processus associés 233 6.3. Adaptation du SHOALS à la cartographie sédimentaire côtière 234 6.3.1. Nombre de faciès utilisés et précision des résultats 236 6.3.1.1. Un paramètre constant dans la zone d'étude 236 7. Conclusion 239 8. Bibliographie 247	5.3.4. Conclusion	225
6.1. Étude bathymétrique 229 6.1.1. Décalage des isobathes. 230 6.1.2. Signification des « trous » dans les modèles bathymétriques 230 6.1.3. Analyse des modèles bathymétriques pour mettre en évidence différentes populations d'algues 232 6.2. Étude des structures morpho sédimentaires et des processus associés 233 6.3. Adaptation du SHOALS à la cartographie sédimentaire côtière 234 6.3.1. Nombre de faciès utilisés et précision des résultats 236 6.3.1.1. Un paramètre constant dans la zone d'étude 236 7. Conclusion 239 8. Bibliographie 247	6 Discussion	227
6.1.1. Décalage des isobathes. 230 6.1.2. Signification des « trous » dans les modèles bathymétriques. 230 6.1.3. Analyse des modèles bathymétriques pour mettre en évidence différentes populations d'algues. 232 6.2. Étude des structures morpho sédimentaires et des processus associés 233 6.3. Adaptation du SHOALS à la cartographie sédimentaire côtière 234 6.3.1. Nombre de faciès utilisés et précision des résultats. 236 6.3.1.1. Un paramètre constant dans la zone d'étude 236 7. Conclusion. 239 8. Bibliographie. 247	6.1 Étude bathymétrique	229
6.1.2. Signification des « trous » dans les modèles bathymétriques 230 6.1.3. Analyse des modèles bathymétriques pour mettre en évidence différentes populations d'algues 232 6.2. Étude des structures morpho sédimentaires et des processus associés 233 6.3. Adaptation du SHOALS à la cartographie sédimentaire côtière 234 6.3.1. Nombre de faciès utilisés et précision des résultats 236 6.3.1.1. Un paramètre constant dans la zone d'étude 236 6.3.1.2. Le nombre de faciès et leur limite. 236 7. Conclusion. 239 8. Bibliographie 247	6.1.1 Décelage des isobethes	230
6.1.2. Signification des « trous » dans les modeles bathymétriques dans les modeles bathymétriques des modèles bathymétriques pour mettre en évidence différentes populations d'algues	6.1.2 Signification des « trous » dans les modèles hathymétriques	230
6.1.1.1. Analyse des modeles badiymentques pour metre en evidence universe populations d'algues 232 6.2. Étude des structures morpho sédimentaires et des processus associés 233 6.3. Adaptation du SHOALS à la cartographie sédimentaire côtière 234 6.3.1. Nombre de faciès utilisés et précision des résultats 236 6.3.1.1. Un paramètre constant dans la zone d'étude 236 6.3.1.2. Le nombre de faciès et leur limite 236 7. Conclusion 239 8. Bibliographie 247	6.1.3 Analyse des modèles bathymétriques nour mettre en évidence différentes nonul	ations
6.2. Étude des structures morpho sédimentaires et des processus associés 233 6.3. Adaptation du SHOALS à la cartographie sédimentaire côtière 234 6.3.1. Nombre de faciès utilisés et précision des résultats 236 6.3.1.1. Un paramètre constant dans la zone d'étude 236 6.3.1.2. Le nombre de faciès et leur limite 236 7. Conclusion 239 8. Bibliographie 247	d'almes	232
6.2. Etude des structures morpho sedimentaires et des processus associes 233 6.3. Adaptation du SHOALS à la cartographie sédimentaire côtière 234 6.3.1. Nombre de faciès utilisés et précision des résultats 236 6.3.1.1. Un paramètre constant dans la zone d'étude 236 6.3.1.2. Le nombre de faciès et leur limite 236 7. Conclusion 239 8. Bibliographie 247	6.2 Étudo dos structuros morpho sódimontairos et dos processas associás	722
6.3. Adaptation du SHOALS à la cartographie sedimentaire cotière 234 6.3.1. Nombre de faciès utilisés et précision des résultats 236 6.3.1.1. Un paramètre constant dans la zone d'étude 236 6.3.1.2. Le nombre de faciès et leur limite 236 7. Conclusion 239 8. Bibliographie 247	0.2. Ende des sindentes morpho seumentaires et des processus associes	233
6.3.1. Nombre de faciès utilisés et précision des résultats	6.3. Adaptation du SHOALS à la cartographie sedimentaire cotiere	234
6.3.1.1. Un paramètre constant dans la zone d'étude 236 6.3.1.2. Le nombre de faciès et leur limite 236 7. Conclusion 239 8. Bibliographie 247	6.3.1. Nombre de faciès utilisés et précision des résultats	236
6.3.1.2. Le nombre de faciès et leur limite	6.3.1.1. Un paramètre constant dans la zone d'étude	236
7. Conclusion	6.3.1.2. Le nombre de faciès et leur limite	236
8. Bibliographie	7. Conclusion	239
	8. Bibliographie	247

Liste des figures

Figure 1. Principe de fonctionnement du SHOALS
Figure 2. Carte bathymétrique du Service Hydrographique du Canada présentant les
différentes zones d'études
Figure 3. Exemple de balayage en arc de cercle en mode hydrographique
Figure 4. Exemple de données des 4 canaux enregistrés par le SHOALS lors d'un relevé
en mode hydrographique
Figure 5. Exemple de données de Seistec IKB en avant de Saint-Siméon (Long, 2006)37
Figure 6. Exemple de donnée de sonar à balavage latéral40
Figure 7. Dispositif de mesure de reflectance des fonds marins à l'aide d'un Fieldspec®
Handheld
Figure 8. Courbe de réflectance de la cible de Spectralon
Figure 9. Exemple de spectre de réflectance collecté avec le Fieldspec® Handheld46
Figure 10. Exemple de spectre de réflectance collecté par le Fieldspec® Handheld à une
profondeur de 5 mètres au-dessus d'une zone sableuse
Figure 11. Positions des mesures effectuées avec le disque de Secchi à l'ouest du
barachois de Paspébiac. La profondeur mesurée pour chaque point est reportée dans le
tableau ci-dessous
Figure 12. Exemple d'images extraites de vidéo sous-marine
Figure 13. Exemple de courbe de granulométrie d'un sable moyen
Figure 14. Carte hydrographique de la Baje de Chaleurs dans le Golfe du Saint-Laurent
(Service Hydrographique du Canada)
Figure 15 Carte bathymétrique de la région de Saint-Siméon-Bonaventure
Figure 16. Exemple d'isobathes vectorisées de la carte hydrographique du SHC (1979) et
superposées sur la carte originale 70
Figure 17. Description de la structure des données utilisées
Figure 18. Exemple de linéarisation des données brutes du SHOALS
Figure 19. Interface utilisateur développée sous IDL pour la visualisation et la
manipulation des données du SHOALS
Figure 20. Schéma décrivant le lien existant entre les différents types de fichiers
Figure 21. Relation et détermination de la position d'un enregistrement dans un fichier
INW à partir d'un enregistrement contenue dans un fichier LAS
Figure 22. Description des bases de géométrie vectorielle utilisées pour extraire un
ensemble de points LAS selon un profil
Figure 23 Description des bases de géométrie vectorielle utilisées pour extraire un
ensemble de points LAS autour d'un point
Figure 24. Description d'un signal de retour du canal profond enregistré par le SHOALS.93
Figure 25. Exemple de résultat de l'algorithme EM sur un signal de retour du canal
profond du SHOALS
Figure 26. Exemple de résultat en 2D issu de la rasterisation de l'ensemble des points
associé au paramètre proportion
Figure 27. Exemple de résultats obtenus à partir des différents paramètres statistiques
calculés à partir du retour du fond
Figure 28. Exemple de résultat obtenu avec le paramètre rugosité

Figure 29. Exemple de résultat obtenu grâce au calcul de la densité de points avec le jeu
final de données
Figure 30. Description des zones d'apprentissages et des différents échantillonnages
effectués sur la zone de Paspébiac
Figure 31. Flux de données des 2 approches de classification supervisée
Figure 32. Résultats de classifications supervisées obtenus pour la sous zones n°5
centrées sur 6 stations de vidéo sous-marines
Figure 33. Exemple de présentation 3D de la sous zone n°5 avec une description
sedimentaire des différents ensembles de la zone
Figure 34. Exemple d'arbre de décision pour contraindre et corriger le résultat d'une
classification supervisée. Pour construire cette arbre, une connaissance a priori du milieu
et des faciès est souhaitable
Figure 35 Exemple d'arbre de décision
Figure 36. Présentation de deux artéfacts sur le modèle bathymétrique de l'embouchure
de la Rivière Bonaventure
Figure 37. Mise en évidence des limitations du système dans un environnement turbide
après un orage violent sur la zone de relevé. La ligne ne pointillés représente la ligne de
côte
Figure 38. Comparaison bathymétrique multi sources
Figure 39. Comparaison bathymétrique multi sources
Figure 40. Comparaison bathymétrique multi sources
Figure 41 Comparaison bathymétrique multi-sources
Figure 42 Comparaison bathymétrique multi-sources
Figure 43 Comparaison bathymétrique multi-sources
Figure 44 Comparaison bathymétrique multi-sources
Figure 45. Comparaison de l'isobathe des 1 brasse sur la région du barachois de
Paspébiac et de New-Carlisle
Figure 46. Drapage de la carte bathymétrique 4486 du SHC sur le modèle bathymétrique
réalisé à partir des données du SHOALS
Figure 47. Comparaison de l'isobathe des 1 brasse sur la région de Saint-Godefroi 154
Figure 48. Exemple de carte bathymétrique produite à partir des données SHOALS 157
Figure 49. Carte des courants de surface dans l'estuaire du golfe du Saint-Laurent (source
Pêches et Océans Canada)
Figure 50. Profil bathymétrique réalisé au dessus de l'ensemble 1 du relevé à haute
densité
Figure 51. Profil bathymétrique réalisé au-dessus de l'ensemble 2 du relevé à haute
densité
Figure 52. Profil bathymétrique réalisé au dessus de l'ensemble 3 du relevé à haute
densité
Figure 53. Profil bathymétrique réalisé au-dessus de l'ensemble 7 du relevé à basse
densité
Figure 54. Comparaison de la différence d'élévation entre le modèle à haute densité (2x2
m) et le modèle à base densité (3x3 m)
Figure 55. Détail de la séquence de mise en place des différentes unités morpho-
sédimentaires

Figure 56. Vue en 3D de la flèche sableuse et du système de barre d'avant-côte du
barachois de Paspébiac167
Figure 57. Étude des différentes structures morpho sédimentaires à partir du relevé à
haute densité (1 point.m ⁻²)170
Figure 58. Étude des différentes structures morpho sédimentaires à partir du relevé à base
densité (0.5 point.m ⁻²)
Figure 59. Carte synthétique des différentes structures géomorphologiques existantes à
l'avant du barachois de Paspébiac
Figure 60. Relevé de basse densité (LR) de la zone de Saint-Godefroi
Figure 61. Détail des différentes coupes réalisées à l'avant de l'embouchure de la
Rivière-Nouvelle. Pour l'échelle verticlae des couleurs, se reporter à la Figure 62177
Figure 62. Profil bathymétrique réalisé au-dessus d'un affleurement de substratum
rocheux à l'embouchure de la Rivière-Nouvelle
Figure 63. Profil bathymétrique réalisé au-dessus des structures sédimentaires localisées
dans le chenal ouest à l'embouchure de la Rivière-Nouvelle
Figure 64. Profils bathymétriques parallèles réalisés au-dessus des chenaux sous-marins
localisés à l'embouchure de la Rivière-Nouvelle
Figure 65. Sites d'étude des différents processus morpho-sédimentaires sur les zones de
Paspébiac et de Saint-Siméon
Figure 66. Accumulation sédimentaire au niveau de l'enrochement d'Hope Town180
Figure 67. Accumulation sédimentaire au niveau de l'enrochement de la Plage à Norbert. 181
Figure 68. Accumulation sédimentaire au niveau de l'embouchure de la petite
Bonaventure
Figure 69. Port de Ruisseau-Leblanc
Figure 70. Profil bathymétrique de l'entrée du port de Ruisseau-Leblanc
Figure 71. Enrochement de Caplan
Figure 72. Exemple des modèles sédimentaires obtenus par les deux approches sur le site
de Paspébiac187
Figure 73. Exemple de masque binaire réalisé à partir d'un filtre sur la rugosité
Figure 74. Carte sédimentaire synthétique simplifiée de Paspébiac190
Figure 75. Résultat de classification sédimentaire supervisée sur la sous zone 1
Figure 76. Vue en 3D de la sous zone 1194
Figure 77. Résultat de classification sédimentaire supervisée sur la sous zone 7
Figure 78. Vue en 3D de la sous zone 1197
Figure 79. Résultat de classification sédimentaire supervisée sur la sous zone 8200
Figure 80. Vue en 3D de la sous zone 1200
Elemen 91 Détail de la casta dédiscutaire accumble de Desuéhica superada au Fierra 92
Figure 81. Detail de la carte sedimentaire complete de Paspeblac proposée en Figure 85
avec une superposition d'isobathes
avec une superposition d'isobathes
avec une superposition d'isobathes
Figure 81. Detail de la carte sedimentaire complete de Paspeblac proposée en Figure 83 avec une superposition d'isobathes. 203 Figure 82. Détail de la carte sédimentaire complète de Paspébiac proposée en Figure 83 avec une superposition d'isobathes. 204 Figure 83. Proposition de carte sédimentaire complète pour le site de Paspébiac. 204
Figure 81. Detail de la carte sedimentaire complète de Paspeblac proposée en Figure 83 avec une superposition d'isobathes. 203 Figure 82. Détail de la carte sédimentaire complète de Paspéblac proposée en Figure 83 avec une superposition d'isobathes. 204 Figure 83. Proposition de carte sédimentaire complète pour le site de Paspéblac. 204 Figure 84. Proposition de carte sédimentaire simplifiée pour le site de Paspéblac. 208
Figure 81. Detail de la carte sedimentaire complete de Paspeblac proposée en Figure 83 avec une superposition d'isobathes. Figure 82. Détail de la carte sédimentaire complète de Paspéblac proposée en Figure 83 avec une superposition d'isobathes. 204 Figure 83. Proposition de carte sédimentaire complète pour le site de Paspéblac. 207 Figure 84. Proposition de carte sédimentaire simplifiée pour le site de Paspéblac. 208 Figure 85. Proposition de carte sédimentaire pour le site de Saint-Siméon-Bonaventure.210
Figure 81. Detail de la carte sedimentaire complete de Paspeblac proposée en Figure 83 avec une superposition d'isobathes. 203 Figure 82. Détail de la carte sédimentaire complète de Paspébiac proposée en Figure 83 avec une superposition d'isobathes. 204 Figure 83. Proposition de carte sédimentaire complète pour le site de Paspébiac. 204 Figure 84. Proposition de carte sédimentaire simplifiée pour le site de Paspébiac. 208 Figure 85. Proposition de carte sédimentaire pour le site de Saint-Siméon-Bonaventure. 210 Figure 86. Localisation des différents points de contrôle relevés sur la zone de Paspébiac.

Figure 88. Carte de la répartition des sédiments de surface pour la zone de Saint-Siméon-
Bonaventure, établie par Long (2006)
Figure 89. Détail de la Figure 90 soulignant la similitude de forme des limites de faciès
qui existe entre la carte de Long (2006) et la carte sédimentaire proposée pour le site de
Saint-Siméon-Bonaventure
Figure 90. Superposition des limites sédimentaires de Long (2006), des photographies
sous-marines réalisées pendant l'été 2007 et la carte sédimentaire synthétique établie à
partir des données SHOALS pour la zone de Saint-Siméon-Bonaventure

Liste des tableaux

Liste des sorties de fichiers

Sortie Fichier 1. Exemple de sortie fichier pour la séparabilité des zones	d'apprentissages
pour la sous zone n°5.	
Sortie Fichier 2. Exemple de matrice de confusion pour la sous-zone n°5.	117

1. Introduction

,

<u>1.1. Nécessité d'une meilleure connaissance des environnements littoraux</u>

Depuis plusieurs années, des phénomènes climatiques extrêmes affectent les différentes régions du globe, tels que Katrina, l'ouragan qui a dévasté la région de la Nouvelle-Orléans aux États-Unis en 2005 faisant 1826 morts et provoquant des dommages matériels estimés à plus de 26 milliards de dollars américains, ou encore, le tsunami qui a prit son origine au large de la côte nord de Sumatra et qui a touché un grand nombre de pays bordant l'océan Indien et qui a tué sur son passage plus de 225 000 personnes dans 11 pays différents en 2004. Cette catastrophe humaine et humanitaire a engendré une aide internationale de plus de 7 milliards de dollars américains. On peut également citer les tempêtes tropicales, les sécheresses et les inondations, tout aussi dramatiques pour les populations, qui sévissent dans différentes régions du globe. Tous ces phénomènes météorologiques, de nature encore exceptionnelle et dont les effets sont particulièrement importants dans les zones littorales sont en voie d'augmentation et d'intensification (Forbes et al., 2004). Dans le même temps, on constate une augmentation du niveau moyen marin estimée, selon les prédictions, entre 18 cm et 59 cm de la moyenne des années 1980-1999 à la moyenne de la décennie 2090-2099 (IPCC, 2007). La hausse du niveau de la mer en relation au sol dans une région d'étude comprendra l'augmentation du niveau moyen augmenté par le taux de subsidence de la terre.

Toutes ces catastrophes météorologiques ont un impact direct sur les populations et leurs activités économiques. Les régions littorales, les plus sensibles à l'augmentation du niveau moyen des océans, concentrent 40% de la population mondiale (Xhardé et al., 2006). À plus long terme, l'augmentation du niveau marin moyen provoquera des inondations et des érosions côtières qui produiront des modifications du trait des côtes, des bouleversements écologiques et environnementaux.

Les côtes sont les lieux privilégiés de l'activité économique grâce aux ports qui concentrent les activités économiques et commerciales. Elles sont également des lieux de villégiature et de tourisme qui représentent une source économique majeure. C'est pourquoi, il est impératif d'avoir des outils adaptés à l'investigation et à la gestion des littoraux. Ces moyens doivent offrir une connaissance détaillée et précise de la morphologie ainsi que de la nature sédimentaire des fonds marins peu profonds. Ces informations doivent également permettre d'assurer un bon fonctionnement et l'entretien des structures portuaires, des voies de navigation et l'aménagement de structures côtières. De plus, une collecte d'informations répétée à des intervalles de temps réguliers doit permettre d'établir des modèles d'évolution à court terme des modifications comme les transports sédimentaires locaux (ensablement, érosion), mais également de surveiller l'évolution des phénomènes annoncés tels que la montée du niveau moyen marin.

Les phénomènes climatiques exceptionnels par leurs ampleurs et leurs fréquences ne doivent pas masquer le fait que les zones côtières évoluent en permanence au cours du temps. En effet, les littoraux sont sensibles à l'hydrodynamisme marin, à l'action des vagues, à la météorologie locale, ainsi qu'à la nature même de la côte (sableuse, rocheuse). Les littoraux s'adaptent et évoluent perpétuellement en fonction des conditions environnementales qui les entourent (Fletcher et al., 2003).

Ainsi pour les côtes meubles (plages, talus), c'est l'angle d'incidence des vagues avec la côte qui génère une érosion et un transport sédimentaire littoral qui redistribue les sédiments aux différentes structures sédimentaires (flèches, îles-barrières, plages) jusqu'à ce qu'un équilibre momentané soit atteint (Komar, 1976). En plus de l'angle d'incidence et de l'énergie des vagues, la granulométrie et le volume des sédiments disponibles sont autant de facteurs qui influencent ce transport. Les côtes rocheuses sont elles aussi soumises à l'action des vagues qui représente le facteur majeur dans les processus d'érosion côtière. Cependant, un ensemble de paramètres structuraux (lithologie, diaclases, pendage, porosité, nature de la roche, de la matrice, etc.) et environnementaux (précipitations, ruissellement, cycle de gel/dégel, cycle d'humidification/séchage, vent) participent également à l'érosion et au recul des falaises (Xhardé, 2007).

L'adaptation naturelle des littoraux à leurs environnements engendre pour l'homme la nécessité d'être capable de comprendre et d'anticiper les changements de la zone côtière

afin de développer des politiques de gestion des littoraux, durables, efficaces et respectueuses de l'environnement. Il doit être en mesure de répondre rapidement aux changements qui lui sont imposés. Pour cela, il faut disposer d'outils d'investigation et de modélisation des zones côtières. Ces outils sont également indispensables à la connaissance des milieux marins peu profonds à des fins commerciales et d'ingénieries.

Sachant que l'adaptation des littoraux est directement liée à la nature des côtes et des processus hydrodynamiques qui les entourent, il est impératif de réaliser des campagnes fréquentes de relevés qui couvrent les zones côtières (falaises, haut de plages, plages) et les fonds marins peu profonds.

La surveillance et l'investigation de ces régions littorales se font, en mer, grâce à des relevés utilisant des appareils de sismique réflexion, de sonar à balayage latéral, de sondeurs multifaisceaux, ainsi que des photographies et des prélèvements d'échantillons sédimentaires. Sur terre, l'arpentage, les mesures de profils d'élévations ainsi que la prise d'échantillons et de mesures géotechniques, sont utilisés. Toutes ces techniques offrent l'avantage d'être bien connues et fiables pour la mesure des élévations et la caractérisation sédimentaire des différents faciès. Cependant, ces moyens ne permettent le plus souvent qu'une couverture ponctuelle à cause du temps et des ressources humaines nécessaires pour réaliser ces campagnes de relevés, et la périodicité de ces dernières est nécessairement très espacée. De plus, la zone des petits fonds représente un défit supplémentaire qui est souvent ignorée des cartographes.

1.2. Une méthode d'avenir : le LIDAR bathymétrique

Une technique récente semble très prometteuse pour une meilleure connaissance de la morphologie et de la dynamique côtière : le LiDAR bathymétrique. Ce système LiDAR (Light Detection And Ranging) émet, à partir d'un support aéroporté, un double faisceau laser, un bleu-vert (532 nm) et un infra-rouge (1064 nm). Le faisceau bleu-vert a pour vocation de détecter les fonds marins alors que l'infra-rouge sert soit à localiser la surface du plan d'eau, soit la topographie à terre.

Les LiDAR bathymétriques aéroportés assurent un relevé conjoint des zones terrestres et des 20 premiers mètres des zones marines avec une couverture de 100%. La surface couverte lors d'un passage par avion a une largeur égale à 58% de l'altitude de vol qui est typiquement comprise entre 300 et 400 mètres, soit une largeur comprise entre 174 et 232 mètres. La densité de points au sol est comprise entre 2 x 2 m et 5 x 5 m. Le fait d'utiliser un système aéroporté permet d'éviter les zones où la navigation est hasardeuse voir impossible et de se rendre rapidement dans des zones éloignées (Irish et al., 2000).



Figure 1. Principe de fonctionnement du SHOALS. Cette image présente les différents processus, localisés à la surface de l'eau et dans la colonne d'eau, qui perturbent le signal laser lors de son trajet aller-retour depuis l'avion Pour une description détaillée de ces phénomènes voir le « 2.1.1.4. Paramètres d'erreur ».

Trois LiDAR bathymétriques ont été developpés séparément et sont actuellement en service:

- le système LADS (Laser Airborne Depth Sounder) en Australie (Setter et Willis, 1994),
- le Hawk Eye en Suède (Steinvall et al., 1994)
- le SHOALS (Scanning Hydrographique Operating Airborne Lidar System) aux USA (Pope et Lillycrop, 1988).

Les recherches présentées dans cette thèse sont basées sur les données provenant de la dernière version du système développé par Optech, le SHOALS, LiDAR bathymétrique cadencé à 3 kHz pour les relevés hydrographiques et à 10 kHz pour les relevés terrestres.

Parmi les organismes les plus actifs en recherches et développements liés à la technologie du LiDAR bathymétrique d'Optech ainsi qu'à la réalisation de relevés SHOALS, de développement d'applications et de produits à valeur commerciale on peut citer de manière non exhaustive (par ordre alphabétique):

- Cornell University
- INRS-ETE
- JALBTCX (Joint Airborne LiDAR Bathymetry Technical Center of Expertise)
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)
- NAVO (Naval Oceanographic Office)
- Optech
- Optech International
- University of Florida
- UNB (University of New-Brunswick)
- UNH (University of New Hampshire)
- USACE (U.S. Army Corps of Engineering)
- USM (University of Southern Mississippi)
- York University

1.2.1. Le LiDAR Bathymétrique, un état des utilisations actuelles et de la signification des données obtenues

Le développement d'applications de la technologie SHOALS a été majoritairement réalisé par le JABLTCX et l'USACE. Les domaines pratiques d'utilisation se basent toutes sur des analyses bathymétriques et n'utilisent que les données d'élévations du SHOALS dont les précisions verticales et horizontales sont respectivement estimées à ± 0.5 m et ± 1.5 m. Quelques exemples d'application peuvent être cités :

- la cartographie marine des zones côtières peu profondes (Banic et Cunningham, 1998, Irish et Wozencraft, 2000, West et al., 1999);
- la détection d'épaves (Guenther et al., 1996a);
- la redéfinition du trait de côte (Woolard et al., 2003);
- le suivi d'un rechargement de plage (Irish et White, 1998, McClung Wozencraft et Irish, 2000);
- la mise en place, par l'USACE, d'un plan de gestion sédimentaire pour le littoral (Smith et al., 2000);
- l'étude de faisabilité de structures portuaires (Irish et al., 2000) ;
- l'étude d'impact des ouragans, Opal en 1995 (Cunningham et al., 1998, Morang et al., 1996), Dennis, Katrina and Ophelia.;
- l'étude de la variation du niveau des eaux du lac Ontario (Wozencraft et al., 2002).

Parallèlement à ces applications pratiques, un ensemble de travaux sont faits sur les différentes versions du SHOALS et portent sur la précision du système, le développement d'outils de cartographies, le rôle des propriétés optiques de la colonne d'eau et leurs déterminations, ainsi que sur la caractérisation de la topographie et des propriétés du substrat. Chacun de ces travaux porte sur un point particulier ou bien sur une approche spécifique. L'utilité du LiDAR bathymétrique pour une connaissance topographique détaillée des domaines continentaux marins, a fait l'objet de plusieurs travaux en vue de tester la qualité des résultats obtenus (Guenther, 1985, 2001 ; Guenther et al., 1996a ; Riley 1995; Irish 2000; Wozencraft et Millar, 2005; Pastol et Louvart, 2006). Cependant

il semble avéré que l'intensité du signal de retour est influencé par d'autres paramètres que la seule bathymétrie (Pe'eri et al., 2007).

Quelques exemples permettent de préciser l'état actuel de ces recherches.

1.2.2. Des travaux sur la déformation du signal de retour

Un ensemble de travaux dédiés à la compréhension des phénomènes qui déforment le signal de retour (étirement et amplitude) du LiDAR bathymétrique a été mené par différentes équipes. Deux types d'approches pour corriger l'effet d'étirement de la impulsion en fonction de l'angle relatif du fond par rapport à l'incidence du faisceau laser ont été proposés par Steinvall et Koppari (1996). Une méthode pour corriger la variation de réflectance (amplitude) du fond en fonction de l'angle relatif de ce dernier par rapport à l'angle d'incidence du faisceau laser a été décrite par Philpot et Wang (2002) tout en intégrant la modélisation de Steinvall et Koppari (Wang et Philpot, 2007). Actuellement, ces travaux sont les seuls à tenter de corriger le signal de retour en fonction de facteurs topographiques (profondeur, angle d'incidence).

1.2.3. Meilleure définition du trait de côte

Une recherche effectuée avec le SHOALS-400, qui a pour but d'améliorer la qualité des relevés effectués au niveau des zones de faible profondeur d'eau (inférieure à 2 mètres), permet d'offrir une meilleure discrimination entre les points marins et terrestres et donc une meilleure définition du trait de côte. Cette méthode qui se base sur l'étude des points d'inflexions des signaux de retour moyens du faisceau infrarouge, pour une profondeur donnée, permet également de calculer des bathymétries de l'ordre du décimètre (Yang et al., 2008, Pe'eri et Mayer, 2007, Pe'eri et Philpot, 2007, Louvart et Grateau, 2005, Michaux et al., 2005).

1.2.4. Cartographie des fonds marins peu profonds

Le développement de techniques de fusion des données hyperspectrales issue du CASI-2 (Compact Airborne Spectrographic Imager 2, capteur d'imagerie hyperspectrale) avec les données du SHOALS-1000T pour une application de cartographie en zone côtière peu profonde a été mené par Tuell et Lohrenz (2005) et Tuell et al. (2005). L'approche et la

technique développées se basent sur la contrainte de l'inversion d'un modèle de transfert radiatif par les données bathymétriques du SHOALS-1000T afin de produire des images de réflectances des fonds marins peu profonds (Lee et Tuell, 2003 ; Tuell et Park, 2004). Des processus complémentaires de fusion des données entre les données CASI-2 et SHOALS-x000T ont été également développés et intégrés dans une méthode globale de cartographie des substratum marins (Estep, 1994 ; Smith et al., 2000 ; Wozencraft et al., 2003 ; Tuell et Park, 2004 ; Tuell et al., 2007). Toutes ces techniques, basées uniquement sur un développement théorique d'optique physique, offrent des résultats intéressants, mais souffrent d'une absence des données géologiques et des processus associés sur les zones d'études. Cela pose un problème majeur quant à la validité et la signification des résultats. Cependant ces derniers montrent qu'il existe une relation entre le signal de retour et le type de substrat.

Une hypothèse de travail : le LiDAR bathymétrique, un outil pour la cartographie sédimentaire côtière

Il semble établi que la technologie LiDAR est sensible à la nature des sols et des fonds marins ainsi qu'à leurs environnements directs. L'établissement de relations précises entre les propriétés du substrat marin et les caractéristiques du signal de retour est donc une orientation de recherche prometteuse qui aurait des applications nombreuses, tant pour la connaissance de l'environnement côtier que pour les applications pratiques de la gestion des littoraux.

Les premiers résultats obtenus semblent confirmer l'existence de telles relations, mais permettent également de prendre conscience des contraintes.

Finkl et al. (2005a, 2005b) présentent une classification des substrats en domaine carbonaté pour des profondeurs d'eau comprises entre 0 et 10 mètres. Leur technique consiste à caractériser un faciès sédimentaire en fonction de sa texture (lisse, granuleuse) exprimée à partir des données d'élévations. Cette méthode qui présente des résultats intéressants est limitée dans le nombre et la diversité des faciès qu'elle peut mettre en évidence. En effet, il met en évidence une distinction entre un faciès récifal et un faciès sableux en fonction d'une texture lisse ou granuleuse (exprimée à partir des données

d'élévations). Cependant, des faciès qui auront la même texture, tel que des sables fins et moyens, ne pourront être séparés et différenciés.

Tulldahl et al. (2007) développent un modèle afin d'effectuer une classification sédimentaire du fond marin et de sa végétation associé à une estimation de la turbidité de la colonne d'eau. Pour cela, ils développent des algorithmes basés sur une simulation de la puissance (amplitude) et de la largeur (mesurée à 30% de la puissance maximum) du signal de retour du fond en fonction, respectivement, de la réflectance du fond et de la taille de la végétation. La simulation utilise une modélisation de l'état de la surface de l'eau et de son interaction avec un faisceau laser incident, combinée avec un modèle de propagation du faisceau laser dans une colonne d'eau. Le paramètre d'entrée est la vitesse du vent (Tulldahl et Steinvall, 1999). Ces auteurs basent leur modèle de impulsion de retour en fonction d'une puissance et d'une largeur spécifiques en fonction de la réflectance du fond, de la présence d'algues, de la profondeur, l'altitude de vol de l'avion et de la vitesse du vent. Ce modèle étant établi, il est testé à partir de données provenant du Hawk Eyes II., LiDAR bathymétrique suédois. Les résultats obtenus par modélisation sont par la suite comparés à des vidéos sous-marines à des fins de classifications. Le site d'étude, localisé sur la côte sud de la Suède près de Ystad, est située dans une tranche bathymétrique comprise entre 1 et 7 mètres et est constitué, d'algues à faible réflectance, de sable à forte réflectance et de pelouse de zostères à forte réflectance dans le vert. En outre, les zostères présentent une différence d'élévation significative par rapport aux fonds marins. La zone d'étude a été étudiée grâce à une campagne de vidéo sous-marines et des échantillonnages. Sur des zones tests, déterminés par vidéo sous-marine, trois ensembles de impulsions de retour sont extraits (sables, algues et zostères) et étudiés à l'aide d'un modèle statistique pour déterminer les paramètres de la gaussienne (amplitude=puissance, étalement=largeur) afin d'étudier le relation entre le signal de fond et chaque faciès. Par la suite, de manière itérative, chaque impulsion du jeu de donnée est comparée a ces trois gaussiennes et la classe correspondante à la gaussienne la plus similaire est attribué aux points .Les résultats sont par la suites comparés aux images obtenues par vidéo sous-marines à fin de contrôler la qualité des résultats. Ces derniers

montrent que la précision globale du modèle est de 65 %. Cependant ce travail ne semble pas prendre en compte la diversité des sédiments côtiers.

La Commission Géologique d'Irlande développe actuellement le projet INFOMAR (the INtegrated Mapping FOr the Sustainable Development of Ireland's MARine ressource) afin de réaliser la cartographie morphologique, physico-chimique et biologique des côtes irlandaises. Une partie du projet effectué en collaboration avec Tenix LADS et Quester Tangent a pour but de développer des techniques d'analyses des données du LiDAR bathymétrique LADS afin de créer des cartes géologiques et biologiques des fonds marins (Collins et al., 2007, 2008, Guilford et Palmer, 2008). Collins et al. (2007, 2008) et Guilford et Palmer (2008) présentent les résultats préliminaires de la partie LiDAR du projet INFOMAR, en exposant brièvement la méthode employée: développement d'algorithmes d'analyse des données du LiDAR et intégration de données de terrain provenant de vidéo sous-marines, de sonar latéral et multi-faisceaux comme points de contrôles. Les résultats présentés semblent prometteurs mais aucune estimation de la qualité des résultats n'est présentée.

En conclusion, l'ensemble des travaux effectués a partir des résultats des différents systèmes de LiDAR bathymétrique confirment l'existence de relations entre nature du substrat et signal de retour, mais aucun d'eux ne prend directement en compte les caractéristiques des sédiments meubles. Or de telles relations ont déjà été mises en évidence sur les dépôts continentaux côtiers par Boucher et al. (2005).

Un travail utilisant le LiDAR topographique a été réalisé sur la côte nord de la baie des Chaleurs par Boucher (2007) et Long et al. (2006). Cette étude a montré que l'intensité du signal de retour d'un LiDAR topographique sur des dépôts continentaux côtiers est sensible à des paramètres tels que la granulométrie, la compaction, la porosité, la teneur en eau ou la texture des sédiments meubles. Cela montre que la réflectance du signal LiDAR est sensible à certains paramètres qui caractérisent les sols.

Cependant le LiDAR topographique avait été utilisé dans ce travail, un ALTM-2050 d'Optech, n'enregistre qu'une seule valeur d'intensité de retour pour chaque impulsion

laser émise et cette unique valeur n'est pas normalisée par rapport à l'énergie d'émission du système. Ces données sont donc très difficilement utilisables pour relier les variations du signal à un facteur défini, et donc d'établir avec certitude une classification des intensités de retour en fonction de paramètres de l'environnement.

L'hypothèse de départ de ce travail est qu'il est possible de réaliser une cartographie sédimentaire des fonds marins peu profonds en utilisant uniquement le signal de retour du SHOALS tout en s'affranchissant de l'aide d'autre capteurs (Caméra aéroportée, CASI-2).

A cet effet, une campagne de relevés à l'aide du système SHOALS a été réalisée en 2006, dans la baie des Chaleurs en vue de tester ces hypothèses et de développer une méthode de cartographie morpho-sédimentaire des zones côtières peu profondes.

Le fait d'utiliser le système SHOALS pour ce travail présente plusieurs avantages par rapport au système ALTM-2050 d'Optech :

- l'ensemble du signal de retour est enregistré;
- le signal de retour est digitalisé, étalonné et normalisé par rapport à l'énergie d'émission;
- les problèmes liés à la géométrie du système terrestre sont supprimés dans le système bathymétrique grâce à un balayage au sol en demi-arc de cercle, et à un angle nadiral constant, évalué à 20° vers l'avant (Guenther, 2001).

Le travail présenté ici utilise les données laser obtenues durant cette campagne et les confronte aux données bathymétriques et sédimentologiques collectées au cours d'autres investigations. Cette approche permet de caractériser les signaux provenant de faciès sédimentaires déterminés et par la suite d'effectuer une cartographie sédimentaire de l'ensemble de la zone côtière sur laquelle le relevé laser a été fait.

Ce travail exige dans un premier temps de créer et développer des outils informatique et un protocole d'analyse nécessaire à l'adaptation du signal obtenue par le SHOALS à la cartographie sédimentaire des zones côtières.

Mais ce travail n'est possible qu'à condition de pouvoir disposer de données précises et abondantes sur la zone d'étude.

1.3. <u>Un exemple de référence : la Baie des Chaleurs,</u> <u>Gaspésie (Québec)</u>

Ce travail ne pouvait être entrepris qu'à condition de disposer d'une zone côtière de référence dont les paramètres sédimentaires et hydrodynamiques sont particulièrement bien établis. La côte nord de la Baie des Chaleurs, dont la bathymétrie globale n'est connue que par la carte bathymétrique du Service Hydrographique du Canada (SHC), a fait l'objet d'études détaillées par Long (2006) pour le compte du MTQ (Ministère des Transports du Québec).

Ces différentes investigations ont eu pour objectif d'acquérir une connaissance de la morphologie, du milieu sédimentaire et géologique, ainsi que de leurs évolutions à long, moyen et court terme. Les variations morphologiques prédisent les changements qui seront apportés au littoral alors que la connaissance des systèmes sédimentaires permet de connaître la qualité et la quantité des sédiments disponibles pour chaque zone. Afin d'atteindre ce but, un suivi de l'évolution littorale est entrepris. Ce suivi concerne l'évolution topographique des plages, des zones intertidales et subtidales et provient de la compilation d'informations stratigraphiques issues de relevés marins (sismique réflexion, sonar à balayage latéral et prélèvement d'échantillons en mer et sur terre) et de relevés d'arpentages et aéroportés à partir d'un LiDAR ALTM-2050 (deux campagnes de relevés). Les résultats de cette série de travaux sont présentés dans la synthèse «Étude hydrodynamique, sédimentologique et biologique des sites de Maria, Saint-Siméon, Bonaventure, Newport et cap d'Espoir dans la baie des Chaleurs, Québec, Canada» (Long, 2006), Boucher et al. (2005) et Xhardé (2007). Ces travaux ont permis d'établir des cartes topographiques, bathymétriques, de la distribution des sédiments de surface, de l'épaisseur de ces sédiments, de la topographie du toit du substratum rocheux, de vulnérabilité côtière.


Figure 2. Carte bathymétrique du Service Hydrographique du Canada présentant les différentes zones d'études. 1. Maria (Long, Xhardé), 2. Saint-Siméon-Bonaventure (Cottin, Long, Xhardé), 3. Paspébiac (Cottin, Long, Xhardé), 4. Saint-Godefroi (Cottin, Long, Xhardé), 5. Newport (Long), 6. Pabos (Long, Xhardé), 7. Anse-à-Beaufils, Capd'Espoir, La Malbaie et Percé-Pointe-St-Pierre (hors carte) (Long, Xhardé).

C'est dans cette zone d'étude (Figure 2) qui s'étend de Maria à l'ouest jusqu'à Percé-Pointe-Saint-Pierre à l'est que ce travail se situe. Il se focalise plus particulièrement sur deux sites : soit Saint-Siméon et Bonaventure (noté Saint-Siméon-Bonaventure dans le texte) et Paspébiac.

Ces sites présentent des caractéristiques fondamentales pour cette étude :

- Les sédiments et le socle sont tous de nature silico-clastique. C'est donc sur la base d'une homogénéité minéralogique (silicates) que la signification des signaux du SHOALS peut être discutée;
- Les deux sites ont des régimes hydrodynamiques différents qui se traduisent par des dépôts sédimentaires différents selon la capacité de transport ou d'érosion des houles et courants : sables fins, graviers, galets, avec des affleurements de

substratum rocheux. On dispose ainsi d'un paramètre granulométrique bien repéré par rapport à la topographie;

• Les résultats obtenus par Boucher et al. (2005) sur le domaine continental côtier adjacent permettent d'effectuer de relations entre domaine continental et domaine marin.

Les campagnes de terrain effectuées de 2005 à 2007 dans les deux zones d'étude ont permis de collecter des données de terrain qui ont contribuées à l'étalonnage des données LiDAR. Cette base d'informations indispensables peut être utilisée pour le développement de techniques d'adaptions du SHOALS à la cartographie côtière.

1.4. But et présentation du travail

Ce travail se divise en deux parties principales : « développement informatique » et « analyse des données ».

La première partie « Développement informatique » est exposée après une présentation du matériel utilisé au cours des différentes campagnes d'investigations de terrain et de la description des sites d'études. Elle décrit le développement de techniques informatiques indispensables à la lecture et à la manipulation des données provenant du SHOALS. En effet, il n'existait aucun programme informatique permettant de lire et utiliser les données fournies par Optech. Ces dernières étaient dans un format simplifié (par rapport au standard d'Optech) et spécialement conçu pour ce projet de recherche. Ces techniques et algorithmes, développées sous forme de librairie informatique, ont été présentés dans différents conférences : Cottin et Long (2005, 2006, 2007), Cottin et al. (2005 a, b, 2006, 2007), Long et al. (2007). Ils ont pu être appliqué, par la suite, à d'autres recherches dans le domaine de la cartographie des habitats biologiques (Cottin et Long, 2007, Collin et al., 2007). Outre ces librairies, une interface de visualisation et de traitement des données du SHOALS a également été développée.

La deuxième partie du travail, « analyse des données », se divise en deux phases

d'analyses.

La première phase, « analyse des élévations », concerne l'analyse des données selon un aspect topographique et se concentre sur:

- une comparaison des données bathymétriques provenant de Long (2006), SHC (1979) et du SHOALS. Cet aspect est indispensable afin de s'assurer que les données sont correctement positionnées entre elles et qu'une corrélation spatiale peut être entreprise entre les différentes méthodes d'investigations.
- l'identification des corps sédimentaires ainsi que la mise en évidence d'indications géologiques et courantologiques qu'ils peuvent fournir, ex: dunes (orientation, taille, fréquence...), dérive littorale.

La deuxième phase, « analyse des signaux de retour », décrit le développement de méthodes d'analyse et de flux de traitement des signaux de retour du SHOALS pour l'identification de l'interface d'un environnement totalement silico-clastique en vue de créer des cartes sédimentaires des fonds marins peu profonds.

A l'issue des analyses et de la présentation des conclusions obtenues, une discussion portera sur la validité et les limites de la méthode développée ainsi que les futurs développements suggérés.

Ainsi, le SHOALS peut être utilisé pour réaliser des cartes topographiques et bathymétriques détaillées de zones littorales. Ces cartes détaillées et rapidement réalisées (quelques heures) pourraient contribuer au suivi à court terme des évolutions morphologiques, telles que la migration des sédiments ou des phénomènes d'ensablement et d'envasement. Il serait également possible de réaliser des cartes des natures des fonds qui identifient la nature géologique du substrat, des sédiments et de la végétation associée, ainsi que leurs évolutions à court terme.

2. Matériels et Méthodes



2.1. La campagne aéroportée

2.1.1. Le LiDAR bathymétrique d'Optech, le SHOALS

Le SHOALS (Scanning Hydrographique Operating Airborne Lidar System) est un système laser aéroporté de type LiDAR (Light Detection and Ranging) dédié aux relevés bathymétriques. Le système est installé sur une plate-forme aéroportée qui peut être un avion, un hélicoptère ou encore un drône dans sa version militaire. La version utilisée pour notre étude est le SHOALS.

2.1.1.1. Historique

Les premiers concepts et applications du laser bathymétrique datent du milieu des années 1960. Il s'agissait à ce moment là d'être capable de détecter des sous-marins (Guenther, 2001; Sorenson et al., 1966) ou de simplement mesurer la profondeur (Sorenson, 1966). Au cours des années soixante-dix, le système devient aéroporté et plusieurs pays tels que le Canada, l'Australie et l'Union Soviétique se lancent dans le développement des LiDAR aéroportés de première génération. Les développements et tests de cette technologie permettent de mettre en lumière et de mieux comprendre les biais de mesures induits par les paramètres environnementaux, tels que l'influence de la surface de l'eau et les interactions entre le faisceau laser et la colonne d'eau qu'il traverse. Les années quatre-vingt représentent les grandes avancées technologiques des systèmes LiDAR bathymétriques avec finalement le développement des premiers systèmes en opération, le LARSEN-500 (Banic et al., 1986) ainsi que le WRELADS II (Penny et al., 1986, Billard et Wilsen, 1986) première version non opérationnelle du LADS (Compton et Hudson, 1988). Ce dernier rentrera en production au début des années quatre-vingt dix (Setter et Willis, 1994). En 1988, le corps d'ingénieurs de l'Armée Américaine (U.S. Army Corps of Engineering, USACE) commence le programme SHOALS (Pope et Lillycrop, 1988) et le système est opérationnel cinq années plus tard (Lillycrop et Banic, 1993, Lillycrop et al., 1993). Le LADS, pour les Australiens (Setter et Willis, 1994) et le Hawk Eye (Steinvall et al., 1994), pour les Suédois, entrent également en production au cours de cette décennie. À la fin des années

quatre vingt dix, le SHOALS est capable d'utiliser un Kinematic GPS (KGPS) comme base de référence verticale (Guenther et al., 1996a) permettant au système SHOALS de s'affranchir totalement des données de marées indispensables au post-traitement des relevés hydrographiques, mais également de faire conjointement des relevés topographiques et bathymétriques. La fréquence d'acquisition du SHOALS est également doublée (Irish et Lillycrop, 1999).

Aujourd'hui de nombreux pays tels que l'Australie, la Barbade, le Canada, Les Émirats Arabes Unis, l'Espagne, la Finlande, la France, l'Indonésie, l'Italie, le Mexique, la Norvège, la Nouvelle-Zélande, Porto-Rico ainsi que des organismes tels que l'OTAN, USACE, USGS (Commission Géologique Américaine), la NOAA, la FEMA utilisent ou ont fait appel à des sociétés privées pour des relevés utilisant les LiDAR bathymétriques, à des fins de surveillance et de gestion des zones littorales.

2.1.1.2. Description du système

Le SHOALS est un système modulaire, ce qui le rend transportable et adaptable à différentes plate-formes aéroportées. Il est constitué de quatre modules (Optech Inc., 2004a) :

- Lidar Sensor: contient les deux sources laser², le scanner, les interfaces de numérisation et digitalisation du signal de retour et la caméra numérique.
- Power Distribution Unit (PDU): l'unité permettant l'alimentation du système en énergie.
- Aircraft Positioning System (APS): comprend la centrale inertielle (POS-AV) et les deux systèmes de positionnement: le DGPS et le KGPS. Le système de positionnement est choisi par l'opérateur en fonction des moyens dont il dispose. Le mode KGPS (Kinematic GPS) est le plus précis. Il fournit un positionnement avec une précision inférieure à 5 cm. Pour utiliser ce mode, il doit être étalonné à partir d'une balise au sol, positionnée avec soin et un post-traitement des données. Le mode DGPS est un peu moins précis que le précédent mais offre deux

² Laser est l'acronyme anglais de « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation » ce qui en français correspond à « amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement ». Ainsi, une source laser est une lumière spatialement et temporellement cohérente grace à l'effet laser qui est un principe basé sur l'amplification cohérente de la lumière par émission stimulée.

avantages: il est plus facile à mettre en oeuvre parce qu'il ne nécessite aucun support terrestre et les positions sont calculées en temps réel avec une précision inférieure à 20 cm. Le calcul différentiel peut être effectué à l'aide de trois sources différentes, la balise, la radio ou les satellites. Ces derniers sont à privilégier. Le mode DGPS nécessite de connaître les paramètres de la marée. En effet, le positionnement vertical s'effectue en calculant la distance entre l'avion et la position moyenne de la surface de l'eau. Le KGPS ne nécessite pas de correction verticale parce que son positionnement se fait de façon précise dans les 3 dimensions indépendamment de la surface de l'eau (Brooks et al., 1998).

System Control and Data Acquisition (SCADA): représente le composant central du système car il permet le contrôle des lasers et l'enregistrement des données. Ce module est constitué d'un ordinateur, d'une unité de stockage des données et d'un écran pour le pilote afin qu'il puisse naviguer sur des lignes de vol pré-définies lors de l'élaboration de la mission avec le GCS (Ground Control Software), logiciel de préparation de mission (Optech Inc, 2004b). Les données enregistrées doivent être analysées et corrigées à l'aide d'une station de travail au sol. Le calcul le plus important est celui qui concerne la correction du positionnement. C'est à l'heure actuelle la phase qui consomme le plus de temps durant le traitement des données et qui oblige un traitement au sol de ces dernières.

Dans la version commerciale, le SHOALS possède un module supplémentaire, un capteur de type CASI 2 (Compact Airborne Spectrographic Imager 2), donnant à ce dernier une capacité d'imagerie hyperspectrale (Estep et al., 1994, Francis and Tuell, 2005). Ce capteur n'a pas été utilisé dans le présent travail.

i. Le mode hydrographique

Laser dédié aux relevés de bathymétrie, il est fabriqué par la société Cutting Edge Optronics Inc (CEO). C'est un laser de type *Nd:YAG* (Guenther et al., 1996a) qui produit deux faisceaux colinéaires de longueurs d'ondes différentes. La longueur d'onde fondamentale de 1064 nm est situé dans l'infrarouge. Un cristal générateur de deuxième harmonique produit simultanément une deuxième longueur d'onde qui est le double de la précédente, soit 532 nm dans le bleu-vert.

L'infrarouge est dédié à la détection de la surface de l'eau et le bleu-vert est dédié à la localisation du fond.

La fréquence du laser hydrographique est de 3 kHz et l'énergie totale est de 7,5 mJ répartie de la façon suivante : 4 mJ pour le bleu-vert et 3,5 mJ pour l'infrarouge. La durée d'émission de l'impulsion est de 6 ns pour le bleu-vert et inférieure ou égale à 10 ns pour l'infrarouge.

La divergence des faisceaux, comprise entre 3,7 et 5 mrad, est une fonction de l'altitude de vol pour assurer une bonne qualité du signal de retour mais également pour être conforme aux normes de sécurité au sol en ce qui concerne une exposition au faisceau laser de la peau et des yeux. Si, durant le survol l'intensité du faisceau laser au sol est supérieure aux conditions de sécurité, le système est automatiquement arrêté.

ii. Le mode topographique

Le laser utilisé en mode topographique est du type QIR-500-1064-8. Il s'agit d'un *diodepumped Q-switched* laser de la société Crysta laser. Il produit un faisceau infrarouge de longueur d'onde 1064 nm. L'énergie maximum du laser est de 20 μ J. Il a une fréquence de 10 kHz et la durée d'émission est de 8 ns. La divergence du faisceau est constante quelle que soit l'altitude d'opération du SHOALS et est fixée à 0,5 mrad.

iii. Paramètres de relevé

Le SHOALS opère entre 200 et 800 mètres d'altitude avec une vitesse allant de 125 à 260 noeuds, soit entre 64.31 et 133.76 m.s⁻¹. Le couloir de balayage a une largueur égale à :

$$L_{swath} = 0.58 \times Z_{plane} \tag{1}$$

*L*_{swath} est la largueur du couloir de balayage et Z_{plane} l'altitude de vol de la plate-forme aéroportée. La densité des points de relevé pour le mode hydrographique varie de 2 x 2 mètres à 5x5 mètres, par incrément métrique elle est en revanche constante, 1 x 1.2 mètres, pour le mode topographique. La forme des traces de balayage est en arc de cercle vers l'avant suivant un angle de 20° par rapport au nadir (Figure 3) et a une fréquence de 16 Hz. Le laser hydrographique est pulsé à une fréquence de 3 kHz alors que le laser topographique est à 10 kHz. La plus petite épaisseur d'eau mesurée est de 0.2 mètres et la plus grande profondeur d'eau atteinte avec le système SHOALS est de 50 mètres dans les eaux claires des Bahamas.



Figure 3. Exemple de balayage en arc de cercle en mode hydrographique. Quatre lignes de vol sont visibles. Dans le coin inférieur droit, il est possible de voir un trou dans les données dû à un problème dans le signal de retour. Le chevauchement entre les lignes est différent et non constant.

iv. Principe de fonctionnement

Lorsqu'un faisceau est émis par un des laser, il est dirigé vers le scanner grâce au transmetteur optique. Le scanner a été développé par Optech. Il s'agit de deux miroirs indépendants, chacun monté sur un axe dont les mouvements sont contrôlés par un ordinateur. L'oscillation, due à une fréquence très précise des miroirs, définit la forme du balayage au sol. L'orientation des miroirs est enregistrée afin de connaître avec exactitude la position au sol des points de relevé. Pendant le vol, le scanner reçoit les informations

en temps réel de la centrale inertielle et corrige ainsi le tonneau, le cap et le tangage de l'avion afin de conserver une forme de balayage homogène.

Le mode de relevé, la densité et la forme du balayage contraignent les paramètres de vol. En mode hydrographique, un vol à basse altitude est préférable puisqu'il engendre une meilleure précision et une plus grande pénétration dans l'eau du faisceau. En revanche, la surface totale couverte par le relevé est plus petite comme le montre l'équation 1. Le mode topographique permet une altitude de vol supérieure car l'intensité du faisceau infrarouge est plus forte. Il en résulte donc une plus grande surface de balayage au sol.

Le signal de retour est capté par le receveur optique. Son but est d'optimiser la réception du signal pour les longueurs d'onde de 1064, 532 et 645 nm et de réduire le signal de toutes les autres longueurs d'onde, notamment celle de la lumière du jour. Le receveur optique est l'élément le plus important du système. Il doit être précisément aligné et étalonné pour chaque relevé afin de ne subir aucune perte de signal. Ce dernier est enregistré sur quatre canaux différents ayant chacun leurs spécificités (Guenther et al., 1994).

v. Shallow Green channel(SGC) et le Deep Green channel(DGC):

Le canal vert peu profond (SGC) et le canal vert profond (DGC) ont pour but de détecter la bathymétrie, mais aussi dans certaines conditions, la surface de l'eau. Le SGC détecte des profondeurs de 1 à 12 mètres. Le DGC fonctionne pour des profondeurs de 7 mètres et plus. Chaque canal a un gain différent étant donné que l'intensité du signal de retour n'est pas la même. Pour que le signal de retour soit détecté par un canal, son intensité doit être au-dessus du seuil relatif au bruit de fond. Ainsi, l'énergie est divisée entre les deux canaux, le SGC reçoit 10% et le DGC 90% de l'énergie totale du signal de retour.

vi. Raman channel:

Le canal Raman sert à détecter l'interface air/eau et est particulièrement utile dans des conditions de mer calme. En effet, lorsque la mer est calme, le signal bleu-vert est «perdu» à cause de la diffusion spéculaire (Ressources naturelles Canada, 2007). L'effet Raman résulte de l'excitation des liaisons OH des molécules d'eau, par le faisceau vertbleu, provoquant l'émission d'un photon d'une longueur d'onde de 645 nm. L'effet Raman est donc indépendant de l'état de la mer et du vent contrairement aux précédents canaux.

vii. Infra-red channel:

Le canal infrarouge permet de mesurer des élévations, de détecter la surface de l'eau et l'environnement dans lequel est effectué le relevé. La surface de l'eau est détectée en fonction de l'intensité du signal de retour qui est affecté de manière importante par l'eau. En mode hydrographique, le milieu émergé sature le signal de retour à cause d'un gain important appliqué au canal. En mode topographique, l'énergie d'émission du laser est plus faible afin que le signal ne soit pas saturé.

En mode hydrographique, sur le SHOALS, contrairement au mode topographique, les impulsions de retour sont digitalisées et enregistrées (LaRocque et al., 2004). Le fonctionnement du système consiste à mesurer les temps de voyage aller-retour des faisceaux et, connaissant la vitesse de la lumière dans l'eau et dans l'air, il est possible de calculer les épaisseurs de la colonne d'eau. Cette valeur est alors combinée avec les données du KGPS pour déterminer des profondeurs réelles.

2.1.1.3. Contraintes de conceptions

La fonction la plus importante du LiDAR bathymétrique est de détecter l'interface air/eau bien plus que le fond (Guenther et al., 1994). Ainsi, les systèmes LiDAR bathymétriques sont équipés de laser vert qui possède le plus faible coefficient d'atténuation dans l'eau, plus faible que l'infrarouge

L'intensité de retour de surface est mesurée par le canal vert et résulte d'une combinaison linéaire de l'intensité de retour de surface et de l'intensité de retour de la colonne d'eau et du fond. Cette intensité peut présenter une très forte variabilité d'amplitude (Guenther, 1986). En théorie, la différence de temps entre ces deux composantes, retour de surface et fond, permet de positionner le plan d'eau. Or, étant donné que cette mesure résulte d'une combinaison linéaire de deux retours, il peut y avoir de trop grands écarts dans les amplitudes relatives, rendant le positionnement impossible. C'est pour cela qu'il faut absolument intégrer un laser infrarouge dédié à la détection de la surface de l'eau étant donné sa très faible capacité à pénétrer l'eau (Tyler et Preisendorfer, 1962). Afin d'augmenter la précision et la fiabilité du système, un autre canal est ajouté, le Raman (Guenther, 2001).

Une autre contrainte est le rapport d'amplitude entre le retour de surface, généralement

fort, et celui du fond, généralement faible. Cette différence peut atteindre six ordres de grandeur. Or, l'information est enregistrée sur seulement deux ordres de grandeur dans une fenêtre de temps de 10 à 100 nanosecondes Pour limiter cette contrainte, certains paramètres du système tels que la forme du balayage au sol, l'angle du scanner (Guenther et al., 1996a), doivent être choisis judicieusement lors de la conception du système étant donné leur impact sur l'amplitude finale du signal (Guenther, 2001).

2.1.1.4. Paramètres d'erreur

Des sources d'erreurs successives apparaissent durant tout le trajet de l'onde. Une description dans l'ordre chronologique d'affectation est présentée ci-dessous.

i. Dans l'air

Dans l'air, les facteurs qui vont influencer le signal de retour sont l'illumination solaire, la pluie, la neige, le brouillard et les nuages.

ii. A l'interface air/eau

À l'interface air/eau, l'intensité du signal de retour est affectée par les aérosols mis en suspension par les vents, les vents forts, les vents trop faibles, et la brume matinale.

iii. Surface du plan d'eau

À la surface du plan d'eau, l'intensité du signal de retour est influencée par les vagues de grande amplitude et de courte longueur d'onde, la zone de déferlement, les moutons et le reflet du soleil.

iv. Dans la colonne d'eau

Dans la colonne d'eau, la clarté de l'eau est le facteur limitant principal du système. Ce paramètre contrôle la qualité du signal reçu et est donc directement lié à la profondeur maximum relevée (Guenther et Goodman, 1978). Cette valeur est la plus grande profondeur mesurée de façon automatique, à un endroit donné, à un temps donné, avec une précision au moins égale aux standards imposés (Guenther et al., 1996).

La profondeur maximum relevée se calcule automatiquement grâce à un signal de forte amplitude et peu bruité. Lorsque le signal reçu est de mauvaise qualité due à des perturbations environnementales importantes, le calcul automatique de la profondeur devient difficile voir impossible. Une opération manuelle est donc nécessaire pour distinguer la profondeur maximale atteinte, qui est caractérisée par un signal de faible amplitude « noyé » dans le bruit de fond de la queue du signal.

Différents paramètres de la colonne d'eau affectent l'atténuation du signal. Le type de matière en suspension, organique ou non, dissoute ou non, ainsi que leurs concentrations, vont directement influencer la performance du système. Selon une règle empirique, le système SHOALS pénètre entre deux et trois fois la profondeur mesurée par un disque de Secchi. Une valeur de 2 est préconisée lorsque l'absorption domine et de 3 lorsque la diffusion est le processus le plus important dans la colonne d'eau (Guenther, 2001). Le rapport entre les phénomènes d'absorption et de diffusion est fortement corrélé avec les cycles de marées, les saisons et les climats et demande une étude plus approfondie.

Enfin un autre effet directement relié à la clarté de l'eau est la diffusion du faisceau laser dans la colonne d'eau. Le diamètre de demie énergie (diamètre d'un disque qui représente la moitié de l'énergie réfléchie) atteint dans la plupart des conditions environnementales un étalement qui se situe entre 10% et 30% de la profondeur atteinte ajouté au diamètre du faisceau à l'interface air/eau, soit deux mètres environ. Dans des conditions extrêmes, eau très turbide ou très profonde, cette valeur peut atteindre 50% (Guenther, 2001). Cet effet d'étalement affecte le calcul de la profondeur et nécessite une correction. Outre la diminution de la résolution verticale, la résolution horizontale en est également modifiée et la capacité du SHOALS à détecter des objets de petite taille en est réduite.

v. Fond du plan d'eau

Au niveau du fond marin, les facteurs qui influencent l'intensité du signal de retour sont la réflectivité du fond, la présence d'algues, la densité de ce couvert (Tulldahl et Steinvall, 1999) et la morphologie du fond et plus particulièrement son inclinaison par rapport à l'angle d'incidence du faisceau laser (Wang and Philpot, 2002). En outre, la nature du sédiment, la granulométrie, la compaction ainsi que la porosité, sont des facteurs qui influencent l'intensité du signal de retour.

2.1.1.5. Précision des données

Les standards de précision des relevés hydrographiques sont définis par l'Organisation Internationale d'Hydrographie (IHO). La précision est fonction de la tranche d'eau considérée et l'échelle de la carte. Les levées d'ordre-1 sont « [...] destinées aux ports, aux chenaux d'approche des ports, aux routes recommandées, aux voies de navigation intérieures et aux zones côtières où la densité du trafic commercial est élevée, où la profondeur d'eau sous quille est moins critique et où les caractéristiques géophysiques du fond sont moins dangereuses pour les navires (fonds sablonneux ou vaseux, par exemple). Les levés de l'ordre-1 devraient se limiter aux zones où la profondeur d'eau est inférieure à 100m. » (Organisation hydrographique internationale, 1998). Ainsi, l'erreur verticale est de ± 0.5 m (95% de confiance) en cumulant toutes les sources de mesure incluant la marée et l'erreur horizontale est de ±5 m (95% de confiance). Le recouvrement est de 100% dans certaines zones particulières où la nature du fond ou le risque d'obstruction le préconise. Le système de relevés d'ordre-1 doit être capable de détecter des « éléments cubiques de plus de 2 m dans des profondeurs pouvant atteindre 40 m » (Organisation hydrographique internationale, 1998). Selon les spécificités du SHOALS, les relevés effectués avec un tel système ont une précision supérieure au standard ordre-1 (Guenther et al., 2000,a, b), comme ce fut démontré dans le Golf du Morbihan (Le Roux et al., 2006)

2.1.1.6. Résolution spatiale

En mode hydrographique le SHOALS possède les résolutions spatiales suivantes : 2×2 m, 3×3 m, 4×4 m et 5×5 m. La densité de points au sol dépend des paramètres de vol. Ainsi, plus la densité des points au sol est élevée, plus l'avion doit voler bas et plus la vitesse de relevé doit être faible. Ce qui entraîne une diminution de la couverture au sol (largeur de la bande de relevés), mais une meilleure pénétration dans la colonne d'eau. En mode topographique, seule une résolution spatiale de 1 x 1.2 m est disponible.

2.1.1.7. Choix des paramètres de vol pour le relevé dans la Baie des Chaleurs, Gaspésie, Québec, Canada

Un total de 104 lignes de vol (Tableau 1) a été réalisé pendant les quatre jours de relevé représentant un total de 12 heures de vol. Trois modes de relevés ont été utilisés:

- 1. deux relevés en mode hydrographique :
 - Haute densité : altitude de vol de 300 mètres avec une densité de points au sol de 2x2 mètres
 - Faible densité : altitude de vol de 400 mètres avec une densité de points au sol de 4x4 mètres
- 2. Un relevé en mode topographique :
 - vol à 800 mètres d'altitude avec une densité de point au sol de 1x1,2 mètres.

Tableau 1. Modes de relevé, paramètres et nombre de lignes de vols effectués pendant la campagne 2006 dans la Baie des Chaleurs, Gaspésie, Québec.

Lieux	Mode relevé	Altitude de vol	Densité	Nombre de lignes	
Pasnáhiac	Hydrographique	400 m	4 x 4 m	22	
Tuspeonue	11yur ograpnique	300	2 x 2 m	16	
Bonaventure	Hydrographique	400 m	4 x 4 m	29	
		300 m	2 x 2 m	27	
Bonaventure	Topographique	800 m	1 x 1.2 m	10	

2.1.1.8. Performance théorique du système durant la période de relevé

Une étude préliminaire des performances du SHOALS dans la Baie des Chaleurs pour le mois de juin à été réalisée par Feygels, d'Optech international, en février 2006 (Feygels, 2005). Ce rapport se base sur des images Aqua-MODIS et des mesures de disque de Secchi réalisé en 2005. Les performances prévues varient selon la source des données considérées : entre 8-12 m pour les mesures Secchi et entre 6–11 m pour le mois de juin et 8-12 m pour les données Aqua-MODIS.

2.1.1.9. Exemple de données

Pour chaque impulsion laser émis, quatre signaux de retour sont enregistrés (Figure 4). Leurs enregistrements sont simultanés. La résolution temporelle de l'enregistrement est de 1 ns pour une résolution verticale de 8 bits (soit 256 valeurs). Le canal profond vert (DGC) est enregistré sur 501 ns. Dans l'exemple présenté, l'enregistrement est coupé à 201 ns parce que au-delà, seul le bruit est enregistré.



Figure 4. Exemple de données des 4 canaux enregistrés par le SHOALS lors d'un relevé en mode hydrographique. A noter ici que l'enregistrement du canal Raw Deep Green Channel est tronqué (normalement sur 501 valeurs) à des fins de meilleure lisibilité. En effet, les 300 dernières valeurs sont uniquement du bruit de fond.

2.1.1.10. Période et lieux de relevés

Dans le cadre du projet d'étude, la campagne de mesure aéroportée a été effectuée entre le 1er et le 4 juillet 2006 sur les sites de Saint-Siméon-Bonaventure et de Paspébiac en Gaspésie, Canada. Durant les relevés, une station fixe DGPS Trimble, nécessaire au posttraitement des données, a été déployée sur les sites de Saint-Siméon-Bonaventure et de Paspébiac respectivement au-dessus de la balise géodésique 78K0263³ et 2504To⁴ référencées selon le système NAD83. Entre le 1er et le 3 juillet 2006, des équipes au sol ont effectué des mesures synchronisées sous le passage de l'avion. Le 4 juillet 2006, seul un survol du SHOALS est effectué sur le site de Paspébiac.

³Coordonnées UTM de la balise 78K0263: E 310460.98, N 5322612.23, Z=2.72 m ⁴Coordonnées UTM de la balise 2504To: E 332438.53, N 5320643.60, Z=2.05 m

2.2. Les campagnes hydrographiques

Les campagnes hydrographiques ont pour but de collecter un ensemble de données sédimentaires et environnementales des sites d'études de ce projet. Cette approche est indispensable pour la compréhension des différents faciès sédimentaires exprimés et des processus hydrodynamiques associés. Cela constitue également une base de données de terrain destinée à l'étalonnage du signal de retour du SHOALS en vue de son adaptation à la cartographie sédimentaire côtière. Ainsi, plusieurs outils, qui sont détaillés par la suite, ont été utilisés pour collecter ces informations.

2.2.1. Le Seistek-IBK

C'est un appareil de sismique réflexion destiné à l'étude des couches géologiques en milieu côtier peu profond (Simpkin, 2005). Ce système est reconnu pour effectuer des relevés précis et de très haute résolution (Duchesne, 2005).

2.2.1.1. Principe

Cet appareil, tiré à l'arrière d'un bateau, est composé de trois parties, une source d'émission sismique de type boomer, un dispositif de récepteurs de l'énergie réfléchie et un système d'enregistrement du signal de retour (Duchesne, 2005). Une onde de compression est générée par la collision de deux plaques à la surface de la colonne d'eau et les échos renvoyés par le réflecteur de surface et les discontinuités dans les couches sédimentaires sous-jacentes sont enregistrés. Cette technologie permet d'avoir un profil de la colonne sédimentaire. Lors des relevés, le bateau navigue à une vitesse maximale de 4 nœuds et un DGPS est fixé directement sur le Seistec-IKB. Ce dernier a une fréquence moyenne d'émission de 5 kHz et une puissance maximale 300 J. Les signaux de retour sont enregistrés simultanément sous forme analogue sur un enregistrées sur DAT de Sony ainsi que sur une table graphique EPC 4800. Les données enregistrées sur DAT sont digitalisées, à posteriori, au format SEG-Y possédant 2048 valeurs par traces suivant un pas de 0.05 ms. La couverture au fond est constituée d'une trace, située théoriquement à la verticale du bateau, dont la largueur augmente avec la profondeur.

2.2.1.2. Paramètres d'erreur

Les paramètres d'erreurs proviennent de sources pouvant générer des bruits parasites pour l'enregistrement du signal géophysique, tels que les hélices des bateaux, les vagues, les vents, les bancs de poissons et crustacés, les mammifères marins, les glaces et les courants de fond. Pour assurer une bonne qualité du signal de retour, il est nécessaire de filtrer ces bruits parasites en multipliant les sources de réception et en appliquant des filtres digitaux et numériques (Duchesne, 2005). Il est également nécessaire de corriger le signal de retour des déformations induites par la colonne d'eau. Il faut ajuster la vitesse théorique de l'onde sonore dans l'eau en fonction de la température et salinité ainsi que des variations importantes telles que des thermoclines et haloclines. Il existe également des erreurs dans le positionnement de la ligne de relevé étant donné que l'antenne DGPS est située directement sur le poisson. Tous les mouvements du poisson, roulis, tangage et tonneau, induiront une erreur latérale de positionnement du point de relevé au fond. Cette erreur augmente avec la profondeur et l'angle d'inclinaison du poisson selon la formule :

$$E_{Laterale} = P \times_{\tan} \alpha \tag{2}$$

où *E* Laterale est l'erreur latérale en mètre sans indication de la direction, *P* la profondeur à cet endroit et α l'angle au nadir du poisson. Aucun paramètre du système ne permet de connaître l'angle α et donc cette erreur n'est pas corrigée pour les relevés, bien quelle puisse être substantielle. L'erreur latérale pour une profondeur de 5 m est de 0.08 m et est de 0.52 m à 30 m pour 1° d'inclinaison.

2.2.1.3. Résolution spatiale

La résolution horizontale des données est de 0.68 m en considérant 3 tirs par seconde à une vitesse constante de 2.056 m.s⁻¹(4 nœuds). La résolution verticale est de 25 cm (Simpkin, 2007). Elle correspond à la demie longueur d'onde d'émission de l'appareil en mode positif ou négatif.

2.2.1.4. Exemple de donnée



Figure 5. Exemple de données de Seistec IKB en avant de Saint-Siméon (Long, 2006). Le profil, situé en avant de Saint-Siméon, est orienté le long de la côte, au large par une profondeur variant de 12 à 15 m. Le champ de laminaires (L) se développe sur le substratum rocheux (R) ou sur un lit de galets (G). Ce lit représente un lag d'érosion par dessus les sédiments (S). Par une profondeur inférieure à 12 m le champ ne se développe plus.

2.2.1.5. Périodes de relevés

Les relevés se sont effectués entre le 19 et le 21 juillet 2005 sur la zone de Paspébiac. Un total de 29 lignes a été enregistré, représentant 07h20 de temps de relevé pour une distance d'environ 54 km.

2.2.2. Le Sonar à balayage latéral

2.2.2.1. Principe

Le sonar à balayage latéral permet d'avoir une image acoustique du fond marin. Le signal acoustique produit une forme conique qui balaye une surface allant de la verticale du bateau jusqu'à 100 m latéralement de chaque côté. L'intensité de l'onde de retour réfléchit par le fond est une fonction de l'absorption du matériel constituant le fond. Ainsi, à puissance d'émission égale, un fond rocheux renvoie un signal plus intense que le sable ou les argiles. L'appareil utilisé est un Simrad-Mesotech, l'émetteur correspond au modèle 971-1 et le processeur au modèle 971-15 (Long, 2006). L'enregistrement des données ne peut se faire sur l'enregistreur DAT de Sony parce que la fréquence de réception est trop élevée. Il est donc uniquement possible d'imprimer les données directement sur un support papier à l'aide d'une table EPC 9800. La fréquence du sonar est de 675 KHz avec un intervalle de mesure de 25 millisecondes. Dans la géométrie adoptée, étant donné que le sonar est fixé sur un mat le long du côté tribord du bateau, la coque rend impossible l'utilisation des deux côtés du balayage. Ainsi seul le côté droit du balayage est étudié.

2.2.2.2. Paramètres d'erreur

La nature de l'onde émise étant la même que celle du Seistec-IKB, ces deux systèmes ont les mêmes limitations en ce qui concerne la diffusion du signal dans la colonne d'eau et de positionnement due aux mouvements du bateau. Concernant ces dernières, les erreurs de positionnement sont plus importantes aux extrémités du balayage plutôt qu'au centre. Cependant, une déformation supplémentaire existe, elle est due au balayage latéral. En effet, l'intensité de la réflexion du faisceau est fonction de l'angle de réflexion sur le médium rencontré. Cette intensité est directement proportionnelle à son angle par rapport au fond.

2.2.2.3. Résolution spatiale

Les données du sonar à balayage latéral sont imprimées sur des rouleaux de papier à l'aide d'une table EPC 9800. Le nombre de points par ligne est de 1800 pour une couverture latérale d'environ 80 mètres ce qui donne une résolution de 4.4 cm.point⁻¹. Cependant, la résolution est affectée par deux facteurs : par la distance latérale de la mesure par rapport à la verticale du bateau et par l'angle d'incidence du faisceau par rapport au fond.

2.2.2.4. Période et lieux de relevés

Les relevés se sont effectués le 22 et le 24 juillet 2005 sur la zone de Paspébiac. Un total de 13 lignes a été enregistré, représentant 05h58 de temps de relevé pour une distance d'environ 38 km.

2.2.2.5. Exemple de donnée



Figure 6. Exemple de donnée de sonar à balayage latéral. Trois faciès sont présents sur l'interprétation proposée de cet exemple. A : sédiments grossiers, B : sédiments plus fins, C : laminaires peu denses. Il est nécessaire de prélever des échantillons sédimentaires afin d'étalonner les nuances de gris des données. En l'absence de telles de données, seule une interprétation granulométrique relative est possible. Par ailleurs, la taille et la densité des laminaires diminuent avec l'augmentation de la profondeur. La flèche indique le sens de progression du bateau.

2.2.3. Mesures de réflectance avec le Fieldspec® Handheld

2.2.3.1. Principe

Le Fieldspec® Handheld est un spectroradiomètre ultra portable dédié à la mesure de terrain et de laboratoire conçu par la société Analytical Spectral Devices Inc. Ce capteur a été gracieusement fourni dans le cadre de la première édition du programme Alexander Goetz Instrument Support Program mise en place par ASD Inc.. Il a été utilisé dans cette étude pour effectuer des mesures des propriétés de réflectance des sédiments de plages et des fonds marins.

Le capteur permet d'effectuer des mesures sur une bande hyperspectrale de 325 nm à 1075 nm avec une résolution de 3 nm centré de 700 nm, ce qui couvre les 3 longueurs d'ondes du SHOALS. L'angle d'ouverture du capteur (Field Of View, FOV) peut être modifié avec différents jeux d'optique et peut couvrir une surface allant de 25° à 1° (Analytical Spectral Device Inc, 2002). L'architecture de son capteur, une barrette de 512 photo-diodes, permet de disposer d'une vaste plage de temps d'acquisition variant de 17 ms à quelques minutes $(2^n x 17 ms)$. Le temps d'intégration est défini automatiquement par le capteur lors de la procédure d'optimisation et est une fonction directe de l'ensoleillement. La réflectance est une mesure relative de l'énergie solaire réfléchie par un sédiment par rapport à celle d'une cible blanche renvoyant la quasi totalité de l'énergie solaire. Il est donc nécessaire d'étalonner le système en début de mesures, puis régulièrement en utilisant une cible de référence. Pour cela, un disque de Spectralon utilisé comme référence blanche, assure une réflectance diffuse d'environ 97.8% pour des longueurs d'ondes de 350 nm à 2500 nm (Labsphere, Inc., 2006) et une moyenne de 99.1% de réflectance pour les longueurs d'ondes, 532, 645 et 1064 nm. Afin d'optimiser la qualité des mesures, le protocole utilisé consiste à faire réchauffer l'appareil au minimum 15 minutes avant toute utilisation à l'abri du soleil direct. Une référence noire (bruit du capteur) puis blanche sont effectuées. La calibration du système consiste à compenser l'effet du bruit du capteur sur la référence blanche (addition de l'inverse du bruit) de telle sorte que l'enregistrement d'une référence blanche correspond à une ligne horizontale centrée sur 1.0. Cette procédure d'optimisation du système est répétée

systématiquement toutes les 15 minutes ou plus si les conditions d'ensoleillement ou si la géométrie du système changeaient brusquement.

Pour les mesures de la réflectance des fonds marins, une fibre optique de 10 m reliée à une cage disposant d'un dispositif de mise en position et retrait d'une cible blanche de 15cm de diamètre a été utilisée.



Figure 7. Dispositif de mesure de reflectance des fonds marins à l'aide d'un Fieldspec® Handheld. Une fibre optique est fixée à un axe vertical pour mesurer la réflectance du fond. Pour chaque mesure, il est nécessaire d'étalonner le Fieldspec® Handheld afin de prendre en compte l'effet d'atténuation de la colonne d'eau. Un système permettant la mise en place d'une cible de spectralon au devant de la fibre optique a été réalisé.

Cette cage, élaborée à l'INRS-ETE par Stéphane Montreuil, est constituée d'une armature de tuyaux plastique d'un pouce de diamètre qui assure une rigidité à l'ensemble de la structure. La partie inférieure de la cage est occupée par le système mobile qui est constitué par une boite étanche contenant le moteur (moteur de vitre électrique de voiture) et l'électronique associée nécessaire à assurer la mobilité de la cible blanche.

La fibre optique offre un champ de vision de 25° ce qui nécessite que la cible blanche soit placée à une distance inférieure à 34.6 cm de l'extrémité de la fibre optique pour que

la mesure de référence soit entièrement centrée sur la cible et qu'elle n'intègre pas son environnement immédiat.





Pour les mesures effectuées sur les plages, aucun dispositif particulier n'a été ajouté au Fieldspec® Handheld. Le capteur dispose également d'une entrée GPS afin de positionner chaque mesure. Un GPS *etrex* Garmin a été utilisé car il assure une précision suffisante pour le positionnement (1 à 5 mètres). Des mesures de réflectance en extérieur ont également été effectuées sur des échantillons sédimentaires rapportés des sites d'études afin d'avoir des mesures de réflectances en milieu contrôlé.

2.2.3.2. Paramètres d'erreur

Les mesures de réflectance sont très sensibles aux conditions environnementales et à la géométrie du système. Les paramètres les plus importants à considérer sur le terrain sont : la distance et l'angle du capteur par rapport à la cible, les différentes sources d'illumination qui peuvent exister et les variations de l'intensité du rayonnement solaire

pendant le temps de la mesure (telles qu'un voilage du soleil par des nuages, ombre de l'opérateur), la position de la source d'illumination (typiquement le soleil) et enfin le temps d'intégration de la mesure (Analytical Spectral Devices, Inc., 1999). L'humidité de l'atmosphère a également un impact direct sur la forme du spectre de réflectance.

Pour une cible identique et des conditions atmosphériques homogènes, des changements géométriques, d'énergie solaire reçue ou du temps d'intégration engendrent dans la majorité des cas une translation du spectre mesuré. Ce dernier garde néanmoins de façon relative ses pics d'absorption et d'émission spécifiques.

2.2.3.3. Problèmes rencontrés

Lors de la campagne de mesures de réflectance des fonds marins, de nombreuses sources d'erreurs se sont produites. En effet, l'utilisation d'une fibre optique d'ouverture limitée (25°) avec une illumination solaire qui diminue avec la profondeur a rendu la prise de données très difficile en raison de temps d'intégration très rapidement supérieurs à 2 minutes pour obtenir un spectre avec un rapport signal/bruit acceptable. De plus pour chaque mesure effectuée, une procédure de calibrage du système était nécessaire car l'atténuation de l'illumination solaire est une fonction de l'épaisseur d'eau traversée. Le temps de mesure final est donc généralement multiplié par 3. Or, durant cet intervalle, un bateau dérive et la mesure intègre plusieurs faciès sédimentaires. De plus, les mesures devaient se faire sous le vent pour éviter que le système ne passe sous la coque du bateau, et ne subissent l'ombre du bateau. En outre, les courants entraînaient toute la cage de mesure ce qui induisait un angle avec le fond proche de l'horizontal.

Les spectres de mesures ainsi collectés (Figure 10) présentent des artéfacts (saturations, effondrement) situés proche des longueurs d'ondes du SHOALS (532, 645 et 1064 nm). Ces problèmes ne sont pas corrigeables et cela rend les spectres inutilisables.

Ainsi, compte tenu des problèmes d'acquisition et des artéfacts contenus dans les spectres, les données de réflectance des fonds marins n'ont pas été utilisées dans ce travail.

2.2.3.5. Période et lieux de relevés

48 spectres de réflectance (sur un total de 1709 spectres) ont été collecté entre le 30 juin et le 15 juillet 2007 au large de Paspébiac et de Saint-Siméon-Bonaventure ainsi que dans la rivière Bonaventure.

2.2.3.4. Exemple de données.



Figure 9. Exemple de spectre de réflectance collecté avec le Fieldspec® Handheld. Ce spectre a été collecté sur la plage de Paspébiac au dessus d'un sable moyen fin humide.



Figure 10. Exemple de spectre de réflectance collecté par le Fieldspec® Handheld à une profondeur de 5 mètres au-dessus d'une zone sableuse. Le spectre présente des anomalies, telles que des saturations dans le bleu-vert et des effondrements dans l'infrarouge. Ce dernier effet est normal puisque le rouge est la première couleur à disparaître dans la colonne d'eau.

2.2.4. Mesures de disque de Secchi

2.2.4.1. Principe

Le disque de Secchi, inventé par le Père Pietro Angelo Secchi, astronome et conseiller du Pape Pius IX en 1865, permet de mesurer la clarté d'un plan d'eau (Ytreeide, 2008). Il consiste en un disque divisé en quarts de couleur blanche et noire. Actuellement, aucun standard n'existe réellement sur la taille et la couleur d'un disque de Secchi. Néanmoins, un certain consensus existe, de sorte que le diamètre est compris entre 20 et 50 cm et qu'il peut être soit entièrement blanc ou bien bi colore, noir et blanc (Dipin, 2008a). Des disques plus petits existent et sont dédiés à des environnements peu profonds. Le disque utilisé a un diamètre de 30 cm et est bi colore. L'utilisation du disque de Secchi consiste à immerger ce dernier et à le faire descendre dans la colonne d'eau. La profondeur retenue est la profondeur à laquelle l'observateur (ou un groupe d'observateurs) ne distingue plus le disque. Il existe différentes tailles de disques. Théoriquement, la taille du disque devrait avoir une influence directe sur la mesure faite. Or, certaines études ont montré que la taille du disque n'a que peu d'influence sur la profondeur finale mesurée (Dipin, 2008b).

2.2.4.2. Paramètres d'erreur

Les mesures de Secchi sont relatives étant donné le grand nombre de paramètres qui influencent la lecture finale. Ainsi, différents paramètres ont une influence sur la mesure finale tels que l'observateur, l'heure à laquelle est faite la mesure, si cette dernière est faite au soleil ou à l'ombre, l'importance du bloom alguaire et la concentration sedimentaire organique et inorganique, l'apport sédimentaire sur la zone par des rivières et des processus érosifs. De plus, la concentration des particules en suspension dans la colonne d'eau varient de façon saisonnière au cours de l'année. Il est donc nécessaire de tenir compte des paramètres environnementaux lors de la prise de mesure (pluie, vent, orage...)

2.2.4.3. Période et lieux de relevés

Les relevés ont eu lieu le 23 juillet 2005 à l'ouest du barachois de Paspébiac. Un ensemble de 9 mesures a été effectué. Les mesures de Secchi allaient de 5.50 m à 6.85 m avec une moyenne de 5.93 m. Ces mesures ont été la base de l'estimation de la performation du SHOALS pour la campagne de relevé en 2006 dans la Baie des Chaleurs (Feygels, 2005).



Figure 11. Positions des mesures effectuées avec le disque de Secchi à l'ouest du barachois de Paspébiac. La profondeur mesurée pour chaque point est reportée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2. Profondeu	i r mesurée à l	l'aide d'un	disque de Secchi.
----------------------	------------------------	-------------	-------------------

Points	A	B	С	D	E	F	G	H	Ι
Secchi depth	5.50	6.00	5.75	5.50	5.50	6.00	6.00	6.30	6.85

2.2.5. Echantillons d'eau

2.2.5.1. Principe

Ces mesures avaient pour but de connaître la concentration en matière organique et de matière minérale de la colonne d'eau. Des échantillons de 2 litres d'eau ont été prélevés à divers endroits et différentes profondeurs (1, 3 et 5 m).

2.2.5.2. Traitement

La moitié des échantillons d'eau est filtré au travers de filtres préalablement séchés et pesés. Les filtres une fois utilisés sont séchés et repesés et la différence de poids permet d'établir une concentration de sédiment pas litre d'eau.

2.2.5.3. Observations et limitations

Durant l'été 2006, les échantillons prélevés dans le marais présentent la concentration la plus importante de toutes les zones mesurées avec une moyenne de 10.27 mg.l⁻¹. S'agissant des échantillons prélevés autour de Paspébiac en 2006, la concentration moyenne est de 5.69 mg.l⁻¹. Ceci représente une valeur très faible, ce qui assure au SHOALS une efficacité optimale.

Pour l'été 2007, les échantillons prélevés dans la colonne d'eau présentaient des concentrations très faibles mais supérieures à l'année précédente avec une moyenne de 8.01 mg.l^{-1} .

2.2.5.4. Période et lieux de relevés

Le 2 juillet 2006, les échantillons d'eau ont été prélevés sur la zone est et ouest du barachois de Paspébiac depuis un bateau et dans le marais de Saint-Siméon-Bonaventure. En 2007, les prélèvements ont été effectués le 2 juillet à l'est du barachois de Paspébiac.

2.2.5. Vidéo sous-marine

2.2.5.1. Principe

Une caméra Sony Handicam HDR-FX1 est montée dans un étui étanche Phenom FXZ1 fixé à une structure permettant une immersion du système pour filmer les fonds marins. Deux sources de lumières artificielles blanches sont également fixées sur le système afin d'offrir une bonne qualité d'illumination. Le système est ensuite descendu jusqu'au fond puis remonté à l'aide d'un treuil à bord du bateau. A partir des films obtenus, une image instantanée du fond est extraite. Ceci permet d'avoir des points de contrôles de la nature des fond marins sur les sites d'études. Ces points sont indispensables à l'établissement d'une cartographie sédimentaires mais également ils permettent d'évaluer la qualité des résultats obtenus.

2.2.5.2. Résolution spatiale

L'image finale obtenue couvre une surface sur le fond marin de 92.1 x 45.8 cm. La taille de l'image numérique a une résolution de 327 x 240 pixels. Ainsi, la résolution finale de l'image est de 2.81 x 1.90 mm.pixel-1. Cette résolution permet de distinguer des classes granulométriques dont la taille est supérieure à 2 mm, c'est-à-dire des sables très grossiers selon la classification de Wentworth.

2.2.5.3. Période et lieux de relevés

Les images ont été acquises du 28 au 30 juin 2007 sur la zone de Paspébiac et du 1^{er} au 2 juillet 2007 au large du marais de Saint-Siméon-Bonaventure.
2.2.5.4. Exemple de donnée



Figure 12. Exemple d'images extraites de vidéo sous-marine. *1: galets, 2: laminaires, 3: sable fin à très fin, 4: sable très grossier à galets.*

2.2.6. Échantillons sédimentaires

Des échantillons sédimentaires du fond marin ont été collectés à partir d'un bateau en utilisant une benne. Cette campagne a été réalisée en parallèle avec les vidéographies sous-marines sur la zone de Paspébiac pendant l'été 2007.

2.2.6.1. Traitement

Le traitement consiste à prendre environ 20 g de sédiment, le peser puis le faire sécher à 60°C. Une fois sec, l'échantillon est à nouveau pesé (détermination de la teneur en eau) et soumis à une solution à 5% de H₂O₂ pour enlever la matière organique (détermination du pourcentage de matière organique). Il est ensuite lavé, séché à 100°C et repesé. Enfin on enlève les morceaux grossiers de carbonates (coquilles) sont enlevés manuellement et le reste de l'échantillon est traité avec une solution à 5% de HCl. On le lave, le sèche à 100°C et enfin on le repèse (détermination de la concentration de carbonate de calcium, CaCO₃). Le reste est tamisé dans une série de tamis dont la taille des mailles décroît selon un rapport de $\sqrt[3]{2}$ (soit de 8, 4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125, 0.063 millimètres) selon l'échelle Phi (Krumbein, 1936). Finalement une courbe granulométrique est établie.

2.2.6.2. Période et lieux de relevés

Un total de 48 échantillons, la moitié pour chaque site, a été prélevé entre le 28 juin et le 2 juillet 2007.





Figure 13. Exemple de courbe de granulométrie d'un sable moyen. Échantillon 34 localisé sur le site de Paspébiac aux coordonnées géographiques, N48 00 27.5, W65 14 44.4. Ici la taille des grains est exprimée en unité Phi. La définition de l'unité Phi (Krumbein, 1936) est : φ =-log₂D, ou D est le diamètre du grain exprimé en millimètre. De manière inverse, pour convertir une unité Phi en millimètre il faut utiliser l'équation suivante : D=2^{- φ}.

2.3. Les campagnes de terrain

2.3.1. Échantillons sédimentaires

Des échantillons sédimentaires provenant des plages de Paspébiac et de Saint-Siméon ont été collectés en 2006.

2.3.1.1. Traitement

Voir paragraphe « 2.2.6.1. Traitement ».

2.3.1.2. Exemple de donnée

Voir Figure 13.

2.3.1.3. Période et lieux de relevé.

Une collecte de 63 échantillons de données a été effectuée entre le 26 et 29 juin 2006.

2.3.2. Mesures de réflectance hyperspectrale

2.3.2.1. Principes

Voir paragraphe « 2.2.3.1. Principe ».

2.3.2.2. Paramètres d'erreur

Voir paragraphe « 2.2.3.2. Paramètres d'erreur ».

2.3.2.3. Exemple de données

Voir paragraphe « 2.2.3.4. Exemple de données ».

2.3.2.4. Période et lieux de relevés

Durant la période comprise entre le 30 juin et le 15 juillet 2007, 768 mesures ont été réalisées sur la plage de Paspébiac, 91 mesures sur celle de Bonaventure et 261 mesures dans l'embouchure de la Rivière Bonaventure. Enfin, 541 mesures ont été réalisées en laboratoire.

3. Description des sites d'études

3.1. Contexte géologique

La géologie de la baie des Chaleurs est principalement composée par deux séquences majeures d'âges géologiques distincts, soit les roches sédimentaires du Paléozoïque et les sédiments non consolidés du Quaternaire terminal et qui peuvent eux-même se diviser selon deux sous-ensembles, les sédiments de la phase régressive et ceux de la phase transgressive (Long, 2006).

Sur la côte sud de la Gaspésie, ce sont des roches datant du Paléozoïque et issues de l'orogenèse appalachienne qui constituent le socle (Long, 2006). Sur les sites d'études, localisés sur la rive nord de la baie de Chaleurs dans les localités de Saint-Siméon-Bonaventure et de Paspébiac, c'est la formation de Bonaventure qui affleure. Elle se compose de grès rouges fluviatiles et deltaïques d'environnement semi-aride (couleur rouge due aux oxydes de fer) qui date du Paléozoïque tardif ou supérieur (Permo-Carbonifère) et est formée par des roches à pendage sub-horizontal, constituées principalement de particules clastiques grossières de couleur rouge de type conglomérats, grès, sitlstones et mudstones.

Les dépôts du quaternaire mettent en évidence tous les mouvements eustatiques et tectoniques qui se sont produits pendant l'Holocène dans la baie des Chaleurs. Il en résulte deux faciès bien particuliers issus des phases de régression et transgression du niveau marin relatif (Long, 2006).

Les faciès sédimentaires de régression correspondent à une phase de remontée glacioeustatique résultant de la fonte de la calotte glaciaire gaspésienne. Ils sont constitués au large par les parties distales des cônes deltaïques composés de sédiments fins. Durant cette période de rebond glacio-eustatique produisant une baisse relative du niveau marin, un cortège de sédiments prodeltaïques et deltaïques plus grossiers recouvrent les sédiments fins, comme sur le barachois de Paspébiac (Renaud, 1999). Finalement, ces dépôts sont partiellement érodés pendant la phase de bas niveau marin avec notamment l'apparition de vallées fluviatiles.

A la fin du rebond glacio-eustatique, la montée marine due à la transgression marine holocène est plus important que le rebond glacio-eusatique et entraîne la submersion des vallées fluviales dans un premier temps, puis des cônes prodeltaïques et des plaines fluviatiles adjacentes. Dès la submersion de ces derniers, l'action des houles érode les couches sédimentaires de surface, entraînant les sédiments fins et laissant sur place les plus grossiers. C'est ce type de faciès sédimentaire, sédiments grossiers, qui se retrouve entre le littoral et l'isobathe des –15 m (Long, 2006), et qui de par sa nature est très difficilement mobilisable par les courants. Ce faciès constitue la majorité des dépôts marins et participe donc très peu à la dynamique sédimentaire littorale actuelle.

Le système côtier actuel est un ensemble constitué d'unités mises en place pendant les phases de transgression et de régression marine sous forme de dépôts fluviaux glaciaires sur des affleurements de socle rocheux datant du Paléozoïque (Xhardé, 2007). Ces dépôts fluvio-glaciaires forment des talus à l'arrière des plages et sont extrêmes friables. Ils constituent ainsi des stocks sédimentaires qui alimentent, une fois érodés, les structures sédimentaires littorales, telles que les flèches sablo-graveleuses de Paspébiac et Carleton. Ces structures géomorphologiques sont typiques de la région de la baie des Chaleurs et sont désignées par le terme de « barachois ». Le barachois de Paspébiac est constituée par deux flèches gravelo-sableuses qui forment un triangle en direction du large. Au centre de ce triangle, une lagune peu profonde avec une salinité plus importante. Cette structure possède des ouvertures sur la mer qui sont très instables, entraînant des migrations ou des fermetures de longue période (Logimier, 1984). En effet, la passe du barachois de Paspébiac, située sur le bord est de la structure était ouverte lors de la campagne de terrain de l'été 2005. La passe s'est refermée lors d'une tempête hivernale en 2005. Depuis, elle demeure fermée, mais reste visible dans la structure.

Il existe le long du littoral de la côte nord de la baie des Chaleurs trois profils typiques de plages qui sont une fonction de leurs environnements immédiats. Il y a les profils des plages d'environnements sableux, les profils des plages adossés à un talus fluvio-glaciaire et enfin les profils associés aux cônes de débordement (Long, 2006). Les arrière-plages, lorsqu'elles existent, sont constituées de silts, sables et graviers d'origine fluvio-glaciaires ou par des cordons de sables et galets. En outre, aucun système de dunes sableuses n'est présent sur les arrière-plages. Les plages sont étroites, sauf aux endroits où l'accumulation sédimentaire est suffisante tels les flèches sableuses. Elles sont constituées d'un mélange de sables et de galets qui drape une base de galets. Cette avant-plages sont constituées par une accumulation de sables et de galets transportés par les courants de dérive littorale et provenant de la surface de remaniement mise en place lors de phase de transgression marine. Cette accumulation est de faible épaisseur et est plaquée sur le substratum rocheux.

En outre, l'apport de sédiment fluviatile actuel est négligeable dans la baie des Chaleurs et ne permet pas de nourrir les différentes structures sédimentaires existantes le long de ce littoral (Xhardé, 2007).

Dans des zones de faible à moyenne énergie telle que Saint-Siméon-Bonaventure (Long, 2006), l'avant-plage est colonisée par des pelouses de zostères près de la côte et par des champs de laminaires plus au large. Le type de végétation est directement lié à la nature du fond. Ainsi, les pelouses de zostères se développent sur des sédiments sableux et graveleux et les laminaires sont directement fixées sur la substratum rocheux ou bien sur un faciès très grossier (galets, blocs). Les zones végétées bloquent les processus de transport sédimentaire et produisent ainsi des zones d'accumulations. En outre, la profondeur moyenne à laquelle apparaît la végétation est un indicateur d'énergie. A Paspébiac, milieu de haute énergie, les avant-plages du barachois ne présentent aucune végétation et sont uniquement constituées d'un cortège sédimentaire sableux.

3.2. Contexte hydrographique

La baie des Chaleurs est le quatrième estuaire en importance de l'est du Canada (Syvitski, 1992) après ceux du Saint-Laurent, de la baie de Fundy et de l'inlet Hamilton (Xhardé, 2007). Sa longueur est de 180 km et la plus grande largeur est de 38 km. Cet estuaire, de type partiellement mélangé, a une superficie totale de 5970 km² (Long, 2006). L'ouverture vers l'est de la baie expose sa partie orientale aux houles en provenance du golfe du Saint-Laurent alors que sa partie occidentale est plus influencée par des houles locales. La bathymétrie de la baie augmente d'ouest en est pour atteindre 135 m à son extrémité (Renaud, 1999).

3.2.1. Les marées

Des marégraphes existaient dans la Baie des Chaleurs et ont permis d'établir un model de propagation de la marée. C'est à partir de ce modèle que les tables des marées et courants de la Baie des Chaleurs, publiés par Pêche et Océans Canada, ont été réalisées. Aujourd'hui, se sont ces tables qui font références pour la mesure des marées dans cette zone. Le port de Pointe-Saint-Pierre est utilisé comme référence pour les tables de la baie des Chaleurs. Ce port est situé à proximité de la localité de Percé à l'extérieur de la baie. Les marées dans la baie de Chaleurs sont de type mixtes semi-diurnes. Elles subissent un effet d'amplification lorsqu'elles se propagent vers la partie occidentale de la baie. Ainsi, le marnage moyen observé au port de Pointe-Saint-Pierre est de 1.1 m et à Carleton de 1.9 m (Xhardé, 2007). Selon Syvitski, la côte nord de la baie des Chaleurs est soumise à des courant de flots plus importants que la rive sud. La situation inverse se produit pour les courants de jusant. Cette situation entraîne la formation d'une gyre cyclonique dans la baie.

Les marées génèrent des vitesses de courants moyens de 15 à 20 cm.s⁻¹. Ces dernières permettent le transport sédimentaire des sables. Cependant, il peut arriver que des vitesses plus importantes soient observées, de l'ordre de 40 cm.s⁻¹ voir 1 m.s⁻¹, au niveau des passes, mais cela reste très exceptionnel (Renaud, 1999).

3.2.2. Les houles

La partie est de la baie des Chaleurs et le golfe du Saint-Laurent, sont soumit au même régime de houle. Lors de tempête décennale, la hauteur significative des houles peut atteindre 2.1 mètres pour une période de 9 secondes. Des tempêtes tropicales exceptionnelles, localisées à l'entrée de la baie, peuvent provoquer des houles de 4.9 m de hauteur significative avec des périodes pouvant dépasser 9 secondes (Long, 2006). La morphologie de la baie des Chaleurs empêche la houle de se propager de façon directe. Cependant, elle peut tout de même atteindre le centre de la baie, jusqu'à Paspébiac, par des phénomènes de diffraction le long des côtes. Les tempêtes tropicales et extra-tropicales passant dans l'estuaire sont également responsables de phénomènes de surcotes. Elles atteignent en moyenne entre 0.6 et 0.9 mètres et exceptionnellement 1.3 mètres (Forbes et al., 2004).

La combinaison de l'action des houles lié au passage de dépressions au dessus du Golfe du Saint-Laurent, du Labrador, de la Nouvelle-Écosse et sud du Nouveau Brunswick, sont responsables de l'énergie du milieu et des types d'environnements résultants. Ainsi, le site de Paspébiac, beaucoup plus exposé est la zone de plus haute énergie. Etant donné que l'énergie du milieu décroît d'est en ouest, la zone est de Saint-Siméon-Bonaventure est de moyenne énergie alors que la zone ouest est de faible énergie (Long, 2006).

3.3. Contexte météorologique

3.3.1. Les vents

Les vents dominant proviennent du secteur ouest-nord-ouest avec une moyenne de 58% par année. En revanche, les vents de secteur est sud-est sont ceux qui sont les plus responsables dans l'érosion côtière (Long, 2006). Ces derniers soufflent en moyenne 14% de l'année. De tels vent sont capables de générer des vagues de 1.5 m de hauteur significative avec une période de 3 secondes. Pendant des épisodes de tempêtes, les vents peuvent produire des vagues de 2.5 m de hauteur significative et de 7 secondes de période. Ces vagues peuvent remanier les fonds jusqu'à des profondeurs de 5 mètres.

De la même manière que les houles, la mesure des vents provient d'une seule station localisée sur la côte nord de la baie de Chaleurs, à New-Carlisle. Or, cette localité est située entre les deux sites d'études, respectivement à 10 km de Saint-Siméon-Bonaventure et 7 km de Paspébiac. Cette proximité permet d'utiliser les données avec confiance.

3.4. Contexte hydrographique

Seul le site de Saint-Siméon-Bonaventure subit dans sa partie est une influence directe de l'embouchure de la rivière Bonaventure. Selon les données de l'annuaire hydrologique du Québec, le débit maximum de la rivière Bonaventure est de 502 m³.s⁻¹. Son débit maximum journalier est de 487 m³.s⁻¹ et son débit d'étiage de 6.06 m³.s⁻¹. Enfin, la rivière Bonaventure a un module de 59.7 m³.s⁻¹ (Long, 2006). En période de jusant, le volume d'eau qui transite par le barachois double en raison de la migration du prisme de marée. L'ensemble de ces paramètres conduit à la mise en place d'un vaste delta de jusant sableux (Long, 2006) à l'embouchure du barachois de Bonaventure.

Sur la zone de Paspébiac, la rivière-Nouvelle, dont l'embouchure est située à l'ouest de la municipalité de Saint-Godefroi, joue probablement un rôle dans le bilan sédimentaire de la zone, mais son importance n'est pas estimée parce qu'il n'existe aucune mesure. Cependant son importance est beaucoup plus faible que la rivière Bonaventure. En outre, l'apport sédimentaire par les cours d'eau dans la baie des Chaleurs n'est pas bien connu à ce jour. Il est cependant estimé comme « non négligeable » dans le bilan sédimentaire côtier (Xhardé, 2007).

3.5. Description du site de Paspébiac

3.5.1. Géomorphologie côtière

Le site de Paspébiac s'étend de la localité de New-Carlisle à l'ouest jusqu'à la pointe Trachy située dans la localité de Saint-Godefroi à l'est. La zone couverte a une dimension de 23 km de long sur environ 2.5 km de large.

Ce site est constitué pour sa plus grande partie de falaises de grès rouges appartenant à la

formation de Bonaventure. Elles peuvent avoir des hauteurs allant du mètre dans la région de la plage à Norbert à une vingtaine de mètres au niveau de la pointe Huntingdon.

Cet ensemble de falaises est interrompu à l'ouest par le barachois de Paspébiac, situé dans la localité du même nom, et à l'est par un petit marais intertidal situé à l'ouest de la communauté de Saint-Godefroi. Le barachois est bordé de part et d'autre par des talus de sédiments composés majoritairement de sables et de graviers (Xhardé, 2007).

Le barachois de Paspébiac est formé par deux flèches sableuses, d'environ 1400 m (flèche ouest) et 1800 m (flèche est) de long chacune, qui se rejoignent en mer, pour former une structure triangulaire. Cette double flèche sableuse, constituée de sables grossiers et de graviers, prograde sur une base de sédiments fins. Au centre de cette structure triangulaire, une lagune n'ayant aucun apport d'eau douce prend place. La morphologie du barachois est entièrement contrôlée par la dynamique côtière, étant donnée l'absence d'apport fluviatile. La pointe du barachois est terminée par une flèche sableuse sous-marine d'environ 100 mètres qui s'étire vers le sud sud-ouest. La taille et la direction de cette flèche sableuse sont extrêmement variables d'une année sur l'autre. En effet, en 2000, la longueur de la flèche était estimée à 300 mètres et s'orientait en direction sud-ouest (Renaud, 1999).

Le transport sédimentaire dominant de direction est-ouest au niveau du barachois joue un rôle important dans sa dynamique globale. Ainsi, la flèche ouest, bien que stabilisée par diverses structures anthropiques (port de pêche, aire de jeu et camping) a progradé d'environ 1.1 m.an⁻¹ entre 1963 et 1992 (Xhardé, 2007). Quant à la flèche est, elle a migré de 4.16 m.an⁻¹ vers l'ouest à cause d'un manque d'apport sédimentaire (Renaud, 1999).

3.5.2. Les plages

Les plages sont absentes à l'avant des falaises de grès rouges. Des plages plus développées apparaissent à partir de la Plage à Norbert en direction de l'ouest ainsi qu'au niveau de l'embouchure du marais intertidal de Saint-Godefroi. Les plages qui bordent le barachois ont un profil typique de plage en milieu sableux (Long, 2006). Elles présentent un double ou triple système de bernes de tempêtes ainsi qu'un simple ou double système

de barres d'avant côte. Il y a également sur le barachois est des débordements de tempêtes, ainsi qu'une accumulation importante sur le haut de plage de plaques plates de grès rouge provenant de l'érosion des falaises. Plusieurs cordons sédimentaires de granulométrie différente sont visibles et se répartissent parallèlement au rivage. Il s'agit majoritairement de sable moyen avec une proportion variable de galets centimétriques ou décimétriques.

3.6. Description du site de Bonaventure

3.6.1. Géomorphologie côtière

Le site de Bonaventure s'étend de Caplan, à l'ouest, jusqu'à la pointe Bonaventure, à l'ouest de l'embouchure de la rivière Bonaventure sur une distance de 25 km de long et de 2.5 km de large. Au front de l'embouchure de la rivière Bonaventure, la largeur de la tranche d'eau mesurée est de 1500 m alors que vers Caplan elle n'est que de 500 m. D'ouest en est, le secteur est composé par des falaises de grès rouges et de silts de la formation de Bonaventure d'une hauteur moyenne de 12 m (Xhardé, 2007). Cet ensemble de falaises est suivi par des talus composés principalement de sables et de graviers non cohésifs. La hauteur de ces talus, diminue progressivement en allant vers l'est, s'arrêtent au niveau de l'embouchure de la rivière petite Bonaventure. Cette dernière est barrée par une flèche sableuse. Ainsi, les apports fluviatiles sont déviés vers l'est et nourrissent un barachois bien développé, dont le cordon littoral est mal défini et peu élevé.

Entre le marais situé entre Saint-Siméon-Bonaventure et l'embouchure de la rivière Bonaventure, s'étend un ensemble de talus fluvio-glaciaire dont la hauteur varie entre 1.5 et 3 mètres. Ces talus argileux, sont très sensibles à l'érosion côtière et de nombreux ouvrages de protection, tels que des empierrements ont été mis en place.

Entre les talus fluvio-glaciaires et des falaises de microgrès et conglomérats stratifiés à faible pendage au niveau de la pointe de Bonaventure, prend place l'embouchure de la Rivière Bonaventure. Elle est entravée par deux flèches gravelo-sableuses qui délimitent un marais estuarien d'une superficie de 1.8 km².

3.6.2. Les plages

La formation de Bonaventure est la source des sédiments qui alimentent les différentes plages du secteur. Ces plages sont constituées par des sables moyens à grossiers, graviers et galets. Les plages sont bien développées avec pour la plupart un haut de plage bien végétée à l'exception de celles situées à l'avant des falaises du secteur de Caplan. Ces dernières sont très étroites et dépourvues de haut de plage. Les plages montrent un système de berne de tempête, le plus souvent double. Cependant, il n'y a pas d'accumulation de débris grossiers (arbres, laminaires, rochers) sur les bernes de tempêtes et les hauts de plages comme à Paspébiac, montrant une différence d'hydrodynamisme du milieu.



4. Conception des outils d'analyses et d'interprétations des données analytiques.



4.1. Étude des données bathymétriques issues du SHOALS et comparaison des résultats obtenus avec des documents cartographiques antérieurs disponibles

Deux documents de nature hydrographique couvrant les zones de Paspébiac et Saint-Siméon-Bonaventure sont disponibles.

Le premier document est émis par le Service Hydrographique Canadien (SHC). C'est la carte hydrographique couvrant la zone de la Baie des Chaleurs du Golfe du Saint-Laurent.

La deuxième couverture bathymétrique provient d'un travail effectué par Long (2006) intitulé l'« Etude hydrodynamique, sédimentologique et biologique des sites de Maria, Saint-Siméon, Bonaventure, Newport et Cap-d'Espoir dans la Baie des Chaleurs, Québec, Canada ».

4.1.1. Carte hydrographique SHC (1979)

La carte 4486 couvre la zone de la Baie des Chaleurs. Elle est en projection Mercator à l'échelle 1 :150000. Le système de projection utilisé est le système de référence géodésique de l'Amérique du nord 1983 (NAD83) et qui correspond au système géodésique mondial de 1984 (WGS84).

Les profondeurs reportées sur la carte sont en brasses et pieds et sont réduites au zéro des cartes hydrographiques qui correspond à la marée normale la plus basse, laquelle est à Dalhousie au-dessous de 1.5 mètres par rapport au niveau moyen de l'eau.

Les profondeurs proviennent des levés effectuées par le service hydrographique du Canada jusqu'à 1979. La topographie provient des cartes du Système national de référence cartographique.



Figure 14. Carte hydrographique de la Baie de Chaleurs dans le Golfe du Saint-Laurent (Service Hydrographique du Canada). Le système de projection est en Latitude/Longitude et les bathymétries sont exprimées en brasses pieds. L'image est légèrement penchée du au géoréférencement.

4.1.2. Relevé bathymétrique Long (2006)

La carte bathymétrique est une synthèse d'un ensemble de relevés effectué avec deux systèmes de géophysique distincts : un appareil de sismique réflexion à très haute fréquence, le Seistec-IKB et un sonar à balayage latéral Mesotec.

Le Seistec-IKB est un sondeur de sédiments dédié à la cartographie de l'agencement vertical des différents faciès existant entre le toit du substratum rocheux et le fond. Le sonar à balayage latéral permet d'étudier la distribution superficielle des sédiments entre le littoral et une profondeur de 15 mètres.

L'utilisation simultanée de ces deux appareils a permis d'obtenir un ensemble de cartes portant sur la bathymétrie, la répartition et la nature sédimentaire du fond ainsi que la profondeur du toit du substratum rocheux. La carte bathymétrique est utilisée à des fins de comparaison des résultats obtenus avec le SHOALS par rapport à des systèmes conventionnels largement utilisés de nos jours, tels que le sonar ou le boomer.



Figure 15. Carte bathymétrique de la région de Saint-Siméon-Bonaventure. Les systèmes de projection sont en UTM zone 20. Les isobathes sont en mètres. Le chevauchement de la carte de Long (2006) sur la flèche ouest de l'embouchure de la rivière Bonaventure est une artéfact d'interpolation des données.

4.1.3. Méthode

Afin de comparer les isobathes provenant des différents documents, une source doit être considérée comme la référence. Les données du SHOALS vont donc être considérées comme référence.

La comparaison des isobathes se fait par superposition après avoir vectorisé chaque carte. Il s'agit donc dans un premier temps, d'homogénéiser les projections géographiques de chaque document afin qu'ils soient tous dans le même système latitude/longitude pour les données SHOALS, avec les bathymétries rapportées en mètres et référencées par rapport au niveau moyen de la mer. Ainsi, la carte du SHC (1979) nécessite une conversion des profondeurs brasses pieds en mètres et la carte bathymétrique de Long (2006) nécessite de transformer la projection UTM 20N en latitude/longitude. Les reprojections s'effectuent sous ENVI.

Il faut ensuite créer des couches vectorielles qui suivront les isobathes et enregistrer chaque isobathe dans un fichier différent.



Figure 16. Exemple d'isobathes vectorisées de la carte hydrographique du SHC (1979) et superposées sur la carte originale. Les profondeurs sont en pieds brasses avec leurs équivalences en mètres reportés à côté.

Une fois cette opération réalisée sur les deux cartes, toutes les isobathes sont comparées entre elles sur le modèle numérique de terrain établi à partir des données du SHOALS.

4.2. Développement de techniques de visualisation et d'analyse des données SHOALS

4.2.1. Description de la structure des données fournies par Optech

Les données provenant du survol sont de trois types ;

- les fichiers numériques contenant la position de chaque sondage laser au sol,
- les fichiers qui contiennent l'information concernant le signal retour laser sur les quatre canaux,
- ensemble de photographies numériques aériennes.

Le langage de programmation « Interactive Data Language (IDL) » a été utilisé pour développer les interfaces de visualisation et de traitement des données. Ce langage, orienté objet et basé sur la manipulation de matrice de grande taille, est particulièrement adapté pour la visualisation 2D, 3D et 4D d'ensemble de données.

IDL est utilisé avec un système d'exploitation Linux. Ce choix est motivé par les performances accrues d'IDL sous Linux par rapport à Windows Xp en lecture et écriture, accès aléatoire de fichier, ainsi que pour la puissance brute de calcul. Cela permet de limiter au maximum les temps de calcul.

4.2.1.1. Les fichiers de positionnements

Les fichiers sont au format standard ouvert LAS 1.1. Ce format est actuellement utilisé par tous les fabricants et utilisateurs de systèmes LiDAR. Cette norme permet de coder sur très peu d'espace (car en binaire) les informations de positionnement au sol de chaque sondage laser ainsi que leurs attributs associés. Le fait que la norme soit ouverte, permet une standardisation et donc un échange plus simple entre les différents organismes qui travaillent avec le LiDAR. En outre, travailler avec des fichiers en binaire permet de réduire la taille finale des fichiers, de les rendre confidentiels puisqu'ils ne peuvent pas être édités dans des éditeurs de textes classiques. Enfin, cela augmente la rapidité de traitement de l'information car il est plus rapide d'accéder séquentiellement à un fichier

binaire qu'à un fichier ASCII.

4.2.1.2. Les fichiers contenant les signaux laser

Pour des problèmes de propriété intellectuelle, il ne nous a pas été permis d'avoir accès aux fichiers originaux qu'Optech produit lors du post-traitement des données. Cependant, pour permettre au groupe FUDOTERAM de mener ses recherches, une version épurée des fichiers originaux nous a été donnée ainsi que la structure binaire correspondante. Ces fichiers binaires sont identifiés par l'extension inw et ne se rapprochent d'aucun standard existant. Il a donc été nécessaire de développer des algorithmes pour lire et visualiser ces données. Ils contiennent comme information l'intensité laser retrodiffusée par le sol et qui est enregistrée sur les quatre canaux suivant une résolution de 1 ns ainsi que le temps auquel est effectuée la mesure est également enregistré. Le temps est une référence commune à toutes les données produites et enregistrées par le SHOALS (le temps auquel est émit l'impulsion laser, les mouvements enregistrés par la centrale inertielle, les photographies aériennes)



Figure 17. Description de la structure des données utilisées. Les champs indiqués avec

une étoile sont les champs communs entre les deux fichiers. Cependant, il est nécessaire d'effectuer une conversion afin des les rendre homogènes. Les champs de l'en-tête ne contiennent que ceux nécessaires aux différents algorithmes développés ici.

4.2.1.3. Utilisation des fichiers de données

L'information du signal de retour laser étant dissociée de sa position géographique, il est nécessaire de lier les deux fichiers de façon dynamique. En effet, il n'est pas possible de lier de façon simple les deux fichiers parce qu'ils n'ont pas de champs en commun. La seule information qui permet de faire le lien est le temps auquel la mesure a été faite. Or, selon le fichier, l'expression du temps n'est pas la même. Ainsi, dans les fichiers Las, le temps est exprimé par un *float double* codé sur 64 bits qui représente le temps en secondes écoulées depuis le début de la semaine. Pour les fichiers inw, le temps est un *long non signé* également codé sur 64 bits et qui représente le nombre de microsecondes écoulées depuis le premier janvier 1970. Il est donc nécessaire d'effectuer une conversion pour homogénéiser ces deux paramètres et être ainsi capable de lier les deux fichiers.

Une limitation rencontrée durant le traitement des données est la gestion de la mémoire vive. Ce problème empêche l'utilisateur de charger tout un fichier en mémoire directement. La procédure *ASSOC* d'IDL permet de palier à cette limitation mais cela induit une programmation un peu plus complexe. En effet, cette procédure gère un pointeur, dont la position spécifiée permet d'obtenir l'information voulue dans le fichier. Ainsi, il est possible d'accéder à tout le fichier de façon aléatoire sans charger la mémoire vive. Mais cela nécessite de connaître la position du pointeur pour retrouver l'information désirée.

4.2.1.4. Linéarisation des données

Les impulsions de retour enregistrées sont compressées selon une échelle logarithmique afin que toute l'information soit contenue dans des valeurs comprises entre 0 et 255. Ainsi, pour travailler avec les données, il est nécessaire de décompresser les courbes. Ce processus est la linéarisation de l'impulsion. La procédure mathématique exacte ne peut être décrite dans cette thèse étant donné l'accord de non divulgation de cette information signé entre Optech et l'auteur. Cependant, un exemple est présenté ci-dessous afin de



constater l'importance de cette transformation sur les données initiales.

Figure 18. Exemple de linéarisation des données brutes du SHOALS. L'échelle de l'axe des ordonnées après linéarisation est masquée afin d'assurer une confidentialité absolue quand à la transformation (en accord avec Optech). La linéarisation permet de faire ressortir les pics du signal et de linéariser l'effet d'atténuation de la colonne d'eau.

4.2.2. SHOALS Viewer version Béta, un visualisateur de données sous IDL

4.2.2.1. Fonctions

Un visualisateur des données SHOALS a été développé et fourni par Optech suite à la demande du groupe de travail FUDOTERAM. Ce logiciel, Oliv, a été développé par Pan en 2006, alors membre du projet. Ce visualisateur permet de voir simultanément le nuage de points des sondages laser, le signal de retour associé et l'image aérienne qui contient le point. En outre, des informations telles que la position et la profondeur du point sont accessibles. Dans la présente étude, il est nécessaire de sélectionner un ensemble de points et d'en extraire les impulsions associées. Cette fonction n'existe pas en l'état actuel du développement d'Oliv. Ainsi, une interface propre au projet dédiée à la visualisation, la sélection et le traitement des données SHOALS a été développée.

Outre la visualisation en 2D des données, des outils de traitement, d'exportation et fusion avec d'autres sources de données ont été ajoutés.

Ce logiciel permet de subdiviser le jeu de données originales selon des zones tampons de forme circulaire centrées sur un point ou bien le long d'un profil. Le rayon et la distance par rapport au profil sont des paramètres ajustables par l'utilisateur. Des algorithmes de traitement pour qualifier la morphologie de l'impulsion ont été développés.



Figure 19. Interface utilisateur développée sous IDL pour la visualisation et la manipulation des données du SHOALS. Cette interface utilise l'objet SHOALSOBJECT développé spécialement pour ces recherches.

4.2.2.2. Trois concepts nécessaires à la manipulation des données du SHOALS

Trois concepts de bases sont indispensables à l'utilisation (extraction d'informations spécifiques) et à la manipulation (subdivision d'un ensemble de données selon des coordonnées) des données issues du SHOALS. Cette partie présente la stratégie développée et consacrée au liage dynamique des fichiers LAS et INW et aux stratégies utilisées pour créer des sous-ensembles de données. Deux types de sélection sont disponibles : linéaire et circulaire.

i. Association dynamique des fichiers LAS et INW

Travailler avec les données SHOALS implique une utilisation conjointe des fichiers LAS et INW. En effet, en fonction de l'information voulue ou calculée, il est nécessaire de lire dans le fichier LAS ou INW et de connaître de façon dynamique la position des données à l'intérieur des fichiers. La Figure 20 présente la relation qui existe entre les différents fichiers. La fenêtre principale du visualisateur présente un ensemble de données dont l'échelle de couleur se réfère à l'appartenance de la ligne de vol. Une couleur par ligne de vol. L'ensemble des coordonnées des points affichés est contenu dans le fichier de positionnement LAS. L'information des signaux de retour présentée en dessous de la fenêtre principale est contenue dans l'ensemble des fichiers INW. Il y a un fichier INW par ligne de vol. Il faut donc être capable de trouver pour un enregistrement contenu dans le fichier de positionnement, l'enregistrement équivalent contenu dans l'ensemble des fichiers INW. Le seul lien direct qui existe entre un enregistrement LAS et INW est le temps (voir « 4.2.1.3. Utilisation des fichiers de données »). Ainsi pour lier les données entre elles, il faut dans un premier temps établir le lien temporel entre les deux temps d'horodateurs, puis trouver à quelle ligne de vol appartient l'enregistrement et enfin aller dans le fichier INW correspondant et trouver la position exacte de l'enregistrement à l'intérieur du fichier.



Relevé SHOALS-3000T

Figure 20. Schéma décrivant le lien existant entre les différents types de fichiers. Pour un fichier LAS il existe plusieurs fichiers INW. Chacun de ces derniers représente une ligne de vol. Le développement consiste à retrouver le plus rapidement possible pour un enregistrement contenu dans le fichier LAS, l'enregistrement correspondant dans l'ensemble des fichiers INW.

Le fichier LAS contient l'ensemble des points d'un relevé qui ont été considérés comme bon par le contrôle qualité du post-traitement de données. Ainsi, sur l'ensemble du relevé, un certain pourcentage de points est exclu car le signal de retour enregistré ne permet pas de déterminer la position du réflecteur du fond nécessaire au calcul de la bathymétrie. Cela constitue les limites du nuage de points ou les trous dans ce dernier. Cependant, la position des « mauvais » points sont enlevés du fichier LAS, l'enregistrement du signal est conservé dans le fichier INW. Ainsi, les fichiers INW contiennent un nombre important de données orphelines qui ne possèdent aucun positionnement géographique. Ceci signifie que :

$$Data_{m} \leq \sum_{j=1}^{k} Data_{n_{j}}$$
(3)

où $Data_m$ est le nombre de points contenus dans le fichier LAS, $Data_m$ le nombre de données contenues dans le fichier INW de la i-ème ligne de vol et k le nombre de ligne de vol effectuées.

Or, pour quelle raison ces informations orphelines sont-elles conservées au sein des fichiers INW ?

L'enregistrement des signaux de retour dans les fichiers INW se fait de façon séquentielle et continue dans le temps. En d'autres termes, chaque point d'une ligne de vol est enregistré selon son ordre d'émission au niveau de la source laser. Cette subtilité permet de retrouver instantanément un enregistrement au sein d'un fichier.

En effet, un enregistrement LAS contient deux informations pour caractériser un point, le temps GPS associé à l'impulsion laser et le numéro de la ligne de vol auquel appartient ce point. Cette dernière information est située dans le champ « source ».

En outre, pour une ligne de vol (fichier INW), trois informations sont disponibles dans l'en-tête du fichier; le temps du premier enregistrement, le temps du dernier enregistrement et le nombre de points contenu dans le fichier.

Par la suite, une simple règle de trois permet de connaître la position exacte de l'enregistrement recherché. La formule suivante permet déterminer cette position :

Position
$$\sum_{Data s} = \left(\frac{time^{-timestamp} start}{timestamp start}\right) \times n_{records}$$
(4)

où *Position* _{Data s} est l'index de la position de l'enregistrement recherché. *time* le temps GPS provenant du fichier LAS converti en temps UNIX, *timestamp* _{start} et *timestamp* _{stop} respectivement le temps du premier et du dernier enregistrement du fichier INW et $n_{records}$ le nombre d'enregistrements contenus dans le fichier INW.

Comme c'est un index qui est cherché, il faut arrondir le résultat à la valeur supérieure avec la fonction *CEIL*. Il faut ensuite effectuer un contrôle qualité du résultat obtenue. En effet, cette méthode ne tombe pas sur l'enregistrement juste, mais autour de l'enregistrement recherché. Typiquement, le résultat obtenu est de 1 à 2 positions près de l'enregistrement effectivement recherché.

Pour cela, il faut dans un premier temps récupérer le *timestamp* correspondant à l'index trouvé précédemment. Puis faire la différence mathématique entre le *timestamp* trouvé et celui obtenue par la conversion du temps GPS.

$$\Delta_{timestamp} = timestamp \qquad -time \qquad (5)$$

où $\Delta_{timestamp}$ est la différence mathématique des deux temps, $timestamp_{Position}$ le *timestamp* correspondant à l'index trouvé et *time* le temps GPS converti au format Unix. $\Delta_{timestamp}$ peut être soit nul, dans ce cas-là le résultat est juste. Si la différence est non nulle, il faut trouver le décalage afin de s'aligner sur le bon enregistrement.

$$Offset = \frac{\left(time - timestamp_{Position_{Data_x}}\right)}{333}$$
(6)

où *Offset* est le décalage en terme d'index. La valeur 333 est le temps en microsecondes qui sépare deux enregistrements successifs. Ainsi le résultat recherché est :

$$Position = Position + Offset$$
(7)



Figure 21. Relation et détermination de la position d'un enregistrement dans un fichier INW à partir d'un enregistrement contenue dans un fichier LAS.

ii. Subdivision des données selon des coordonnées géographiques (point, profil)

La subdivision des données LiDAR selon des coordonnées géographiques nécessite de faire appel à des notions de géométrie vectorielle dans un espace en deux dimensions. Deux principes sont présentés ci-dessous. Il s'agit d'extraire l'ensemble des points d'un fichier LAS contenu dans une zone définie soit par un profil soit par un point.

Sur les Figure 22 et Figure 23, soit les points A, B, P et P' défini par les coordonnées :

$$A\begin{pmatrix} x_{A} \\ y_{A} \end{pmatrix}, B\begin{pmatrix} x_{B} \\ y_{B} \end{pmatrix}, P\begin{pmatrix} x_{P} \\ y_{P} \end{pmatrix}$$
 et $P\begin{pmatrix} x_{P} \\ y_{P} \end{pmatrix}$

où P' est la projection orthogonale de P sur le vecteur \overline{AB} (Figure 22). Les points A, B et P ont des coordonnées connues alors que celles du point P' ne le sont pas.

Les vecteurs \overrightarrow{AB} et \overrightarrow{AP} sont définis par les coordonnées :

$$\overrightarrow{AB} \begin{pmatrix} x_B - x_A = X_{\overrightarrow{AB}} \\ y_B - y_A = Y_{\overrightarrow{AB}} \end{pmatrix}$$
(8)

$$\overrightarrow{AP}\begin{pmatrix} x_{P} - x_{A} = X_{\overrightarrow{AP}} \\ y_{P} - y_{A} = Y_{\overrightarrow{AP}} \end{pmatrix}$$
(9)

Les normes des vecteurs AB, AP et \overline{AP} 'sont définis respectivement par :

$$\left\|\overrightarrow{AB}\right\| = \sqrt{X\frac{2}{AB} + Y\frac{2}{AB}} \tag{10}$$

$$\left\|\overline{AP}\right\| = \sqrt{X\frac{2}{Ap} + Y\frac{2}{AP}} \tag{11}$$

$$\left\|\overrightarrow{AP}\right\| = \frac{\left|\overrightarrow{AP} \cdot \overrightarrow{AB}\right|}{\left\|\overrightarrow{AB}\right\|}$$
(12)

Enfin le cosinus de l'angle θ , défini par les vecteurs \overrightarrow{AB} et \overrightarrow{AP} , peut-être déterminé par :

$$\cos \theta = \frac{\overrightarrow{AB} \cdot \overrightarrow{AP}}{\left\| \overrightarrow{AB} \right\| \left\| \overrightarrow{AP} \right\|}$$
(13)

Subdivision vectorielle selon un vecteur



Figure 22. Description des bases de géométrie vectorielle utilisées pour extraire un ensemble de points LAS selon un profil. Soit AB le profil considéré et P un point quelconque du fichier LAS. La géométrie vectorielle permet de savoir si le point P est à l'intérieur de la zone délimitée par les pointillés.

Sur la Figure 22, sont recherchés tout les points du fichier (en bleu) qui sont situés à une distance inférieure ou égale à d de par et d'autre du vecteur (le profil) \overrightarrow{AB} . Ainsi les points sélectionnés seront ceux qui réalisent les conditions suivantes :

- Que la norme de $\overrightarrow{AP'}$ soit positive et plus petite ou égale à la norme de \overrightarrow{AB} , en d'autres termes, $\left\|\overrightarrow{AP'}\right\| \leq \left\|\overrightarrow{AB}\right\|$ et $\left\|\overrightarrow{AP'}\right\| \geq 0$
- Que l'angle θ soit : $0 \le \theta \le 90$ et $270 \le \theta \le 360$.

Subdivision vectorielle selon un point



Figure 23 Description des bases de géométrie vectorielle utilisées pour extraire un ensemble de points LAS autour d'un point. Soit un point A défini comme origine et P un point quelconque du fichier LAS. La géométrie vectorielle permet de savoir si le point P est à l'intérieur de la zone délimitée par les pointillés.

Sur la Figure 23, sont recherchés tout les points du fichier (en bleu) qui sont situés à une distance inférieure ou égale à d autour du point A. Ainsi les points sélectionnés seront ceux qui réalisent la condition suivante :

• Que la norme de \overrightarrow{AP} soit plus petite ou égale d c'est-à-dire que $\left\|\overrightarrow{AP}\right\| \leq d$.

4.2.2.3. Concept de programmation objet sous IDL

Les techniques de programmation traditionnelles font la distinction entre les routines écrites dans le langage de programmation et les données produites ou utilisées par ces dernières. La programmation orientée objet est un moyen de fusionner ces deux entités, les routines et les données, pour créer un objet.

Ce concept permet au programmeur de créer une couche d'abstraction permettant de construire des applications robustes à partir de groupes d'éléments réutilisables.

IDL possède nativement une quantité importante d'Objets qui sont de plusieurs natures. Ainsi, il existe des objets de visualisation 2D et 3D de données, de manipulation de fichiers, de manipulation des palettes de couleurs, de gestion des transparences dans les visualisation, etc.

Chaque objet, appelé classe, contient un ensemble de fonctions, appelées méthodes, qui permet de réaliser certaines tâches spécifiques à l'objet. Par exemple, un objet consacré à la création des axes d'un graphique ; IDLgrAxis, fournit une ensemble de méthodes qui sont destinées au paramétrage du style et des attributs des axes.

4.2.2.4. Description de la Classe SHOALSOBJECT et ses méthodes

Il n'existe aucun objet dédié à la manipulation et à la visualisation des données SHOALS. C'est pourquoi, une classe nommée SHOALSOBJECT est crée afin d'offrir à l'utilisateur un ensemble de méthodes courantes et indispensable à la manipulation, l'édition et à la visualisation des données du SHOALS.

Cette objet, ou classe, possède actuellement 13 méthodes qui peuvent être définies selon la nature d'opérations effectuées.

- Quatre méthodes d'initialisations : destinées à l'initialisation et création de l'objet, au chargement dans l'objet des données SHOALS, au changement des données chargées si cela est nécessaire, et la destruction de la classe.
- Quatre méthodes d'informations : offres la possibilité d'imprimer des informations sur les données chargées.
- Cinq méthodes de travail : consacrées à la visualisation, analyse du signal et à l'édition des données chargées dans l'objet. Ceci constitue le cœur de l'objet et représente une partie importante des recherches effectuées dans ce travail.

Avant toute utilisation de l'objet, il est nécessaire de l'initialiser. Pour cela, après compilation de l'objet SHOALSOBJECT__DEFINE, une seule instruction tapée dans l'invite de commande (signifiée par « *IDL Prompt* ») sous IDL est suffisante :

IDL_Prompt> Shoals_Obj = OBJ_NEW('SHOALSOBJECT' [, path='path_to_data'])

Avec Shoals_Obj le noms de l'objet défini pour la session courante. L'option *path* n'est pas obligatoire, si elle est mentionnée, alors *path_to_data* représente le chemin vers un fichier LAS. Elle est nécessaire lors du chargement des données. Une fois, l'objet initialisé, il est possible de l'invoquer à tout moment par ces différentes méthodes. Une description de la syntaxe d'appel de chaque méthode est présentée ci-dessous ainsi

que les différents opérations effectuées par la méthode.

i.1. SHOALSOBJECT::INIT

i. Les méthodes d'initialisations

Méthode d'initialisation de l'objet. Cette méthode est invoquée lors de la création de l'objet de façon indirecte par la déclaration :

IDL_Prompt> Shoals_Obj = OBJ_NEW('SHOALSOBJECT' [, path='path_to_data'])

Elle est également invoquée lors du changement de donnée chargée à l'intérieur de l'objet.

i.2. SHOALSOBJECT::LOAD_DATA

Cette méthode ne peut s'invoquer directement, c'est une méthode interne à l'objet et seul la méthode *SHOALSOBJECT ::INIT* peut l'appeler, selon :

IDL_Prompt> SELF->LOAD_DATA

Elle est exécutée par la procédure d'initialisation de l'objet. Elle demande à l'utilisateur d'introduire le chemin du fichier contenant les données du SHOALS avec lesquelles l'utilisateur veut travailler si cette information n'est pas déjà contenue dans l'option *path*
de la méthode d'initialisation. Le fichier initial doit être un fichier de positionnement LAS.

Les données d'Optech sont organisées selon un système bien précis. Il en est de même pour la nomenclature des fichiers. Ainsi, les données associées à une ligne de vol sont regroupées dans un seul dossier. Ce dernier contient divers sous-dossiers. Un dossier contient les informations des signaux laser, les fichiers INW. Un autre dossier contient les photographies aériennes.

Cette stricte organisation des données permet de retrouver tous les fichiers associés à un fichier LAS. Cette opération est donc effectuée parce que essentielle pour la suite. Les différents chemins, vers les fichiers INW, les photographies, etc. sont ensuite stockés dans l'objet.

Une opération d'indexage des fichiers INW est également réalisée. Cela permet pour chaque fichier de connaître le chemin du fichier, le temps de départ, le temps de fin, le nombre de données dans le fichier et enfin le décalage des données par rapport au début du fichier.

Par la suite, l'en-tête et les données du fichier LAS sont chargées dans l'objet. Les informations retenues sont la position géographique de chaque point ainsi que son élévation, la ligne de vol à laquelle il appartient et enfin son temps GPS d'enregistrement. Un vecteur contenant la conversion des temps LAS en temps INW est calculé et chargé dans l'objet.

A cette étape, l'objet se met en mode veille et attend que une de ces méthodes soit invoquée.

i.3. SHOALSOBJECT:: CHANGE

Cette méthode est dédiée au changement de données chargées dans l'objet. Elle est appelée par le code suivant :

IDL_Prompt> Shoals_Obj ->CHANGE

Une fois invoquée, elle exécute deux méthodes internes à l'objet qui sont dans l'ordre : *SHOALSOBJECT ::CLEANUP* et *SHOALSOBJECT ::INIT*.

i.4. SHOALSOBJECT::CLEANUP

Cette méthode détruit tout les objets, structures, pointeur et données contenus à l'intérieur de l'objet. Une fois l'objet nettoyé de toutes ces données, il est lui-même détruit. La méthode *CLEANUP* est invoquée de la même manière qu'*INIT* :

IDL Prompt> SELF->CLEANUP

ii. Les méthodes d'informations

ii.1. SHOALSOBJECT::HELP

Cette méthode permet d'imprimer les informations relatives à l'objets. Cela permet, par exemple, de connaître quel sont les données chargées, nature et dimension. Cette méthode s'invoque de la façon suivante :

IDL_Prompt> Shoals_Obj ->HELP

ii.2. SHOALSOBJECT::GETPROPERTY

Cette méthode permet d'obtenir les données contenues à l'intérieur de l'objet. En effet, toutes données chargées dans un objet ne peuvent être directement accessible de l'extérieur. Il est donc nécessaire de développer une méthode qui permet d'accéder aux informations en vue de manipulations ultérieure. L'ensemble des données peut être récupérée, mais pour cela, il faut utiliser des mots clefs afin d'indiquer à la méthode quelles données est effectivement désirée. Il y donc un ensemble de mots clefs pour cette procédure dont la syntaxe est la suivante. :

IDL_Prompt> Data = Shoals_Obj -> GETPROPERTY(/Keyword)

Une fois les données récupérées, elles sont disponibles à partir de la variable *Data*. Les différents mots clefs (keyword) sont et permettent de récupérer les données suivantes :

/las_header :	l'en-tête du fichier LAS,											
/las_data :	les données brutes contenus dans le fichier LAS,											
/focus_las_data :	données d'un enregistrement contenu dans le fichier LAS,											
/inw_header :	l'en-tête d'un fichier INW dont le chemin est spécifié,											
/inw_data :	données d'un enregistrement d'un fichier INW spécifié,											
/las_xyz :	les coordonnées X, Y, Z contenus dans le fichier LAS,											
/boundary :	les limites du rectangle contenant les points LAS,											
/four_points :	les 4 points important de la donnée SHOALS,											
/eleven_para :	les 11 paramètres morpho-statistique de la donnée											
	SHOALS.											

ii.3. SHOALSOBJECT::FLIGHT INFO

Méthode affichant dans la sortie courante les numéros des lignes de vol disponibles. Cette dernière est invoquée par :

IDL Prompt> Shoals_Obj ->HELP

ii.4. SHOALSOBJECT::REPORT

Cette méthode créer un rapport qui est enregistré dans un fichier au format ASCII et qui contient : l'en-tête du fichier LAS au format ASCII suivie par, le numéro de la ligne de vol, le chemin du fichier contenant la ligne de vol, le temps de départ, le temps de d'arrivé, le nombre de points contenus dans ce fichier. Cette méthode s'invoque par :

IDL_Prompt> Shoals_Obj ->REPORT, 'path_to_report'

Avec 'path to report' le chemin de sortie du fichier ASCII.

iii. Les méthodes de travail

iii.1. SHOALSOBJECT::PLOT

Cette méthode permet de visualiser les données LAS dans un espace géographique en 2D. Elle utilise des procédures développées sous IDL et est destinée à la représentation vectorielle dans un espace géographique. L'espace géographiques est défini par la procédure *MAP_SET* et nécessite les limites géographiques de la zone couverte par les points LAS. Cette dernière information peut-être récupérée grâce à la méthode *GETPROPERTY*. L'affiche du nuage de points se fait par la procédure *PLOTS*.

Deux images sont générées avec cette méthode, la première contient une échelle de couleur basée sur l'élévation des points, et la deuxième l'appartenance à une ligne de vol. Ces représentations sont discrètes comme le montre la Figure 19. Cette méthode s'invoque par :

IDL_Prompt> Shoals_Obj ->PLOT [, n]

Le paramètre optionnel *n* peut-être un scalaire ou un vecteur. Il représente les numéros des lignes de vol qui doivent être présentées. Si aucun numéro n'est précisé, c'est alors l'ensemble des lignes qui sont dessinées.

iii.2. SHOALSOBJECT::WAVEFORM

Cette méthode permet de localiser pour un enregistrement du fichier LAS dans quel fichier INW se trouve la correspondance mais également la position de cet enregistrement au sein du fichier INW. Une fois l'enregistrement retrouvé, il est stocké dans l'objet et pourra être récupéré par la méthode *GETPROPERTY(/inw_data)*. La méthode s'invoque selon la ligne de code suivant :

IDL_Prompt> Shoals_Obj ->WAVEFORM, x_coord, y_coord

Les paramètres x_coord et y_coord sont les coordonnées géographiques du point étudié. La méthode recherche le point de levé SHOALS le plus proche.

iii.3. SHOALSOBJECT::WAVEFORM ANALYSIS

Méthode destinée à l'analyse du signal de retour pour retrouver les quatre points de la courbe (voir paragraphe « 4.2.3. Description d'un signal de retour typique ») et au calcul des 11 paramètres morpho-statistiques (voir « 4.2.5.2. Analyse de la morphologie du signal du fond »). Les 4 points ainsi que les 11 paramètres statistiques sont stockés dans l'objet et peuvent être récupérés respectivement grâce aux méthodes

GETPROPERTY(/four_points) et *GETPROPERTY(/eleven_para)*. Cette méthode s'invoque par :

IDL_Prompt> Shoals_Obj ->WAVEFORM_ANALYSIS

iii.4. SHOALSOBJECT::BUFFER

Cette méthode permet de subdiviser un ensemble de points, en l'occurrence les points contenus dans le fichier LAS selon une zone tampon rectangulaire définie par une vecteur dans un espace 2D. La taille de la zone tampon est défini par l'utilisateur et doit être en mètres ou en degrés décimal en fonction du système de projection définit pour les données (UTM, Lat/Long). La méthode s'invoque selon :

IDL_Prompt> Buffer = Shoals_Obj ->BUFFER, x_a, y_a, x_b, y_b, d

ou *Buffer* est la variable contenant les coordonnées géographiques de l'ensemble des points contenus dans la zone tampon. Les paramètres x_a , y_a , x_b , y_b et d sont respectivement les longitudes et latitudes du point initial et terminal du vecteur \overrightarrow{AB} et d la distance latérale de la zone tampon.

iii.5. SHOALSOBJECT::ROUND_BUFFER

Méthode identique à la précédente mais ici la zone tampon est un cercle de rayon d est centré sur le point considéré. La méthode s'invoque selon :

IDL Prompt> Round_Buffer = Shoals_Obj ->ROUND_BUFFER, x, y, d

ou Round_Buffer est la variable contenant les coordonnées géographiques de l'ensemble des points contenus dans la zone tampon. Les paramètres x, y et d sont respectivement la longitude et latitude du point et d le rayon de la zone tampon.

4.2.3. Description d'un signal de retour typique

Le signal de retour est l'information de base du SHOALS et de notre système de classification. Il est donc nécessaire de le comprendre et de préciser les informations recherchées dans le signal.

D'un point de vue théorique, un signal est composé de trois parties bien distinctes (Figure 24).

- Le retour de surface (n°1 de la figure). C'est l'énergie rétro diffusée par la surface du plan d'eau. Cette dernière est très sensible aux vagues et au vent. L'amplitude est corrélée de façon importante avec l'angle des vagues (Guenther and Mesick, 1988, Guenther, 2001) et peut donc varier de façon importante d'une impulsion à un l'autre pendant un même relevé. La position de ce point est déterminé comme étant à la demie amplitude du retour de surface.
- Le volume de rétro-diffusion de la colonne d'eau (courbe rouge de la figure).
 C'est toute l'énergie renvoyée par les phénomènes de rétro-diffusions des particules de la colonne d'eau.
- Le retour du fond (n°4 de la figure), correspond à l'énergie renvoyée par le fond.
 Il est localisé à la demie amplitude du retour de fond.
- Deux autres points (n°2 et n°3 de la figure) également critiques sont ceux du début et de fin de la colonne d'eau. Pour localiser ces deux points, les inflexions située juste après le retour de surface et juste avant le retour du fond sont recherchées. Il arrive fréquemment que le début de la colonne d'eau soit positionné au niveau du maximum d'amplitude du pic de retour de surface en l'absence de point d'inflexion évident.



Figure 24. Description d'un signal de retour du canal profond enregistré par le SHOALS. La courbe en pointillés bleue représente le signal linéarisé. L'air en rouge est le volume de rétro-diffusion (détails dans le texte). En outre, les quatre points recherchés sont également positionnés. 1 : surface de l'eau, 2 : début de la colonne d'eau, 3 : fin de la colonne d'eau, 4 : fond marin. (d'après Guenther, 2001). Les valeurs sur l'axe des ordonnées ont été masquées en accord avec Optech (voir 4.2.1.4. Linéarisation des données)

Le signal présenté (Figure 24) est un signal idéal ou les deux retours ne sont pas confondus avec le volume de rétro-diffusion et donc sont bien distincts et visibles. Malheureusement, cela n'est pas toujours le cas, ce qui pose un problème majeur. En effet, étant donné le nombre important de points, plusieurs millions, il est nécessaire de développer des algorithmes de traitement automatique du signal afin de générer des cartes. Or la grande variabilité du signal est le facteur limitant pour ces algorithmes. Il est donc nécessaire de développer une méthode intégrant différentes approches d'analyse mathématique pour contraindre au mieux le signal.

4.2.4. Analyse automatique du signal de retour, stratégies et limitations

Les algorithmes développés pour localiser les quatre points fonctionnent en deux temps. D'abord, ils déterminent le type de signal rencontré, puis trouvent les quatre points de la courbe, si cela est possible. Il arrive parfois que cette recherche n'aboutisse pas. Dans ce cas précis, le point n'est pas utilisé. Avant toute recherche, le signal brut est amplifié puis filtré de ces haute fréquences pour enlever le bruit parasite du système. La filtration peut être fait soit en utilisant un filtre moyen glissant avec un noyau de 3 ou 5 ou bien un avec une transformation de Fourier de type FFT (Fast Fourier Transform) en filtrant les hautes

fréquences. La première méthode est privilégiée en raison de sa vitesse d'exécution par rapport à la FFT. En plus de la filtration des hautes fréquences, un seuil bas est appliqué à la courbe afin de borner le signal et d'enlever le bruit du système.

4.2.4.1. Détection du retour de surface

L'amplitude du retour de surface ne correspond pas toujours à la plus grande valeur de la courbe. En effet, dans certaine situations, et plus particulièrement dans les environnements peu profonds près des côtes, les amplitudes s'inverses. Ainsi, la stratégie consistant à rechercher le maximum d'amplitude dans le signal n'est donc plus possible. L'approche utilisée consiste alors à encadre la recherche et la limiter aux 70 premières valeurs. Une fois cette valeur trouvée, il faut déterminer sa moitié et la localiser sur le début du signal.

4.2.4.2. Détection du retour du fond

Dans le cas de la situation précédemment décrite, les amplitudes inversées, la recherche de ce point est simple puisqu'elle consiste à trouver le maximum de la courbe.

Si la situation est classique comme pour un signal idéal, il est nécessaire de rechercher les maximums locaux de la courbe. Pour cela, cette dernière est divisée en sous parties de 50 valeurs consécutives en utilisant les 250 premières valeurs. Dans chacun de ces ensembles, les minimums et maximums sont recherchés ainsi que leurs positions selon l'axe des abscisses. L'ensemble des maximums est comparé afin de trouver le plus important qui est entouré de deux maximums plus petits.

Une autre approche basée sur les dérivées premières et secondes de la courbe est conjointement effectuée pour augmenter la performance de la recherche. Cette approche consiste à rechercher sur les dérivées, les points d'inflexions et donc les bosses et creux de la courbe originale.

4.2.4.3. Détection du début et de la fin de la colonne d'eau

Cette recherche utilise uniquement la méthode des dérivées. Elle consiste à rechercher les zéros dans la dérivée première et de combiner ces résultats avec ceux des minima locaux.

C'est une des recherches les plus difficiles étant donné que la courbe d'atténuation de la colonne d'eau est très bruitée.

4.2.4.4. Définitions des limites pour encadrer la recherche

Afin d'obtenir des résultats de qualité, des conditions limites à l'algorithme doivent être déterminées. En outre, un système de vérification des résultats est également nécessaire. Les conditions limites sont :

- Le retour de surface, doit être positionné dans les 70 premières valeurs de la courbe.
- Aucunes valeurs ne peuvent dépasser la valeur maximale imposée par l'application du filtre seuil.
- Que les positions (selon l'axe des abscisses) des quatre points trouvés doivent avoir des valeurs croissantes (X_{point 1} < X_{point 2} < X_{point 3} < X_{point 4}).
- Que les points 3 et 4 soient séparés d'au moins 3 valeurs. De même que le point 4 et la limite du signal étudié soient séparés d'au moins 3 valeurs.

4.2.4.5. Limitations

Le contrôle de qualité des résultats montre, que dans environs 1 % des cas, l'algorithme n'arrive pas à retrouver les quatre points. Deux configurations sont alors possibles. :

L'algorithme produit des valeurs incorrectes. Dans cette situation, quatre valeurs par défaut sont assignées afin que les algorithmes destinés à la classification ne produisent pas d'erreurs lors de son exécution. Si le pourcentage total d'échec est inférieur à 1 %, ce qui est généralement le cas, les points ayant posés des problèmes sont effacés. Si le taux d'échec est supérieur à 1%, ils sont conservés avec leurs valeurs par défaut et sont facilement identifiables par la suite parce qu'ils constituent une classe de valeurs bien définie.

L'algorithme ne fonctionne pas mais donne des valeurs cohérentes. Le traitement de chaque signal est fait de façon aveugle, sans aucun contrôle visuel de la part de l'opérateur. Il est donc impossible de savoir dans quelle mesure l'algorithme fonctionne

sans problème, d'ou l'implémentation de contrôle de qualité. Néanmoins, la morphologie de certain type d'impulsion fait échouer l'algorithme. Or, cette erreur qui est systématique pour un type de courbe, même si c'est une erreur, peut être considéré comme un résultat à part entière si elle est homogène pour l'ensemble des données.

4.2.5. Analyse du signal de retour dans le but d'effectuer une classification sédimentaire du fond marin.

Comme il a été précisé précédemment, il s'agit de tenter de caractériser la nature des sédiments des fonds marins en se basant uniquement sur les informations issues des impulsions de retour. Il est supposé que la forme et l'amplitude du pic de fond sont une fonction directe de la clarté de la colonne d'eau, de la nature sédimentaire du fond et de la présence ou non d'algues. Grâce à ce principe, il doit être possible de créer des cartes de types sédimentaires en se basant uniquement sur l'information contenue dans les signaux de retour laser.

Deux approches pour tester cette thèse ont été choisies, la mixture gaussienne et l'analyse morphologique du signal du fond. La première approche modélise le signal du fond alors que la deuxième approche extrait directement le signal du fond et le caractérise morphologiquement.

Les résultats de chaque méthode seront comparés et fusionnés avec d'autres modèles d'analyses pour produire un modèle sédimentaire global des zones étudiées.

4.2.5.1. Analyse par mixture gaussienne.

i. Théorie

L'analyse d'un signal par une mixture gaussienne consiste à supposer que le signal original est le résultat de la somme d'un nombre n de courbes de Gauss, dans laquelle le nombre n est connu à priori. Chaque courbe, appelée population, à des paramètres statistiques qui leurs sont propres, sa moyenne, son écart type et son poids dans le mélange. La moyenne correspond à la position centrale de la gaussienne sur l'abscisse ce qui correspond à une profondeur. La somme des poids de l'ensemble des populations est égale à 1.

La méthode d'analyse consiste à retrouver dans le mélange la gaussienne qui correspond au signal de fond et d'extraire ses paramètres statistiques. A partir des ces paramètres une images multi-bandes est générée. Dans cette image, chaque bande correspond à un paramètre.

ii. Fondement mathématique

L'algorithme mathématique utilisé pour ce modèle est l'algorithme d'Espérance Maximisation (souvent abrégé par EM). C'est un algorithme souvent utilisé pour la classification de données, en apprentissage machine, ou en vision artificielle. L'algorithme informatique utilisé provient de l'adaptation de la procédure *FitFunc* développé pour Matlab par Gal (2003) et qui est disponible librement sur internet. Cet algorithme consiste en une alternance de deux étapes :

L'Étape d'évaluation de l'espérance (E), qui consiste à calcule l'espérance de la vraisemblance en tenant compte des dernières variables observées ou définit au départ.

L'Étape de maximisation (M), qui consiste à estimer le maximum de vraisemblance des paramètres en maximisant la vraisemblance trouvée à l'étape précédente d'espérance, E. Par la suite, les paramètres déterminés à l'étape M sont utilisés comme point de départ pour une nouvelle phase d'évaluation de l'espérance, et ainsi une itération est effectuée jusqu'à ce que l'entropie de l'algorithme passe en dessous d'un seuil prédéfini.

ii. 1. Définition de base

- Soit g le nombre de population rechercher, typiquement 5 dans le cas présent.
- Le mélange est de type gaussien, ce qui signifie que chaque population suit une loi normale gaussienne de moyenne μ et d'écart-type σ^2 .
- Soit $\pi_1, \pi_2, \ldots, \pi_g$ les proportions de chaque population et qui vérifie $\sum_{j=1}^{s} \pi_j = 1$
- Chaque gaussienne a comme paramètres une moyenne et un écart-type pour chaque k-ième population (k=1, ..., g) qui sont notés respectivement μ_k et σ_k².

ii.2. Phase d'initialisation

Un ensemble de 5 populations de gaussiennes normales centrées en proportions égales est défini. Cinq est la valeur qui, a priori, produit le moins d'artefacts dans les résultats avec cette algorithme et pour ce type de signal. La somme des populations respecte la condition, $\sum_{j=1}^{s} \pi_j = 1$ avec les paramètres suivant :

 $(\pi_1, ..., \pi_g) = (1/g, ..., 1/g)$; $(\mu_1, ..., \mu_g) = (0, ..., 0)$; $(\sigma_1^2, ..., \sigma_g^2) = (1, ..., 1)$

ii.3. Phase d'itération

Cette phase consiste à répéter les étapes E et M jusqu'à ce que les paramètres de chaque population (μ_1 , ..., μ_g , σ_1^2 , ..., σ_g^2) convergent vers des valeurs dont la précision et le seuil sont définis par l'utilisateur.

L'Étape d'Espérance consiste à calculer la matrice $T^{=}(t_{ik})$ avec i=1,..., n et k=1, ..., g. Ceci revient à calculer les (n.g) quantités de t_{ik} à l'aide de la formule suivante :

$$t_{ik} = \frac{\pi_k \varphi_{\mu_k, \sigma_k^2}(x_i)}{\sum_{i=1}^s \pi_i \varphi_{\mu_i, \sigma_k^2}(x_i)}$$
(14)

où pour tout $\pi \in \Re$ et $\sigma_2 \in \Re^+$ avec la fonction $\varphi_{\mu,\sigma_2} : \Re \to \Re$ définie par :

$$\varphi_{\mu,\sigma^{2}}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^{2}}} e^{-\frac{1}{2\sigma^{2}}(x-\mu)^{2}}$$
(15)

La Phase de Maximisation consiste à actualiser les paramètres $\pi_1, ..., \pi_g, \mu_1, ..., \mu_g, \sigma_1^2, ..., \sigma_g^2$ de la façon suivante. Ci-dessous, afin d'alléger la notation, les quantités $n_1, ..., n_g$ sont définies par $n_k = \sum_{j=1}^n t_{ik}$. Ainsi pour k=1,..., g les trois paramètres deviennent :

$$\pi_k = \frac{n_k}{n} \tag{16}$$

$$\mu_{k} = \frac{1}{n_{k}} \sum_{i=1}^{n} t_{ik} x_{i}$$
(17)

$$\sigma_{k}^{2} = \frac{1}{n_{k}} \sum_{i=1}^{n} t_{ik} (x_{i} - \mu_{k})^{2}$$
(18)

La convergence étant atteinte, l'algorithme produit pour chaque courbe, un ensemble de 5 moyennes, écarts-types, proportions et nombres d'itérations. Il est ensuite nécessaire de trouver parmi ces 5 résultats lequel correspond à la gaussienne qui modélise le signal du fond. Par la suite, ses paramètres statistiques sont extraits et associés aux coordonnées géographiques du point afin de créer une image de chacun des paramètres.

iii. Exemple de résultats obtenus



Figure 25. Exemple de résultat de l'algorithme EM sur un signal de retour du canal profond du SHOALS. Pour la démonstration, un ensemble de 10 populations est recherché. Dans cet exemple, c'est la 7^{ième} gaussienne qui modélise le signal du fond. Les populations 8 à 10 sont des artéfacts de l'algorithme parce qu'en dehors du signal.



Figure 26. Exemple de résultat en 2D issu de la rasterisation de l'ensemble des points associé au paramètre proportion. Chaque faciès sédimentaire exprime des valeurs distinctes de proportion. Ces zones test serviront de base d'apprentissage pour l'algorithme de classification supervisée. Chaque zone a nécessitée 5 minutes de calcul environ pour une dimension moyenne de 500 mx300m (~150000 points).

iv. Problèmes rencontrés et limitations

Bien que les résultats obtenus soient extrêmement satisfaisants, il n'en demeure pas moins que l'algorithme est lourd en utilisation de ressources système et en temps de calcul. En effet, avant les phases E et M, il est impératif de transformer les données. Cette transformation nécessite de faire appel à des transpositions de matrice, opération gourmande en ressource matériel et temps de calcul. Le résultat de ce processus de transformation consiste en des matrices de 100 à 1000 fois plus importante en taille que l'originale, ajoutant encore de la lourdeur à la manipulation et au calcul matriciel.

Afin d'optimiser et d'alléger l'algorithme, les seuils de convergence et les précisions désirées ont été défini de tel sorte que la qualité du résultat soit assurée et que les temps de calculs nécessaires reste acceptables. L'application de cet algorithme à l'ensemble des zones d'études de Paspébiac et de Saint-Siméon et Bonaventure a nécessité 30 heures de calcul en continue sur 2 ordinateurs en simultané.

Outre le temps de calcul, une des limitations demeure au niveau des résultats obtenus par cette approche. En effet, les gaussiennes modélisées sont normales et donc symétriques par rapport à leurs moyennes. Or le signal du fond n'est pas toujours symétrique par rapport à son centre. Il devrait donc être possible et nécessaire de connaître le paramètre de symétrie du retour du fond.

C'est pour ces deux raisons, temps de calcul important et absence de coefficient de symétrie, qu'une deuxième approche a été développée.

4.2.5.2. Analyse de la morphologie du signal du fond

i. Théorie

Cette approche ne tente plus de modéliser le signal de retour du fond, mais bien de l'extraire et d'en étudier les différents paramètres morpho-statistiques préalablement définis. Différents type de paramètres sont ainsi calculés. Certains sont spécifiques au retour de fond proprement dit alors que d'autre sont calculés à partir de l'ensemble de la courbe. Enfin d'autres paramètres font appelles à l'ensemble des points du fichier.

Grâce aux quatre points retrouvés sur la courbe, on extrait le retour du fond qui correspond à l'ensemble des points comprit entre le point 3 et la limite imposée par le

seuil bas.

A partir du signal du fond, huit paramètres sont calculés. Les algorithmes nécessaires pour déterminer ces paramètres sont des procédures qui existent nativement dans IDL. Le fait d'utiliser des procédures intégrées, assure à l'utilisateur une optimisation du code et donc du temps de calcul final. Pour de plus amples informations sur les procédures d'IDL, se référer à l'aide en ligne d'IDL.

ii. Symétrie du signal

Ce paramètre permet de quantifier la symétrie du signal de fond par rapport à son maximum. La procédure d'IDL utilisée est *SKEWNESS*. Les valeurs obtenues peuvent être positives, nulles ou négatives. Une valeur positive signifie que le maximum du signal est dévié vers la droite. Une valeur positive signifie que le maximum de la distribution est déviée vers la gauche. Une valeur nulle représente une distribution symétrique.

iii. Aplatissement du signal

La procédure invoquée pour calculer l'aplatissement d'une courbe est *KURTOSIS*. La valeur de kurtosis indique le degré d'aplatissement de la courbe de fréquence statistique.

iv. Amplitude du signal

Ce paramètre détermine la distance verticale entre le volume rétro diffusé et le maximum du retour de fond. Pour cela, la droite passant par les points (2) et (3) doit être déterminée et prolongé jusqu'à la verticale du point (4). Il faut ensuite soustraire à la valeur en ordonnée du point (4) celle de la droite pour obtenir l'amplitude du signal de fond.

v. Longueur totale du signal

Cette longueur est calculée grâce à la procédure *CRVLENGTH*. Pour que cette procédure fonctionne correctement, il est impératif que la distance selon l'axe des abscisses entre les deux points soit supérieure à 3.

vi. Longueur du côté gauche du signal

La longueur du côté gauche du signal est identique au calcul de la longueur totale, mais se concentre sur le côté gauche du signal. Le côté gauche est borné par les points (3) et (4).

vii. Angle du côté gauche du signal

L'angle gauche correspond à l'angle que fait la droite passant par les points (3) et (4) et l'horizontale. En d'autres termes, c'est l'arc tangent du coefficient de la droite passant par les points précédemment définis.

viii. Longueur du côté droit du signal

La longueur du côté droit du signal est la longueur de la courbe calculée par la fonction *CRVLENGTH entre* l'intervalle comprit entre le point (4) et la limite du signal imposé par le seuil.

ix. Angle du côté droit du signal

L'angle droit correspond à l'angle que fait la droite, passant par les points (4) et la limite du signal imposé par le seuil, avec l'horizontale. Cette valeur correspond à l'arc tangent du coefficient de la droite passant par les points précédemment définis.

x. Analyse globale du signal

L'analyse globale du signal signifie l'étude du rapport d'amplitude du signal de retour de surface par rapport au retour du fond. En règle générale, ce rapport est inférieur à 1, mais dans certain cas comme en milieu très peu profond ou en présence de matériaux à forte réflectivité, le rapport s'inverse et les valeurs obtenues sont supérieures à l'unité. Cette inversion a été définie comme l'effet *flip-flops* par Guenther et Mesick (1988).

Étant donné que l'amplitude du signal de retour de surface est fortement dépendant de l'état de la surface de l'eau, aucunes informations fiables du fond peut être obtenues à partir de ce paramètre. En revanche, il fournit des informations qualitatifs tel que, la direction des houles ou l'état de la surface du plan d'eau.

xi. Analyse du nuage de points

Cette analyse faite appelle non plus à la courbe proprement dite mais plutôt aux informations contenues dans les fichiers de positionnement LAS. En effet, ici c'est la position des points et leurs élévations qui sont plus particulièrement utilisés.

xii. Densité des points

La densité des points est le nombre de points existant dans un cercle centré sur le point étudié ayant un diamètre de 10 mètres. Ce paramètre permet de repérer les trous dans le jeu de donnée finale. Trois ensemble de valeurs peuvent être définis.

- Les valeurs inférieure à 10 : la zone est considérée comme un trou.
- Les valeurs sont comprises entre 10 et 35 : la zone correspond à une zone de densité normale sur une ligne de balayage.
- Les valeurs sont supérieure à 35 : la zone correspond à une zone de recouvrement de deux ligne de vol.

xiii. Rugosité de la topographie

La rugosité correspond à la déviation standard ou l'écart-type de l'élévation de tous les points situés dans un cercle de 10 mètres de diamètre. Ce paramètre permet de localiser les ruptures de pentes et les faciès rugueux comme les champs de laminaires, les sédiments grossiers ou encore les affleurements de substratum rocheux.

xiv. Profondeur

La profondeur utilisée est celle fourni par Optech dans le fichier. Elle est cependant corrigé pour être rapporté au zéro hydrographique.

xiv. 1. Correction du zéro des fichiers LAS par rapport aux cartes hydrographiques.

a. Outil utilisé :

Les données LAS sont référencées par rapport au géoïde et non au niveau moyen de la mer comme sont les cartes du service hydrographique. Le zéro des cartes hydrographiques se réfèrent à un référentiel de marée. « Par convention international, le zéro des cartes est un plan fixé suffisamment bas pour que la marée lui soit rarement

inférieure. Le Service Hydrographique du Canada a adopté le niveau de la marée normale la plus basse (MNPB) comme zéro des cartes. » (Service hydrographique du Canada, 2003)

Afin de corriger les données LAS et les « rapporter » au zéro des cartes hydrogaphique, il a fallu dans un premier temps effectuer les corrections verticales entre le géoïde et le zéro hydrographique pour la zone considérée. Ceci est réalisable grâce à un outil, le logiciel *GPS*·*H*, gratuitement mise en ligne et téléchargeable par le Ministère des Ressources Naturelles du Canada, permet de convertir les hauteurs ellipsoïdales (NAD83 et ITRF) en hauteur orthométriques compatibles à l'étalonnage vertical du *Canadian Geodetic Vertical Datum28* (CGVD28) (Ressources Naturelles Canada, 2008).

Ce logiciel est utilisable en mode point par point ou bien à partir d'un fichier de points au format ASCII, permettant ainsi de traiter un nombre important de points en une seule fois.

b. Méthode :

Une grille régulière de 110 colonnes sur 40 lignes est crée au-dessus des zones d'étude entre Caplan et Saint-Godefroi. Cette grille régulière est constituée de cellule de 160 x 110 mètres. Pour chaque cellule, une valeur de correction est obtenue par le logiciel GPS-H. Un total de 4400 valeurs est ainsi obtenu. Par la suite, la valeur minimum, maximum, la moyenne et l'écart type sont calculées.

c. Résultats :

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart type
Valeur de correction en mètres	-20.5770	-20.3830	-20.4773	0.0407

Les valeurs négatives obtenues indiquent qu'à cet endroit, la surface du géoïde est située au-dessus du zéro marin.

L'écart type est de l'ordre de 4 centimètres et l'étalement total des données est de 19 cm, ce qui est bien en dessous de la résolution verticale du SHOALS qui est de 30 centimètres d'après les spécifications techniques du système. De ce fait, il est possible d'utiliser

qu'une seule valeur de correction pour l'ensemble de la zone d'étude. La valeur retenue est -20.47 mètres.

xv. Exemple de résultats obtenus



Figure 27. Exemple de résultats obtenus à partir des différents paramètres statistiques calculés à partir du retour du fond. La zone d'exemple est située sur le côté est du barachois de Paspébiac. La dimension de cette dernière est de 800 x 125 mètres (~100000 points). La profondeur augmente de la gauche vers droite. Il existe une dépendance entre les paramètres calculés et l'augmentation de la profondeur. Cette dépendance est marquée par des linéations.



Figure 28. Exemple de résultat obtenu avec le paramètre rugosité. La zone s'étend de la partie distale du barachois de Paspébiac jusqu'au port de Saint-Godefroi. La limite des données de la partie supérieure de l'image représente le trait de côte.



Figure 29. Exemple de résultat obtenu grâce au calcul de la densité de points avec le jeu final de données. Les lignes de vol sont clairement visibles ainsi que les zones de recouvrement entre chaque ligne de vol. Les taches noires au centre des données représentent une densité de point inférieure à 10.

xvi. Problèmes rencontrés et limitations

La plus grande limitation de cette approche provient de l'extraction des quatre points de la courbe pour en extraire le signal de retour du fond. Cette approche rend de nombreux points non-conformes, cependant le comportement homogène de l'algorithme sur l'ensemble des points limite l'impact sur le résultat final. En effet, les problèmes sont toujours du même type et provoquent les mêmes résultats en créant une erreur systématique sur un même type de signal.

4.2.6. Classification supervisée et classification sédimentaire

Une double approche est réalisée pour obtenir une classification sédimentaire des données du SHOALS.

Une approche utilise des données discrètes de type nuage de points alors que l'autre utilise des images issues du tramage du nuage de points. Ce dernier nécessite des processus d'extrapolations entre les points.

L'approche discrète fait appel à une analyse statistique par fonction de discriminant linéaire alors que l'approche continue utilise un algorithme de classification supervisée basée sur la distance minimum.

Cependant, il est nécessaire de préciser que la procédure utilisant les images multi-bandes doit être privilégier étant donnée que celle utilisant le nuage de points nécessite de recourir à des fonctions statistiques supplémentaires d'IDL obtenue après l'achat d'une licence pour le paquet IDL Analyst. Ainsi, cette fonction n'est pas nativement disponible sous IDL/ENVI.

4.2.6.1. Définition des sites d'apprentissage

Tout algorithme de classification supervisé nécessite l'intégration de sites d'apprentissage à partir duquel il pourra déterminer les spécifications statistiques de chaque type d'environnement. La sélection de telles zones est la partie la plus critique en ce qui concerne le processus de classification supervisée. Dans la présente étude, les zones d'apprentissage proviennent de plusieurs sources : les relevés de géophysiques, de sonar latérale, des vidéographies sous-marines et des échantillons sédimentaires prélevés avec la benne. Toutes ces sources de données sont utilisées pour déterminer la nature sédimentaire du fond marin et de l'intégrer dans l'algorithme.

Les relevées de géophysiques et de sonar à balayage latérale sont dépouillés et analysés en terme de nature sédimentaire du fond.

Le sondeur de sédiments (Seistec-IKB), principalement consacré à l'analyse séquentielle des dépôts sédimentaires, est très sensible à la nature sédimentaire du fond. Ainsi, il est possible d'interpréter une ligne de relevé en terme de nature sédimentaire. Néanmoins, la précision quant à la taille exacte du sédiment reste subjectif et fortement dépendant de l'observateur et de l'intensité du signal émis et des filtres appliqués à la réception. Cependant la distinction entre les sables et les affleurements de substratum rocheux est sans ambiguïté lorsque le relevé est de qualité. Ce système permet également de mettre en évidence l'existence d'algues et leur densité à la surface du fond marin.

Le sonar à balayage latéral qui enregistre une image du fond est parfaitement dédié à l'analyse sédimentaire du fond marin. Ce mode de relevé permet de mettre en évidence de faibles variations dans les faciès sédimentaires, mais nécessite, afin d'assurer une qualité dans l'interprétation des zones d'échantillonnages, de calibrer les intensités de réflexion enregistrées.

Les lignes de sondeur de sédiments et de sonar sont subdivisées selon des ensembles sédimentaires homogènes et vectorisés.

L'analyse des photos sous-marines extraites des films est une très bonne approche pour connaître la nature sédimentaire des fonds marins. Pour une station donnée, toutes les photographies sont analysées et un faciès moyen est déterminé. Par la suite, chaque station est transformée en une surface circulaire de 20 mètres de diamètre. Cette surface est alors vectorisée sous ENVI pour être incorporée à l'algorithme de classification.

L'échantillonnage de sédiments à l'aide de bennes permet d'avoir un échantillon physique de la nature du fond. C'est la preuve indiscutable de la nature du fond. Les échantillons sont donc utilisés pour étalonner les données précédemment énumérées. De la même manière que pour les photographies sous-marines, chaque échantillon du fond est transformée en une zone d'apprentissage de 20 mètres de diamètre dans laquelle la nature sédimentaire du fond est considérée comme homogène.



Figure 30. Description des zones d'apprentissages et des différents échantillonnages effectués sur la zone de Paspébiac. Les zones rectangulaires représentent des zones extraites à partir de profils (lignes noires) déterminés par les points de mesures (photographies sous-marines, échantillons sédimentaires) représentés par les points de différentes couleurs disposés à l'intérieur des zones d'apprentissages.

4.2.6.2. Méthode du nuage de points

Pour cette approche, une matrice de 15 colonnes et de *n* lignes est créée, avec *n* le nombre de points contenus dans le nuage. Les colonnes contiennent pour chaque point, les coordonnées géographiques (x, y), l'élévation (z), les onze paramètres morphostatistiques et un numéro de classe nécessaire au bon fonctionnement de l'algorithme. Pour la zone test, tout les points se voient attribuer la classe zéro. Cette valeur de classe est définie comme « non classifiée ».

Pour chaque zone d'apprentissage considérée, le même procédé est réalisé en attribuant cette fois un numéro de classe croissant pour chaque type de faciès (Substratum rocheux = 1, sable fin = 2, galets = 3, ...).

Il faut ensuite concaténer toutes les matrices ensemble selon une matrice de dimension 15 colonnes par m lignes, dans laquelle m est la somme des points du nuage plus ceux de toutes les zones d'apprentissages.

Cette matrice est analysée à l'aide de la fonction statistique IMSL_DISCR_ANALYSIS et

assigne des classes aux points ayant comme valeur de classe « non classifié » en se basant sur l'étude statistique de l'ensemble de points d'une même classe.

De nombreuses options sont disponibles pour la procédure *IMSL_DISCR_ANALYSIS*, les plus importantes utilisées ici sont décrit ci-dessus.

Les méthodes de discrimination disponibles sont d'ordre ; quadratique ou linéaire. La méthode linéaire a été privilégiée parce qu'elle est la plus simple a mettre en place et a donnée les meilleurs résultats lors de tests.

Il est également possible de définir le poids statistique de chaque population. Par défaut, ce poids est identique pour toutes les populations et égale à 1/g et respectant la condition suivante :

$$\sum_{j=1}^{g} \left(\frac{1}{g}\right)_{j} = 1$$
(19)

où g est le nombre de population, c'est-à-dire le nombre de faciès existant sur la zone.

La fonction peut également extraire l'effectif pour chaque classe, c'est-à-dire le nombre de points total d'une classe et sa redistribution dans les autres classes (Tableau 3). Cette information définit l'homogénéité de la zone d'apprentissage et renseigne sur la nécessité de modifier, fusionner ou supprimer certaine zone pour obtenir un résultat final plus cohérent et de meilleure qualité.

Finalement, une sous-matrice est produite, elle contient pour chaque point, les coordonnées géographiques, et le numéro de classes attribué par l'algorithme. Cette matrice est importée sous ENVI pour être tramée afin de générer une image de classes (image du bas de la Figure 32).

Tableau 3. Exemple de résultat obtenu sur la zone 9 et mise en forme sous Excel concernant la qualité et la pureté des zones d'apprentissages. Les zones ayant très peu de points redistribués dans d'autres classes font partie de zones homogènes et bien classées. En revanche, les zones qui sont presque entièrement redistribuée sont des zones de mélanges entre deux classes et doivent être supprimées dans la mesure du possible pour augmenter la qualité du résultat.

		THE SE			11.2		K	nown G	roup Me	mbersh	ip			1	12010	
	112	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
-	1	220	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	86	0	0	0
	2	0	366	79	3	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	88
	3	0	112	239	36	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	20
с 0	4	0	0	0	621	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
cat	5	0	0	0	0	3 2	6	0	0	35	5	0	0	0	0	0
sift	6	0	0	0	0	7	20	1	0	43	0	0	0	0	0	0
las	7	0	0	0	0	3	37	370	0	235	8	0	0	0	0	0
0 **	8	0	0	0	0	0	0	0	303	0	0	82	0	0	0	2
ion	9	1	0	0	0	37	3	0	0	30	1	0	0	0	0	2
vat	10	0	0	0	0	282	269	1	0	7	345	0	0	0	0	0
sei	11	0	14	0	0	0	0	0	38	0	0	251	0	1	0	18
40	12	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31	0	0	0
	13	0	1	4	0	0	0	0	0	0	0	3	0	58	1	5
	14	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	94	3	1
	15	0	4	7	71	1	0	0	0	3	0	1	0	0	0	226
% of Accu	racy	89,07	73,49	72,64	84,95	8,84	5,97	99.46	87.07	8,50	96,10	71,31	26,50	36,94	75,00	61,92
Sediment Type		Fine sand with granules and small pebbles	Fine sand with granules	Fine sand with pebbles	Fine sand with granules	Fine sand with granules and pebbles	Fine sand with granules and pebbies	Fine sand with granules and pebbles	Fine sand with granules and pebbles	Very fine sand and silt with small granules	Very fine sand with granules	Fins sand with granules and pebbles	Very coarse sand with granules and pebbles	Very fine sand and silt	Silt with small granules	Very fine sand and silt with small pebbles

4.2.6.3. Méthode des images multi-bandes

Chaque paramètre morpho-statistique calculé précédemment est utilisé pour créer une image. C'est un processus de tramage d'un nuage de points. La résolution de l'image finale est de 0.00001 degré par pixel, soit 1.1 mètres par pixel. Ainsi pour une zone, un ensemble de 12 images sont générées. Ces images sont ensuite fusionnées une seule image. On parle alors d'image multi-bandes.

Afin d'obtenir une carte de classification, il est nécessaire dans un premier temps de transformer les données afin d'en extraire le maximum d'informations. Cela revient à chercher les paramètres les plus décorrélés entre eux.

Des zones d'apprentissages dans le cadre d'une classification supervisée sont sélectionnées en fonction des relevés effectués durant les campagnes de terrain.

La classification étant effectuée, une évaluation de la qualité des résultats obtenus est entreprise. De plus, afin d'améliorer la qualité des résultats, les pixels isolées sont regroupés ou éliminés.

Finalement, l'application d'un arbre de décision permet de contraindre les résultats et de supprimer toute aberrations présentes dans les résultats.



Figure 31. Flux de données des 2 approches de classification supervisée. *Le flux de droite utilise des images issues du tramage d'un nuage de points alors que le flux gauche travaille directement à partir du nuage de points.*

i. Transformation des données multi-bandes par une analyse en composante principale

La transformation proposée est une transformation en composante principale effectuée sous ENVI en utilisant la fonction dédiée à cet effet. Un algorithme complémentaire développé par Gorodetzky (2007) sous IDL permet de connaître pour chaque transformation, la quantité d'information que représente chaque bande au sein de la transformation considérée. Ceci permet de sélectionner l'ensemble des bandes qui représentent 95 % ou plus du total de l'information pour une transformation particulière.

ii. Calcul des indices de séparabilité des régions d'apprentissages.

L'indice de séparabilité est un moyen statistique de déterminer si deux zones d'apprentissage sont statistiquement différenciables par l'algorithme de classification supervisée. Cet indice est calculé pour toutes les paires possibles d'une image multibandes. Pour chaque paire le coefficient de *Jeffries-Matusita* et celui de la *divergence transformée* sont calculés. Les valeurs obtenues sont comprises entre 0 et 2 (Richards, 1999).

Lorsque les valeurs sont supérieures à 1.9, les zones d'apprentissages sont bien différentiables. Pour des valeurs comprises entre 1 et 1.9, la différentiation entre les bandes est bonne. Cependant, une modification des limites de zones est suggéré afin d'augmenter cette indice. Enfin, pour des valeurs inférieures à 1, il est nécessaire de modifier, fusionner ou supprimer la zone considérée.

🗊 ROI Separability Report	
File	
Input File: 11_Params_Class_5_Stack_Image_Invert ROI Name: (Jeffries-Matusita, Transformed Divergence)	<u>^</u>
Sable_Silteux [Red] 3944 points: Sable_Silteux_Fucus [Green] 1426 points: (1.44752157 1.61673380) Sable_Silteux_Laminaires [Blue] 1346 points: (1.61532267 1.91461893) Bedrock [Yellow] 1186 points: (1.97244434 2.00000000)	
Sable_Silteux_Fucus [Green] 1426 points: Sable_Silteux [Red] 3944 points: (1.44752157 1.61673380) Sable_Silteux_Laminaires [Blue] 1346 points: (0.46359364 0.55000075) Bedrock [Yellow] 1186 points: (1.67637758 1.99984458)	
Sable_Silteux_Laminaires [Blue] 1346 points: Sable_Silteux [Red] 3944 points: (1.61532267 1.91461893) Sable_Silteux_Fucus [Green] 1426 points: (0.46359364 0.55000075) Bedrock [Yellow] 1186 points: (1.80061807 1.99989623)	
Bedrock [Yellow] 1186 points: Sable_Silteux [Red] 3944 points: (1.97244434 2.00000000) Sable_Silteux_Fucus [Green] 1426 points: (1.67637758 1.99984458) Sable_Silteux_Laminaires [Blue] 1346 points: (1.80061807 1.99989623)	
Pair Separation (least to most)	
Sable_Silteux_Fucus [Green] 1426 points and Sable_Silteux_Laminaires [Blue] 1346 points - 0.46359 Sable_Silteux [Red] 3944 points and Sable_Silteux_Fucus [Green] 1426 points - 1.44752157 Sable_Silteux [Red] 3944 points and Sable_Silteux_Laminaires [Blue] 1346 points - 1.61532267 Sable_Silteux_Fucus [Green] 1426 points and Bedrock [Yellow] 1186 points - 1.6763758 Sable_Silteux_Laminaires [Blue] 1346 points and Bedrock [Yellow] 1186 points - 1.6763758 Sable_Silteux [Red] 3944 points and Bedrock [Yellow] 1186 points - 1.97244434	9364
4	1/1

Sortie Fichier 1. Exemple de sortie fichier pour la séparabilité des zones d'apprentissages pour la sous zone n°5. Cet exemple présente les résultats pour cinq faciès. La paire « sable silteux - substratum rocheux » est celle qui posséede le meilleur indice de séparabilité avec 1.97. La paire « sable silteux avec fucus – sable silteux avec laminaires » est celle avec la moins bonne séparabilité avec un indice estimé à 0.463. En outre, la séparabilité entre le faciès « sable silteux » et ceux identiques avec des laminaires et fucus sont parmi les moins bon avec respectivement, 1.61 et 1.44.

iii. Calcul de la matrice de confusion pour estimer la qualité du résultat

La matrice de confusion est calculée à partir d'ENVI et à partir du résultat de l'algorithme et des zones d'apprentissages. Les données obtenues sont l'*overall accuracy, producer and user accuracies*, le coefficient kappa, la matrice de confusion proprement dite et les erreurs de commission et d'omission.

🗂 Class Confusion M	1atrix				_10	X
File						
Confusion Matr	ix: J:\Zone_5_	Binaries 11_Pa:	rams_Class_5_	Class_Image		
Overall Accurat Kappa Coefficie	cy = (5403/790 ent = 0.5193	2) 68.3751%				
11 11 11	Ground Tru	th (Pixels)				
Class S	able_SilteuxSa	ble_SilteuxSab	le_Silteux	Bedrock	Total	100
Unclassified	0	U	U	U	1000	
Sable_Silteux	3590	428	151	3/	4206	
Sable_Silteux	240	559	451	40	1290	
Sable_Silteux	97	210	160	1004	482	
Bearock [Iell	2044	1426	1246	1104	1729	
Iotal	3744	1420	1340	1100	7902	
and the second second	Ground Trut	h (Percent)				
Class S	able SilteuxSa	hle SilteuxSah	le Silteux	Bedrock	Total	1.1
Unclassified	0 00	0 00	0.00	0.00	0.00	
Sable Silteux	91.02	30.01	11.22	3.12	53,23	
Sable Silteux	6.09	39.20	33.51	3.37	16.32	122
Sable Silteux	2.46	14.73	11.89	1.26	6.10	
Bedrock [Yell	0.43	16.06	43.39	92.24	24.35	171
Ťotal	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
Constant in a						
Class	Commission	Omission	Commis	sion	Omission	
	(Percent)	(Percent)	(Pix	els)	(Pixels)	1.00
Sable_Silteux	14.65	8.98	616/4206		354/3944	
Sable_Silteux	56.67	60.80	731/1290		867/1426	P. 1
Sable_Silteux	66.80	88.11	322/482		1186/1346	
Bedrock [Yell	43.14	/./b	830/	1924	92/1186	
Class	Prod Acc	User Acc	Prod	Acc	User Acc	
0.000	(Percent)	(Percent)	(Pix	els)	(Pixels)	
Sable Silteux	91.02	85.35	3590/	3944	3590/4206	
Sable Silteux	39.20	43.33	559/	1426	559/1290	
Sable Silteux	11.89	33.20	160/	1346	160/482	
Bedrock [Yell	92.24	56.86	1094/	1186	1094/1924	1
						Ŧ
4						1
Land	TE SAR STATISTICS		A REAL PROPERTY.	AND A CONTRACT OF		1.644

Sortie Fichier 2. Exemple de matrice de confusion pour la sous-zone n°5. Dans l'ordre, les faciès sont : sable silteux, sable silteux avec fucus, sable silteux avec laminaires et substratum rocheux. La performance globale pour la zone est de 68.37 %. Le meilleur pourcentage obtenue pour une catégorie est de 92.24 % pour les affleurements de substratum rocheux et le moins bon est de 11.89 % pour les sables silteux avec laminaires.

4.2.6.4. Exemple de résultat obtenu sur la zone test n°5

Afin de tester la méthode, un ensemble de neuf zones tests sur la zone de Paspébiac (Figure 30) est sélectionné. Ce sont des zones rectangulaires qui sont centrées sur des lignes d'échantillonnage de photographies sous-marines et/ou d'échantillons sédimentaires.

Chaque station contient soit un ensemble de photographies sous-marines et/ou de bennes. Dans le cas de photographies, chaque station regroupe un ensemble de 3 à 10 photos. Une étude de l'ensemble des photos est réalisée et les faciès sont interprétés en terme d'abondance statistique par rapport au nombre total de photographies. Le faciès est ensuite déterminé par les abondances en ordre décroissant.

En l'absence de photographies, seuls des échantillons sédimentaires sont collectés puis analysés pour en extraire une courbe granulométrique.

Pour certaines stations, l'interprétation visuelle des photographies peut être confortée par une analyse granulométrique directe. Ceci permet d'affiner la détermination des faciès. L'absence de sédiments au sein d'une benne est considérée comme étant soit un sédiment induré soit un affleurement de substratum rocheux.

L'image du haut de la Figure 32 représente la bande contenant l'asymétrie du retour du fond après avoir subit une transformée en composante principale. Cette image est seulement présentée à titre d'exemple. Des tâches de couleurs, distinctes et possédant un agencement simple sont visibles sur cette image. Chaque nuance de gris représente un type de faciès.

La classification se fait sur un ensemble de quatre bandes sélectionnées par la transformée en composante principale. Il s'agit des bandes n°11, 1, 2, 4; elles représentent respectivement, la rugosité, l'asymétrie, l'aplatissement et l'amplitude de la courbe.

Les cercles de couleurs sont les zones d'apprentissages définis grâce aux vidéos sousmarines. Quatre types de faciès différents sont présents sur cette zone. Les deux images du bas représentent le résultat des classifications supervisées. L'image supérieure correspond au résultat de la méthode appliquée directement aux images multibandes alors que l'image inférieure est résulte de l'algorithme travaillant sur le nuage de points. Ce dernier présente une proportion relativement importante de points non classés, en noir.

Les deux méthodes mettent en évidence de résultats similaires quant à la détection des limites de faciès, mais sont en désaccord quant à l'interprétation de la tache située dans le coin inférieur droit de l'image. En utilisant l'approche discrète, le faciès est présenté comme étant un faciès de sable fin avec des laminaires ou bien simplement comme un faciès non déterminé par les zones d'apprentissages. Alors qu'en utilisant l'approche continue, la même zone devient un faciès de fucus. Selon les photographies sous-marines, c'est l'approche continue qui donne un résultat correct.

De la même manière, la méthode discrète souligne une ceinture bien développée située à l'interface sable fin et galets, gravier. La méthode continue sous-estime totalement cette bande et la considère comme étant un sédiment grossier. Cette dernière est la plus proche des observations de terrain.

Ainsi, outre l'utilisation de méthode de post-classification, tels que la matrice de confusion, il est nécessaire d'avoir une approche secondaire pour confirmer ou infirmer les résultats obtenus, puisque les deux algorithmes de classifications produisent des résultats divergents ou homogènes. Ainsi, l'analyse d'un modèle en 3D (Figure 33) de la zone d'étude est suggérée afin de mieux visualiser les différentes textures et leurs agencements dans l'espace.



Figure 32. Résultats de classifications supervisées obtenus pour la sous zones n°5 centrées sur 6 stations de vidéo sous-marines. L'image du haut représente un raster de l'asymétrie du signal du fond de la sous zone n°5 avec la position des stations de vidéos

sous-marines. Le liseré des photos correspond au faciès décrit au bas de la figure. Les deux images inférieures sont les résultats des deux méthodes de classifications supervisées utilisées. L'image supérieure correspond à la classification supervisée (minimum distance) des images multi-bandes. L'image inférieure est le résultat de l'analyse par fonction de discriminant linéaire appliquée sur le nuage de points. Les deux méthodes montrent de résultats similaires quant à la détection des limites de faciès, mais sont en désaccord quant la proportion de chaque faciès et à l'interprétation de la tache située dans le coin droit de l'image. De plus la méthode discrète (nuage de points) produit une proportion importante de points non classifiés (en noir sur la figure).

4.2.6.5. Interprétation croisée avec un modèle 3D



Figure 33. Exemple de présentation 3D de la sous zone n°5 avec une description sedimentaire des différents ensembles de la zone. Des méthodes d'analyse de cette vue en 3D ont été développées afin de corriger les résultats obtenus avec les algorithmes de classifications supervisées. Ces méthodes se basent sur la rugosité, la densité de points et l'orientation des pentes.

<u>i. Principe</u>

L'analyse 3D d'une zone consiste à fusionner un ensemble de paramètres, tel que la rugosité, la densité de points, l'angle et l'orientation de pentes, dans un arbre de décision afin de produire des règles de décisions de types binaires (oui/non) qui permettront de corriger ou contraindre des dérives contenues dans les résultats (voir « ii. Optimisation des résultats obtenus grâce à un arbre de décision. »). C'est un moyen mathématique de retranscrire l'interprétation visuelle des textures visibles sur le modèle en 3D (Figure 33).

ii. Interprétation

L'interprétation 3D de la zone montre des divisions en fonction de la texture de la surface, de l'angle et de l'orientation des pentes associées.

La zone de fucus est très visible de part sa forte et homogène rugosité. Les galets en noirs sont simplement un artefact de présentation à cause numéro de classe attribué et égale à 0.
La ceinture de laminaires, n'apparaît pas d'un point de vue texture et doit donc être très similaire à la photographie (Figure 32), c'est-à-dire des petites laminaires fixées sur des sédiments grossiers et partiellement recouverts de sédiments fins.

Cette analyse 3D de la morphologie du fond est nécessaire pour mieux contraindre les résultats et doit être appliquée à l'ensemble de la zone. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser des paramètres tels que la rugosité, la densité de points et la direction des pentes pour obtenir un modèle numérique 2D correspondant à la description 3D de la zone.

4.2.6.6. Généralisation de la procédure pour l'ensemble des zones d'études

La généralisation de la procédure est uniquement entreprise sur l'approche continue en raison de sa simplicité de mise en œuvre, nonobstant le nombre d'étapes plus importantes que celles nécessaires pour l'autre approche.

L'application de cette méthode à l'ensemble de la zone de Paspébiac et de Saint-Siméon-Bonaventure a nécessité le développement d'un algorithme qui utilise directement le fichier de position LAS. Pour ce faire, la stratégie adoptée est réalisé en neuf étapes, de façon itérative pour chaque point :

- Conversion du temps GPS contenu dans le fichier LAS en temps horodateur du fichier INW.
- 2. Déterminer dans quel fichier le signal laser se trouve.
- 3. Déterminer la position du signal laser au sein du fichier précédemment déterminé.
- 4. Extraire l'ensemble du signal laser.
- 5. Linéariser le signal de retour.
- 6. Extraire le signal de retour du fond.
- 7. Calculer les 11 paramètres morpho-statisque et stocker des résultats dans une matrice avec les coordonnées géographiques associées.
- 8. Rastérisation des 11 paramètres en 11 bandes individuelles.
- 9. Empiler les 11 bandes pour former une image multi-bandes.

Cette méthode, qui utilise directement le fichier de position comme élément de base permet d'optimiser les temps de calcul. En effet, environ 20 minutes sont nécessaires pour traiter l'ensemble des deux zones.

En pratique, cet algorithme fonctionne, c'est-à-dire que les images générées sont correctes en terme de morphologie et de positionnement spatial de chaque point. Cependant, un problème existe. Il semble se trouver dans la définition du *type* de données contenue dans les onze paramètres morpho-statistiques, ce qui rend le résultat

inutilisable. En revanche, les paramètres : bathymétrie, rugosité et densité de points, sont corrects, ce qui valide un problème de définition du *type* de donnée des onze paramètres morpho-statistiques.

Il a donc été nécessaire d'utiliser les algorithmes développés pour l'étude des sous-zones, pour fractionner la zone globale.

Ainsi pour chaque zone, un ensemble de sous-zones sont définis selon la direction du trait de côte. Cette stratégie a engendré des lacunes dans la couverture totale de la zone.

La zone de Saint-Siméon-Bonaventure est couverte par 16 sous-zones qui s'étendent depuis Caplan jusqu'à la Pointe de Bonaventure.

La zone de Paspébiac est couverte par un ensemble de 13 sous-zones allant depuis la flèche sableuse sous-marine du barachois de Paspébiac jusqu'au port de Saint-Godefroi. En plus d'effectuer une couverture totale des zones, il est nécessaire de regrouper les différentes zones d'apprentissages afin d'homogénéiser les classes. Comme pour les zones tests, chaque sous-zones est représentée une image multi-bande. Pour chaque zone, une mosaïque est créer avec la résolution initiale de chaque sous zone, c'est-à-dire 1.1 m.pixel⁻¹.

Enfin, l'algorithme de classification supervisée est appliqué à cette mosaïque.

i. Problèmes rencontrés

Le fait de généraliser l'étude sur une zone a amené plusieurs problèmes qui sont dus soit à la limitation de la méthode dans la réalisation proprement dite, soit à des contraintes environnementales.

i.1. Limitation de la méthode

La transformée en composante principale a pour but de décorréler les paramètres statistiques entre eux. Ainsi pour un ensemble de onze paramètres, seul trois ou plus peuvent représenter toute l'information nécessaire à la classification supervisée. Il est nécessaire d'effectuer un choix quant aux bandes utilisées. L'omission de ce choix nuit au résultat de la classification supervisée. Or, pour les zones tests, chacune d'elle avait sa propre transformation et donc sa sélection de bandes qui représente 95% ou plus de la

variance totale. Les résultats obtenus sur les neuf zones sont présentés dans le tableau cidessous :

Tableau 4. Synthèse des bandes sélectionnées de chaque sous zone après avoir effectué une transformée en composante principale. Sur un ensemble de neuf zones, cinq présentent la même sélection, soit les bandes 2 (aplatissement), 1 (asymétrie) et 8 (angle du côté droit). Les zones 1 et 8 n'ont aucunes bandes en commun avec la sélection la plus fréquente et les zones 5 et 6 ont deux bandes en communs.

Bandes sélectionnées	Paramètres	Récurrence	Zone
2, 1, 8	aplatissement, asymétrie, angle côté droit	5	2, 3, 4, 7, 9
3, 7, 6	longueur courbe, longueur côté droit, angle côté gauche	1	1
3, 5, 7	longueur totale courbe, longueur côté gauche, longueur côté droit	1	8
11, 1, 2	rugosité, asymétrie, aplatissement	1	5
2, 1, 11	aplatissement, asymétrie, rugosité	1	6

La sélection ayant la plus importante fréquence est utilisée pour l'ensemble de la zone. Donc pour cinq zones le choix est pertinent alors que pour les quatre restantes, cela l'est beaucoup moins, ceci diminue l'efficacité de l'algorithme au niveau de ces zones. En effet, les zones 1 et 8 n'ont aucunes bandes en commun avec la sélection la plus fréquente et les zones 5 et 6 ont seulement deux bandes en commun.

i.2. Limitation environnementale

Les différents faciès sont statistiquement distincts. Néanmoins, il peut arriver que deux ou plusieurs faciès s'expriment de la même façon. Si cela est le cas, alors l'algorithme ne peut faire la différence entre les différents faciès. En outre, aucun moyen mathématique ne permet de remédier à un telle situation. De ce fait, il est indispensable de connaître à priori la zone et des différents processus sédimentaires et hydrodynamiques qui s'y déroulent. En effet, une telle connaissance permet de contraindre le modèle et de corriger le résultat final en utilisant un arbre de décision.

ii. Optimisation des résultats obtenus grâce à un arbre de décision.

L'arbre de décision est un processus de classification pixelaire qui résout une série de décisions binaires pour assigner une classe au pixel. Chaque décision prise selon une expression logique produit deux images ; condition satisfaite, non satisfaite. Cette méthode utilise toutes sortes de sources de données tels que des images multi-bandes, des modèles numériques de terrains, des modèles de pentes, de densité de points, etc.

Les expressions de décisions peuvent intégrer des opérateurs mathématiques de type, multiplication, division, sinus, cosinus, exponentiel, etc., ou bien des opérateurs logiques tels que plus grand que, égale à, etc. Chaque expression est appliquée à une bande en particulier de la source de donnée. Il n'y a pas de limitation dans la complexité du noyau décisionnel, cependant, il faut que la réponse engendrée soit de type binaire, c'est-à-dire oui ou non. Un exemple de noyau de décision pourrait être par exemple défini comme suit :

 $Class_2 = (\{density\} LE 10.0\} AND$

({depth} LE -20.47) AND ({depth} GE -26.30) AND \$ ({roughness}GT 0.148) AND ({roughness}LT 0.0.197)



Figure 35 Exemple d'arbre de décision. Pour contraindre et corriger le résultat d'une classification supervisée, une connaissance a priori du milieu et des faciès est nécessaire.

Le signe \$ permet d'écrire sur plusieurs ligne une même expression. Ainsi, cet exemple recherche toutes les valeurs satisfaisantes les conditions suivantes:

La densité des points doit être supérieur ou égale à 10.0 ET la profondeur doit être comprise entre -20.47 et -26.30 ou égal ET la rugosité doit être comprise entre 0.148 et 0.197, avec les valeurs limites exclues.

Selon l'arbre de décision présenté en exemple, si la condition du nœud Class_2 est réalisée alors tout les pixels satisfaisant ces conditions sont orientés vers un autres nœuds pour affiner les classification selon la rugosité. Selon la valeur de la rugosité, les pixels se verront attribuer la classe 2 correspondant substratum rocheux ou la classe 4 qui correspond aux sédiments grossiers de type galets, gravier.

En revanche, si la condition du nœud Class_2 n'est pas satisfaite, alors les pixels concernés devront satisfaire à d'autres décisions pour déterminer s'ils appartiennent à la classe 3, 4, 5, 6 ou 7.

4.2.7. Analyse de profil d'élévation pour mettre en évidence les processus hydrodynamiques côtiers.

Les données d'élévation du SHOALS permettent d'étudier la morphologie du fond de façon très précise étant donné la grande précision verticale du système. Cette dernière peut mettre en évidence des processus sédimentaires et hydrodynamiques en étudiant des profils d'élévations. En effet, l'orientation et la direction de dune sableuse ou l'accumulation sédimentaire au niveau d'épis d'enrochement le long de la côte, sont autant de facteurs permettant de connaître et déterminer la source et direction des courants sédimentaires. En outre, les paramètres tel que la pente de plage et la caractéristique morphologiques des dunes reflètent l'énergie du milieu et les conditions environnementales qui étaient présentes lors du relevé.

4.2.7.1. Principes

Cette analyse est pour le moment manuelle. Elle se fait en deux étapes. La première consiste à augmenter l'exagération verticale du modèle bathymétrique (x11) et de le visualiser en 3D avec un visalisateur de données LAS tel que QT Modeler ou Fledermaus. L'analyse de ce modèle met en évidence des variations de texture du fond marin mais également les structures morpho-sédimentaires tels que les dunes, les strates ou les chenaux.

Une fois ces structures localisées, des traits de coupe sont réalisés afin dans extraire des profils d'élévations afin de calculer les paramètres tels que : des angles de pentes, des longueurs d'ondes, des amplitudes, etc.

5. Analyse des données du SHOALS obtenues dans la Baie des Chaleurs : significations et validité



Les données obtenues sont analysées et interprétées selon trois principaux axes.

La première partie s'attache à présenter une comparaison qualitative de la bathymétrie obtenue à partir du SHOALS vis-à-vis des sources de données existantes sur la zone d'étude, c'est-à-dire : la carte 4486 du Service Hydrographique du Canada (1979) et la carte bathymétrique réalisée par Long (2006).

Plusieurs travaux ont déjà analysé la qualité des résultats obtenus avec le SHOALS (Guenther et al., 1996a, 1996b; Pope et al., 1997; Irish et al., 2000; LaRocque et al., 2004; Lockhart et al., 2005; Wozencraft et Millar, 2005; Optech Inc., 2004c; Kuus, 2008). Les résultats montrent que le SHOALS dépasse les standards du IHO d'ordre 1 qui sont de ± 0.15 m en précision verticale et ± 1 -3 m en précision horizontale. De plus, Riley (1995) a montré que la différence moyenne de profondeur mesurée entre un multifaisceaux et un SHOALS est estimée à 7 cm.

Cependant, l'exemple étudié, permet de comparer les trois cartes bathymétriques obtenues par des méthodes différentes et à des périodes comprises entre 1979 et 2006. On peut donc tenter d'intégrer le rôle de l'évolution de la mesure de la topographie au cours du temps.

Enfin, il est vital de s'assurer que les données en provenance du LiDAR bathymétrique soient bien alignées avec les données de Long (2006). En effet, la carte de la répartition des sédiments de surface réalisée par Long (2006) est utilisée comme document de contrôle de qualité des résultats obtenus avec les algorithmes de classifications, pour l'établissement de cartes sédimentaires.

La deuxième partie présente une analyse morpho sédimentaire des données du SHOALS pour en caractériser les différents corps sédimentaires qui existent sur la zone d'étude ce qui permettra ensuite de rechercher les différents processus hydrodynamiques qui en sont à l'origine. De plus, une comparaison des deux modèles bathymétriques disponibles sur la zone de Paspébiac est effectuée afin d'étudier l'impact de la densité des points de mesures du modèle sur l'analyse morpho sédimentaire. Par la suite, les processus hydrodynamiques déterminés à partir de cette analyse morpho sédimentaire sont comparés aux données disponibles pour la Baie des Chaleurs.

La troisième partie présente les résultats obtenus grâce aux différentes méthodes de classifications établies dans cette thèse. Pour chaque zone d'étude, Saint-Siméon-Bonaventure et Paspébiac, des cartes sédimentaires sont présentées. La qualité de ces cartes est ensuite discutée en les comparant aux différentes sources de données disponibles : cartes de la répartition des sédiments de surface, lignes de relevés de géophysiques (échantillonneur de sédiment, sonar à balayage latéral), photographies sous-marines, échantillons de sédiment.

Avant de présenter les résultats, il est indispensable d'indiquer les performances du système lors du relevé effectué dans la Baie des Chaleur en juillet 2006.

5.1. Performance du SHOALS et qualité des résultats obtenus lors du relevé de juillet 2006 dans la Baie des Chaleurs, Québec, Canada.

5.1.1. Conditions météorologiques avant le relevé aéroporté

Il est nécessaire de distinguer les deux sites étant donné que les conditions météorologiques pendant les relevés ont été différentes. En effet, le 1^{er} juillet 2006, quelques heures avant le passage de l'avion au dessus de Saint-Siméon, un violent orage accompagné de vents violent (vitesse maximum de 18.5 m.s⁻¹) est passé sur la zone. Ceci a eu pour conséquence de mettre en suspension le matériel sédimentaire le plus fin diminuant ainsi la pénétration du faisceau laser dans la colonne d'eau en limitant sa pénétration maximale. En outre, une turbidité importante dégrade la qualité du signal de retour, introduisant une variabilité statistique dans le calcul de la bathymétrie qui réduit la précision et la qualité de cette dernière. Sur le modèle de bathymétrie cela est matérialisé par une rugosité typique qui ressemble à une « planche à clous » (Figure 36).



Figure 36. Présentation de deux artéfacts sur le modèle bathymétrique de l'embouchure de la Rivière Bonaventure. Cette image est réalisée grâce à la superposition de deux modèles bathymétriques différents. L'échelle verticale a été exagérée 10 fois afin de mettre en évidence les artefacts. Le premier artefact est un problème d'alignement vertical entre les deux modèles et est matérialisé par les lignes horizontales visibles sur la figure. Le deuxième artefact provient de la moins bonne qualité des données obtenues pendant le relevé au-dessus de la zone de Saint-Siméon-Bonaventure. En effet, la dégradation du signal due à une turbidité importante provoque une variabilité statistique dans le calcul des bathymétries qui provoque une rugosité typique ressemblant à une « planche à clous ».

5.1.2. Pénétration minimum et maximum

Deux limitations existent quant à l'efficacité du système. En effet, en eau peu profonde (zone de déferlement) et profonde le système est limité. En outre, la qualité des données n'est pas la même en fonction du jour de relevé étant donné les conditions météorologiques.

5.1.2.1. Estimation de la performance du SHOALS par Optech International

Une étude préliminaire des performances du SHOALS dans la Baie des Chaleurs pour le mois de juin a été réalisée par le Dr Viktor Feygels d'Optech international en février 2006 (Feygels, 2005) basée sur des images Aqua-MODIS et neuf mesures de disque de Secchi réalisées pendant la campagne de terrain 2005. Ces mesures localisées dans la partie ouest du barachois de Paspébiac donnent une profondeur moyenne de -5.93 mètres (Figure 11 et Tableau 2).

En effectuant des mesures avec un disque de Secchi standard (de 30 cm de diamètre) la mesure effectuée doit être corrigée de 1 à 1.5 m en moins. En outre, selon les spécifications du SHOALS, la pénétration maximale atteinte par le système est de deux fois la mesure d'un disque de Secchi standard avec un fond de réflectivité moyenne estimée à 10-15%. Ainsi, les prédictions obtenues à partir du disque de Secchi donnent une pénétration comprise entre 8 et 12 mètres. Une réflectance inférieure à 10-15% diminue la pénétration du système.

De plus, l'estimation du coefficient d'atténuation à 532 nm donne une pénétration maximum de 6 à 11 mètres pour le mois de juin selon les données Aqua-MODIS.

Il semble donc que la pénétration théorique du système pour la période de relevés soit comprise entre -6 mètres et -12 mètres.

Tableau 5. Profondeur minimum, moyenne et maximum atteintes avec le disque de Secchi pendant la campagne de terrain 2005.

Profondeur moyenne	Profondeur maximum	
-5,9 m	-6.5 m	
	<i>Profondeur moyenne</i> -5,9 m	

5.1.2.2. Performance du SHOALS observée lors du relevé réalisé dans la Baie des Chaleurs, Canada, en juillet 2006.

Pour le site de Saint-Siméon-Bonaventure, la pénétration maximum enregistrée par le système est de -10.23 mètres, ce qui est en accord avec les estimations. En revanche, pour le site de Paspébiac, la profondeur atteinte est de -16.7 mètres, ce qui est bien supérieur aux prévisions estimées par Optech International.

Cette performance pour le site de Paspébiac est en accord avec les prélèvements d'eau réalisés lors du jour de relevé. Les filtrations ont révélé une concentration moyenne de 5.69 mg.l⁻¹, ce qui est très faible. Cela a assuré au SHOALS une efficacité optimale.

Des prélèvements ont également été réalisés dans le marais de Saint-Siméon. Ces échantillons d'eau présentent la concentration la plus importante de toutes les zones mesurées avec une moyenne de 10.27 mg.l⁻¹. Cette forte concentration sédimentaire

conjuguée à la faible profondeur du marais a limité l'efficacité du SHOALS au-dessus du marais (Figure 37). En effet, la figure présente des trous au niveau du marais et dans les zones peu profondes où les vagues déferlements, mais également à l'est du marais de Saint-Siméon au large (Figure 37). Cependant les marais de Paspébiac et de Rivière-Nouvelle ne présentent aucun trou. Cette différence est due à une différence de concentration de matière en suspension.

Les trous sont des zones où les mesures SHOALS ont été exclues parce que la qualité des données n'était pas suffisante pour assurer un calcul bathymétrique de précision. Ces trous sont des zones ou la densité de points est inférieure à la normale (4.2.5.2.xii. Densité des points). La densité de points est le nombre de points laser par mètre carré. La densité est une fonction directe du mode de relevé. Pour notre étude, les deux densités normales sont de 1 point.m⁻² et 0.5 point.m⁻².correspondant respectivement au relevé 2 x 2 m et 3 x 3 m.



Figure 37. Mise en évidence des limitations du système dans un environnement turbide après un orage violent sur la zone de relevé. La ligne ne pointillés représente la ligne de côte.

5.1.3. Trous dans les jeux de donnés.

Outre les limitations aux niveaux des limites, il est intéressant d'étudier les trous existant dans le jeu de données finales parce qu'ils semblent être en relation avec la nature sédimentaire et biologique du fond.

En effet, le faisceau laser est bloqué ou dégradé lorsqu'il rencontre un champ de laminaires. Ces dernières sont de grandes algues accrochées à un substrat induré (substratum rocheux, galets) et peuvent constituer des couvertures végétales plus ou moins étendues et plus ou moins denses. Ces longues algues sont soumises aux courants et sont en mouvement. Ces mouvements vont produire des changements dans la géométrie de la réflectance, provoquant ainsi des variations dans les signaux de retour (Tulldahl et al., 2007). En outre, la densité du couvert végétal provoque un effet de masque plus ou moins efficace du fond. En effet, les faisceaux laser ne pourront pas pénétrer le couvert végétal dense et soit le signal de retour est considéré comme faux parce que l'intensité de retour est trop faible soit la profondeur calculée est considérée comme fausse parce que située bien au-dessus de la profondeur moyenne du fond marin et que la différence d'élévation est supérieure à la variation statistique du système.

Le modèle bathymétrique de Paspébiac présente des trous importants dans la zone située entre la partie est du barachois de Paspébiac et Saint-Godefroi. Ils sont organisés sous forme de bandes longitudinales discontinues relativement parallèle à la côte située à une profondeur moyenne de -5 m.

5.1.4. Comparaison bathymétrique entre les différentes sources de données

La comparaison bathymétrique se fait de manière distincte selon les deux sites considérés : une comparaison entre les données du SHOALS, celles de Long (2006) et celles du Service Hydrographique du Canada (1979) sur la zone de Saint-Siméon-Bonaventure; une comparaison entre le SHOALS et les données bathymétriques provenant du Service Hydrographique du Canada sur la zone de Paspébiac.

La comparaison de trois isobathes (2 m, 4 m, 6 m) est réalisée. Étant donné que la carte bathymétrique du SHC est en brasses et pieds, seule une comparaison approximative est possible pour cette dernière. C'est-à-dire que l'isobathe des 2m est comparée à l'isobathe des 1 brasse (1.82 m) sur la carte du SHC. Il en est de même pour l'isobathe des 6m avec celle des 3 brasses (5.48 m). A priori, cette différence d'altitude au départ entre les courbes de niveau considérées devrait se traduire par un simple décalage de leur tracé.

5.1.4.1. Zone de Saint-Siméon-Bonaventure à Ruisseau-Leblanc

Les comparaisons bathymétriques de cette zone sont faites par deux ensembles : l'un correspondant à l'embouchure de la rivière Bonaventure, l'autre à la zone comprise entre le marais de Saint-Siméon et Ruisseau-Leblanc.

<u>i. Embouchure de la rivière Bonaventure</u>

a. Isobathe des 2 mètres (Figure 38)

Les corrélations entre les données du SHOALS et celles de Long (2006) sont très bonnes sur toute la zone.

Les données du SHC sont bien corrélées avec celles du SHOALS au niveau du marais de Saint-Siméon et à l'est de l'embouchure de la rivière Bonaventure. En revanche, au large de Bonaventure, un décalage important (maximum de 325 mètres) apparaît entre les données du SHC et celles de Long (2006) et du SHOALS.

b. Isobathe des 4 mètres (Figure 39)

Pour cette isobathe seule celle de Long (2006) et celle du SHOALS peuvent être comparées. La superposition entre les deux isobathes est moins bonne que pour

l'isobathe des 2m, mais les formes générales des isobathes sont similaires. De même, les digitations indiquées par Long (2006) se retrouvent sur les données SHOALS.

Des décalages de 300 mètres sont par ailleurs également visibles par endroit. L'origine de ces différences doit être recherchée surtout par les moyens utilisés pour obtenir les données de Long (2006). En effet, la carte bathymétrique est réalisée à partir d'un ensemble de profils parallèles entre eux et espacés de 250 mètres. Cet ensemble est par la suite recoupé avec d'autres profils perpendiculaires. Ce maillage est la base de la construction de la carte bathymétrique qui nécessite une interprétation entre les profils.

c. Isobathe des 6 mètres (Figure 40)

Les corrélations entre les données SHOALS et celle du SHC devant le Havre Beaubassin et devant le marais de Saint-Siméon sont bonnes. Cependant un décalage relativement important, de plusieurs centaines de mètres entre les deux isobathes, est évident au large du village de Bonaventure.

L'existence d'un décalage est logique dans cette situation étant donné que l'isobathe des 6 mètres est comparée avec l'isobathe des 3 brasses. Il y a 52 cm de différence entre 6 mètres et 3 brasses. Cependant cette faible différence bathymétrique devrait produire deux isobathes sensiblement parallèles entre elles, ce qui n'est pas vraiment le cas. Il y a donc d'autres phénomènes qui sont à l'origine de ce décalage. Là encore, le mode d'établissement de la carte SHC doit être en grande partie à l'origine de ces différences.

En effet, pour le positionnement, le SHC a du utiliser à cette époque, soit des sextants, soit des systèmes de positionnement par triangulation par micro-ondes de type *Miniranger* de Motorola ou *transponder* de Del Norte. Ce type de positionnement assurait une précision de ± 2 m avec trois balises, qui diminuait avec le nombre de balises déployées.

En outre, le SHC recherche les zones peu profondes ou les dangers pour la navigation, c'est pourquoi afin d'assurer une marge de sécurité pour la navigation, les profondeurs reportées sur les cartes présentent un biais et sont moins profondes que

celles mesurées sur le terrain. Ce biais doit positionner les isobathes du SHC plus au large que celles du SHOALS.

Par ailleurs, l'isobathe des 3 brasses (5.48 m) doit être théoriquement placée plus proche du rivage que l'isobathe des 6 mètres. Or, la figure 40 montre l'inverse, ce qui laisse penser que le SHC a introduit un biais relativement important, mais non quantifiable du aux cumuls des sources d'erreur. En outre, il peut également s'agir d'erreurs de navigation.



Figure 38. Comparaison bathymétrique multi sources



Figure 39. Comparaison bathymétrique multi sources.



Figure 40. Comparaison bathymétrique multi sources

ii. Du marais de Saint-Siméon-Bonaventure à Ruisseau-Leblanc

a. Isobathe des 2 mètres (Figure 41)

Comme précédemment, les deux isobathes de Long et du SHOALS présentent une très bonne corrélation (à noter que les données de Long s'arrêtent avant le port de Ruisseau-Leblanc). De même, les données du SHC présentent une bonne corrélation générale avec l'existence de quelques décalages allant de 250 à 500 mètres.

b. Isobathe des 4 mètres (Figure 42)

Là encore, les corrélations entre les isobathes de Long et du SHOALS sont très bonnes et confirment les résultats précédents.

c. Isobathes des 6 mètres (Figure 43 et Figure 44)

Les données de Long, du SHC et du SHOALS présentent une bonne corrélation générale sur l'ensemble de la zone avec cependant des variations notoires à l'avant de la flèche ouest de l'embouchure de la rivière Bonaventure (coin inférieur droit).En effet, les données de Long et du SHC présentent un ensemble de circonvolutions, plus ou moins importantes, que les données SHOALS expriment également, mais, par rapport au SHOALS, les données de Long en surestiment le nombre et la complexité de ces circonvolutions alors que le SHC les sous-estime. Il est vraisemblable, que la part d'interprétation nécessaire à partir de données ponctuelles, que les problèmes de positionnement et le biais introduit dans les cartes, soient à l'origine de ces divergences.



Figure 41 Comparaison bathymétrique multi-sources



Figure 42 Comparaison bathymétrique multi-sources



Figure 43 Comparaison bathymétrique multi-sources



Figure 44 Comparaison bathymétrique multi-sources

5.1.4.2. Zone de Paspébiac à Saint-Godefroi

Les sites du barachois de Paspébiac et Saint-Godefroi sont présentés à cause de la richesse et de la diversité des structures sédimentaires qui sont décelées sur la zone. En effet, il y a des affleurements de substratum rocheux et des chenaux sous-marins. Ici comme seules les données du SHC sont disponibles, les isobathes calculées à partir du modèle bathymétrique sont donc rapportées en brasses.

i. barachois de Paspébiac

a. Isobathe des 1 brasse (Figure 45)

La corrélation entre les données SHOALS et celles du SHC est très difficile. En effet, il n'y a pas de superposition ni même de parallélisme entre les deux isobathes. De plus, l'isobathe du SHOALS présente un fort parallélisme avec le rivage, qui est proche, contrairement à celle du SHC qui est éloignée du trait de côte et qui n'est pas parallèle à ce dernier.

En outre, l'isobathe du SHC coupe plusieurs structures : les digues du port sur le côté ouest du barachois de Paspébiac et la flèche sableuse à l'extrémité de ce dernier. Pour les digues du port, cela est normal puisque la vectorisation des isobathes n'a pas tenu compte de cette structure et seul un trait passant dessus a été réalisé. En revanche, pour la flèche sableuse, le tracé de l'isobathe SHC n'est pas le résultat d'un artefact résultant de la vectorisation des différentes isobathes.

L'explication de ce tracé SHC qui recoupe une flèche sableuse actuelle semble difficile à expliquer par les seules incertitudes de positionnement. Il faut dans ce cas envisager des modifications bathymétriques qui ont eu lieu entre le moment de l'établissement de la carte SHC et le levé SHOALS.

Plusieurs études ont porté sur le barachois de Paspébiac et ses variations au cours du temps. Ainsi Bergeron (1995) a observé une migration en direction de l'ouest de 300 mètres entre 1870 et 1995. Ropars (1997) a établi un recul de 100 mètres entre 1870 et 1934. Renaud (1999) avait mesuré un recul de 25 mètres entre 1992 et 1998. Enfin, Xhardé (2007) a montré un recul de 2,26 mètres entre 2003 et 2004 grâce à deux relevés LiDAR successifs. Toutes ces études montrent qu'il existe un phénomène de migration en direction de l'ouest du barachois de Paspébiac qui peut expliquer les différences entre les deux isobathes.

b. Drapage de la carte du Service Hydrographique du Canada sur le modèle bathymétrique du SHOALS (Figure 46)

Le drapage consiste à superposer une carte sur un modèle numérique d'élévation. Ainsi, l'observation détaillée de la superposition de la carte du SHC sur le modèle bathymétrique SHOALS met en évidence un problème d'alignement ou de différence entre les données. En effet, l'étude des traits de côte du SHOALS et du SHC montre qu'ils ne sont pas superposés par endroit. Ces différences sont notamment visibles dans la zone située entre le barachois de Paspébiac et Saint-Godefroi.

Cette zone côtière est constituée de falaises qui sont sensibles à l'action des vagues et donc aux processus d'érosion côtière. Or, en presque 30 ans, temps écoulé entre la publication de la carte du SHC et le relevé SHOALS, le trait de côte a forcément été modifié, ainsi que l'indique le travail de Xhardé (2007) qui établit un indice de vulnérabilité côtière et estime que cette zone présente une vulnérabilité estimée entre faible et modérée. Cependant, il est quasiment impossible d'évoquer ce processus pour des décalages de plusieurs centaines de mètres. Ainsi, un décalage latéral de 200 mètres réalisé sur une période de 30 ans correspondrait à un taux d'érosion moyen de 5 cm.jour⁻¹ (et de 25 cm.jour⁻¹ pour un décalage de 1000 mètres).

Mais, même si, par endroit, la différence entre la position du trait de côte sur les deux cartes pourrait s'expliquer par une telle rétrogradation issue d'une érosion sur une trentaine d'années, une telle hypothèse ne peut expliquer que, par endroits, la différence entre les traits de côtes ne pourrait que correspondre à une progradation, ce qui, pour une falaise, n'est pas possible (flèches noires de la Figure 45).

Il est donc clair qu'il y a un problème d'alignement entre les données, mais il n'est probablement pas le seul responsable de la différence entre les isobathes



Figure 45. Comparaison de l'isobathe des 1 brasse sur la région du barachois de Paspébiac et de New-Carlisle. Les isobathes comparées proviennent du modèle bathymétrique du SHOALS et de la carte bathymétrique du SHC.



Figure 46. Drapage de la carte bathymétrique 4486 du SHC sur le modèle bathymétrique réalisé à partir des données du SHOALS.

ii. Zone de Saint-Godefroi

a. Isobathe des 1 brasse (Figure 47)

Les mêmes problèmes que ceux observés pour le barachois de Paspébiac sont constatés pour la zone de Saint-Godefroi. Les données ne sont donc pas bien corrélées et il peut même exister des décalages latéraux pouvant aller jusqu'à 1000 mètres. De plus, des structures comme des chenaux ne sont pas mis en évidence par l'isobathe du SHC.



Figure 47. Comparaison de l'isobathe des 1 brasse sur la région de Saint-Godefroi. Les isobathes comparées proviennent du modèle bathymétrique du SHOALS et de la carte bathymétrique du Service Hydrographique du Canada. L'échelle reportée représente une distance de 1000 m.

5.1.5. Conclusion

Les comparaisons entre les données bathymétriques sur les deux zones d'études montrent des corrélations variables entre les trois sources de données disponibles. Le meilleur calage bathymétrique est obtenu entre les données de Long (2006) et du SHOALS. Les données du Service Hydrographique du Canada sont localement bien corrélées avec celles du SHOALS, alors qu'en d'autres endroits ces variations latérales entre les isobathes peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres. Ces variations sont le résultat de la combinaison de plusieurs facteurs : la différence d'unité d'isobathe (comparaison de l'isobathe 6m avec celle des 3 brasses), le changement du trait de côte en presque 30 ans, le positionnement des points de mesure, le degré d'interprétation des données ponctuelles et enfin les limitations des méthodes de relevés :

- La différence d'unité utilisée pour la comparaison introduit des incertitudes de 18 cm et 52 cm respectivement entre les isobathes de 2 mètres/1 brasse et 6 mètres/3 brasses. De telles différences verticales nécessiteraient des fonds marins subhorizontaux pour pouvoir réaliser des variations latérales de plusieurs centaines de mètres. Or ni les données bathymétriques issues du SHOALS, ni la carte du Service Hydrographique du Canada ne présentent de tels platiers.
- Le décalage d'une même isobathe vers la côte signifierait qu'il y a eu un processus d'érosion. Ce mécanisme ne peut être évoqué pour des périodes de temps relativement courtes.
- Les limitations des méthodes de relevé sont, pour les données du Service Hydrographique du Canada, les zones de faibles profondeurs et la couverture réalisée par les moyens maritimes conventionnels en 1979. En outre, la carte bathymétrique du SHC est le résultat d'une interprétation de points de relevés épars de bathymétrie. Il est donc normal que les points en faible profondeur soient d'autant moins nombreux engendrant donc des interpolations plus importantes. En outre, en hydrographie, il est conseillé de réaliser les lignes de relevés dont le rapprochement sera équivalent à 1 cm sur la carte produite. Ainsi, pour une carte au 1/100000, les relevés seront espacés de 1 km et pour une carte au 1/10000 de 100 m. Cette règle induite forcement des erreurs lors de la réalisation de la carte. Cependant, afin de limiter ces erreurs et pour avoir plus de précision, les relevés sont fait pour avoir des lignes au 0.5 cm, soit deux fois plus de lignes que la norme établit. De plus, l'échelle de la carte est très petite et il aurait été ainsi nécessaire d'étudier plutôt les relevés de terrain pour assurer un maximum de précision.
- Les problèmes de positionnement dus au matériel utilisé associés au biais introduit dans les cartes, contribuent également à la variabilité observée.

Il est fort probable que ce sont ces deux derniers points qui introduisent la plus forte variabilité dans la comparaison des données.

Cependant, plusieurs points majeurs résultent de cette analyse :

- Le SHOALS permet d'obtenir des cartes bathymétriques dans un temps rapide et dans des zones difficiles d'accès par d'autres méthodes. Une carte bathymétrique de la zone est à l'avant du barachois de Paspébiac est présentée sur la Figure 48.
- L'établissement de telles cartes à des intervalles de temps rapprochés permettra de déceler des modifications de topographies dues à des mécanismes d'érosion ou hydrodynamique. Le SHOALS mais plus généralement, les LiDAR bathymétriques, introduisent la dimension temps dans l'étude de la dynamique des systèmes côtiers.
- La précision des données SHOAL est supérieure à la capacité de représentation cartographique. Des corps de taille décimétrique sont identifiables et leur localisation précise rend plus aisée leur interprétation.

Enfin, la très bonne corrélation entre les données de Long (2006) et celles du SHOALS ouvre la possibilité d'utiliser les cartes de répartition des sédiments de surface de la zone de Saint-Siméon-Bonaventure comme le document de base nécessaire pour contrôler la qualité des cartes sédimentaires réalisées à partir du SHOALS.



Figure 48. Exemple de carte bathymétrique produite à partir des données SHOALS. Ce système permet de réaliser des cartes de très grande précision en continue entre les zones côtières émergées et immergées. De plus, les données permettent de mettre en évidence des structures sédimentaires fines de taille décimétrique. En effet, les dunes sont mises en évidence par les oscillations des isobathes à l'avant du barachois de Paspébiac.

5.2. Structures sédimentaires et processus hydrodynamiques

En préambule, il est important de préciser quelles sont les données courantologiques disponibles sur la zone d'étude. Ainsi, selon Pêches et Océans Canada, les courants de surface dans la Baie des Chaleurs sont alimentés au nord par l'entrée des eaux froides du courant de Gaspésie le long de la côte gaspésienne avec un déplacement d'est en ouest. Au sud les courants sont produits par la décharge des rivières et le déplacement se fait d'ouest en est, le long de la côte du Nouveau-Brunswick. Ces deux courants opposés produisent une circulation cyclonique de faible intensité dans la Baie des Chaleurs et les courants ainsi engendrés ont des vitesses moyennes comprises entre 4 et 10 cm.s⁻¹ (Xhardé, 2007). Les zones d'études de Paspébiac et de Saint-Siméon-Bonaventure subissent l'influence de ce courant cyclonique qui sur la côte nord est de direction est-ouest (Figure 49). Ainsi, toute expression de ces courants de surface telle que les accumulations sédimentaires au niveau des épis rocheux, ou la direction des dunes sableuses, devrait correspondre à cette direction dominante est-ouest.



Figure 49. Carte des courants de surface dans l'estuaire du golfe du Saint-Laurent (source Pêches et Océans Canada). Dans la Baie des Chaleurs, les deux courants de sens opposé vont produire une circulation cyclonique de faible intensité qui sur la côte nord aura une direction générale est-ouest.
5.2.1. Description des structures sédimentaires à l'avant du barachois de Paspébiac

L'étude des deux modèles bathymétriques issus des relevés, à haute densité et à faible densité, confirme l'existence d'un champ de dunes et d'un système de barres d'avant côte à l'est du barachois de Paspébiac. En effet, ces ensembles de structures sédimentaires ont été précédemment mis en évidence (Long, 2006) par des investigations à l'échantillonneur de sédiment (Seistec-IKB) et par des profils de plage (RTK).

La grande précision des données du SHOALS établit les caractéristiques de ces dunes, jusque-là essentiellement connues en coupe (longueur, orientation...). De plus, ces données révélent l'existence insoupçonnée de plusieurs séries de dunes asymétriques génétiquement différentes ainsi qu'un ensemble de strates sableuses. En se basant sur les synthèses faites par Amos et King (1984), Ashley (1990) et Berné et al (1993), il est possible de caractériser les champs de dunes mis en évidence. L'asymétrie des dunes sableuses étant un indicateur qualitatif simple de la direction du transport sédimentaire et du sens de migration des dunes, il est donc possible de déterminer les directions moyennes des courants qui ont formé ces différents champs de dunes. En outre, grâce aux principes de stratigraphie, il est possible de déterminer une chronologie relative de mise en place de ces différentes structures sédimentaires.

5.2.1.1. Description des différents ensembles morpho-sédimentaires à l'avant du barachois de Paspébiac.

La description des différentes structures morpho sédimentaires immergées se fait à partir de l'analyse bathymétrique des images générées à partir du relevé SHOALS à haute densité (Figure 57) et basse densité (Figure 58). De plus, différents profils sont effectués perpendiculairement aux structures afin de caractériser leur amplitude, longueur d'onde, épaisseur et direction. Sept ensembles différents sont observés.

 Ensemble correspondant à un affleurement stratifié et situé à une profondeur moyenne de 7,75m (Figure 50). Les strates qui forment cet affleurement ont une épaisseur comprise entre 0.05 et 0.10 mètres et leur direction est de 130°N environ.



Figure 50. Profil bathymétrique réalisé au dessus de l'ensemble 1 du relevé à haute densité. Les échelles verticales et horizontales ne sont pas respectées. Se reporter à la Figure 58 pour le positionnement exact du trait de coupe. Le 0 de l'abscisse du graphique correspond au symbole [0] indiqué sur la Figure 58. Voir description détaillée dans le texte.

2. Champ de dunes asymétriques composé de deux sous ensembles localisés à une profondeur moyenne de 6.52 mètres. La zone *a.*, la plus proche du rivage présente des dunes ayant une amplitude de 0.25 à 0.30 mètres avec une longueur d'onde moyenne de 100 mètres. La zone *b.* est composée de dunes plus importantes avec une amplitude de 0.50 à 1 mètres pour une longueur d'onde moyenne d'environ 100 mètres (Figure 51). La direction des dunes est de 42°N. En outre, une deuxième série de dunes plus petites existe. Cette deuxième série n'est pas encore totalement développée, il est donc difficile d'en déterminer ses propriétés. Cependant cela prouve l'existence de deux processus indépendants de mise en place de ces structures.



Figure 51. Profil bathymétrique réalisé au-dessus de l'ensemble 2 du relevé à haute densité. Les échelles verticales et horizontales ne sont pas respectées. Se reporter à la Figure 58 pour le positionnement exact du trait de coupe. Le 0 de l'abscisse du graphique correspond au symbole [0] indiqué sur la Figure 58. Voir description détaillée dans le texte.

3. Ensemble de dunes globalement asymétriques localisé à proximité du rivage et sub-perpendiculaire à ce dernier. Cet ensemble prend place par une profondeur moyenne de 2.74 mètres (Figure 52). Il est constitué de dunes ayant une amplitude de 0.25 à 0.30 mètres pour une longueur d'onde comprise entre 75 et 100 mètres. La direction générale est de 33°N. En outre, ce système est cannibalisé par un ensemble de dunes symétriques et asymétriques mais de direction inverse. Le processus de cannibalisation est partiel et démontre la brièveté des conditions responsables de ce processus qui pourrait être attribuable à une mise en place soit au cours de tempête soit sous l'influence des courants de marée.



Figure 52. Profil bathymétrique réalisé au dessus de l'ensemble 3 du relevé à haute densité. Les échelles verticales et horizontales ne sont pas respectées. Se reporter à la Figure 58 pour le positionnement exact du trait de coupe. Le 0 de l'abscisse du graphique correspond au symbole [0] indiqué sur la Figure 58. Voir description détaillée dans le texte.

- 4. Une barre d'avant côte rectiligne et continue qui borde la partie est du barachois de Paspébiac. Elle est rectiligne et continue dans la partie distale du barachois. Elle devient irrégulière et festonnée dans sa partie proximale près de la côte (Figure 46).
- 5. Champ de zostères au-devant de la plage à Norbert. L'avant plage de cette dernière est une zone sableuse de très faible inclinaison constituée de sables moyens à fins constituant une couverture sédimentaire de faible épaisseur qui laisse apparaître quelques affleurements de substratum rocheux de pendage subhorizontal le long de la plage à Norbert.
- 6. Flèche sableuse sous-marine d'environ 100 mètres de direction sud sud-ouest et d'une amplitude de 2 mètres. Elle est constituée de sables grossier et de graviers et prograde sur une base de sédiment fin. La taille et la direction de cette flèche sableuse sont extrêmement variables d'une année sur l'autre. En effet, en 1999, la

taille de la flèche était estimée à 300 mètres et de direction sud-ouest (Renaud, 1999).

7. Ensemble de dunes asymétriques situé à une profondeur moyenne de 5.81 mètres localisées au large de la flèche sableuse du barachois de Paspébiac. L'amplitude des dunes est comprise entre 1 et 2 mètres pour une longueur d'onde de 100 à 250 mètres (Figure 53). La direction de ces dunes est de 255°N.



Figure 53. Profil bathymétrique réalisé au-dessus de l'ensemble 7 du relevé à basse densité. Les échelles verticales et horizontales ne sont pas respectées. Se reporter à la Figure 58 pour le positionnement exact du trait de coupe. Le 0 de l'abscisse du graphique correspond au symbole [0] indiqué sur la Figure 58. Voir description détaillée dans le texte.

8. Zone sableuse plate ne présentant aucune structure sédimentaire particulière. Cette zone est bordée à l'ouest par la zone 1 et 2 et à l'est par des champs de laminaires et des affleurements de roches mères (Figure 67). Se sont des zones d'érosions et d'abrasions par les houles.

5.2.1.2. Comparaison des deux modèles et de l'effet de la différence de densité de points au sol sur les structures cartographiées

Les Figure 57 et Figure 58 présentent deux images de la même zone mais avec une densité de points au sol différente. Ainsi, la Figure 57 a une densité de 1 point.m⁻² alors que la figure Figure 58 a une densité de 0.5 points.m⁻². Il est donc légitime de se demander quelle densité de point est la plus adaptée pour l'étude morpho sédimentaire des fonds marins et surtout si une densité particulière permet de mettre en évidence des structures morpho sédimentaires particulières.



Figure 54. Comparaison de la différence d'élévation entre le modèle à haute densité (2x2 m) et le modèle à base densité (3x3 m). Le seuil de tolérance verticale est de 0.25 m. Toute variation entre les deux modèles, supérieure au seuil, est reportée sur l'image. Le bleu correspond aux variations positives, le rouge aux variations négatives, le gris aux variations inférieures au seuil de tolérance. Enfin le vert correspond aux zones ou les deux modèles ne se chevauchent pas (détails dans le texte).

Les élévations des deux modèles sont comparées. C'est pourquoi, il faut utiliser un modèle comme référence et base de comparaison. Dans ce travail, le modèle d'élévations de basse densité est pris comme référence. En outre, il faut définir un seuil de tolérance en dessous duquel les différences entre les deux modèles seront considérées comme non significatives. Pour cela, la précision verticale théorique du SHOALS est utilisée, soit

0.25 mètres. Sur la Figure 54, sont reportées en bleu les différences positives et supérieures au seuil de tolérance, entre le modèle et la référence. Le rouge correspond aux différences négatives et supérieures au seuil de tolérance entre le modèle et la référence. En gris sont reportées les variations inférieures au seuil de tolérance. Enfin, le vert représente les zones où il n'y a pas de chevauchement entre les deux modèles.

La majorité des différences observées sont de couleur rouge, c'est-à-dire que le modèle de haute densité présente des élévations inférieures au modèle de référence. En outre, les différences se concentrent dans les zones peu profondes sub-horizontales (la plage à Norbert), les zones de déferlement et au niveau de la zone *1* qui présente des stratifications. Les différences positives, peu répandues sur les fonds marins, sont localisées au niveau du champ de zostères et sur la barre d'avant côte au milieu de la zone située entre le camping et l'ancienne passe. Cette dernière est positionnée au niveau d'une zone rouge sur le côté est du barachois.

Ainsi, la comparaison des deux modèles met en évidence que l'ensemble des structures morpho sédimentaires est présente sur les deux modèles et de manière identique. Cependant, les structures fines, telles que des strates de faible épaisseur, sont mieux cartographiées par le relevé de haute densité. En effet, l'augmentation du nombre de points au sol limite l'effet de lissage de la topographie lors de l'interpolation entre les points. Cet effet est par ailleurs inévitable quelles que soient les méthodes d'interpolations utilisées et quelles que soient les échelles considérées.

5.2.1.3. Interprétation

i. Un essai de séquence de mise en place

L'observation des différents ensembles sédimentaires permet de proposer un ordre chronologique de mise en place (Figure 58).

• L'ensemble *1* est la structure la plus ancienne dans la zone considérée. En effet, cet ensemble est constitué de strates sub-horizontales de faible épaisseur (5 à 10 cm), c'est la structure la plus profonde de la zone et elle est partiellement recouverte par l'ensemble 2 dans sa partie ouest. L'explication géologique la plus vraisemblable de cet ensemble est qu'il s'agit de niveaux constitués par les dépôts grossiers, soit des cortèges prodeltaïques et deltaïques de la phase de régression où de la surface d'érosion (*Transgressive Flooding Surface*) mise en place durant la phase de transgression, du Quaternaire datée entre 8 et 10 ka (Long, 2006) (voir 3.1. Contexte géologique).

- L'ensemble 2 est vraisemblablement postérieur à l'ensemble 7 car il se situe à des profondeurs inférieures, même si la profondeur moyenne de l'ensemble 7 est supérieure au précédent. Cette profondeur moyenne résulte d'une plus grande tranche bathymétrique dans laquelle est identifié l'ensemble 2, ce qui diminue de façon statistique sa profondeur moyenne.
- Le système de barre d'avant côte 4 est postérieur à l'ensemble 2 puisqu'il le surmonte. Ce phénomène de superposition est particulièrement bien développé dans la partie distale du barachois (Figure 55).
- La barre d'avant côte présente des entailles (flèches sur la Figure 55) parfois assez importantes dues à la mise en place de l'ensemble 3, qui lui est donc postérieur ou concomitant.



Figure 55. Détail de la séquence de mise en place des différentes unités morphosédimentaires. L'ensemble 1 est représenté au dessus de la barre d'échelle. L'ensemble 2 est localisé dans la moitié inférieure de l'image et l'ensemble 3 est dans la partie supérieure de l'image. Enfin, la barre d'avant côte sur le côté gauche de l'image.

• Les ensembles 5 et 6 sont actuels et peut-être concomitant aux ensembles 3 et 4. En effet, il existe au niveau de la flèche sableuse une barre d'avant côte rectiligne(Figure 56) qui est très peu développée (2f) comparée à celle existante sur le côté est du barachois (1f). Il semble qu'elle soit soumise aux même processus hydrodynamiques que ceux qui ont permis la mise en place de barre. Cependant, son faible développement à ce niveau montre que la flèche est sous l'influence d'autres processus dominant (clapot et vagues courtes d'ouest).

Cet essai de chronologie qui indiquerait un ordre 1-7-2-(4-3-5-6) est plus présenté comme une hypothèse de travail à développer en fonction des analyses sédimentologiques et courantologiques, que comme un résultat définitif. Il indique cependant comment la qualité des indications morpho-sédimentaires issues du SHOALS peut venir en complément aux données sédimentologiques issues d'autres investigations, à la fois par la haute résolution des objets détectés et le fait de les voir en plan.

Enfin, le fait de déceler des strates plus anciennes à l'affleurement (ensemble 1) est un indicateur de l'action de courants actuels assez intenses pour pouvoir éroder les sédiments en laissant affleurer les sédiments sous-jacents et empêcher toute sédimentation actuelle en certains points de la surface considérée.



Figure 56. Vue en 3D de la flèche sableuse et du système de barre d'avant-côte du barachois de Paspébiac.

ii. Existence d'un double sens dans les champs de dunes à l'avant du barachois de Paspébiac : observation et interprétation

L'observation des structures morpho sédimentaires à l'avant du barachois de Paspébiac a mis en évidence que :

- l'ensemble 7, situé le plus au large, indique une direction est-ouest de mise en place des dunes. Les parties moins profondes de cet ensemble peuvent présenter des phénomènes de début de cannibalisation par un système de direction opposée.
- la zone 2 présente un deuxième système de dunes plus petites mais de direction ouest-est comme le système existant.
- l'ensemble 3 est un système mixte où les deux directions sont exprimées avec une légère dominance de la direction ouest-est.
- L'ensemble *4* présente une déstructuration de son organisation à l'est du barachois de Paspébiac près de la plage à Norbert.

Ce double sens est le résultat de deux processus existant sur la zone : la houle provenant du Golfe du Saint-Laurent et le clapot et les vagues courtes issus des vents dominants d'ouest dans la Baie des Chaleurs (Long, 2006). Ainsi, les houles d'ouest génèrent des courants de vent dont la vitesse peut atteindre jusqu'à 3% (exceptionnellement 5%) de la vitesse du vent, pouvant ainsi provoquer un remaniement du fond. En effet, Koutitonsky et al. (1991) ont montré qu'il pouvait exister des courants de 40-50 cm.s⁻¹ à des profondeurs de 30 m après une tempête de 3 jours consécutifs sur un ancien lobe deltaïque en érosion au sud de l'estuaire actuel de la Nathasquan sur la rive nord du Golfe du Saint Laurent. En outre, Héral (1994) a montré que le clapot pouvait également remanier le fond par des profondeurs de plus de 10 m dans le Perthuis d'Antioche sur la façade atlantique française.

Enfin, les jours avant le relevé LiDAR (le 1^{er} juillet 2006) plusieurs épisodes orageux en provenance de l'ouest se sont produits ayant même empêché l'avion de décoller plusieurs fois. Or, les vents liés à ces orages, d'une vitesse moyenne de 18.2 m.s⁻¹, ont crée une mer de vent qui pourrait être responsable de la création de ce type de courant sur la zone de relevé.

Ainsi, l'association de conditions météorologiques locales extrêmes avec des courants de remaniement, est responsable de l'existence d'une double direction.



Figure 57. Étude des différentes structures morpho sédimentaires à partir du relevé à haute densité (1 point.m⁻²). Une zone stratifiée (1), un système de barre d'avant côte(4) ainsi que 2 ensemble de dunes asymétriques(2, 3) sont mis en évidence. L'ensemble 2 présente deux sous ensembles (a et b). Les traits représentent les différents profils mesurés. Détails dans le texte.



Figure 58. Étude des différentes structures morpho sédimentaires à partir du relevé à base densité (0.5 point.m⁻²). Une zone stratifiée (1), un système de barre d'avant côte (4) ainsi que 3 ensembles de dunes asymétriques (2, 3, 7) sont mis en évidence. Les flèches indiquent la direction des courants qui ont mis en lace ces dunes. Les traits représentent les différents profils mesurés. Détails dans le texte.



Figure 59. Carte synthétique des différentes structures géomorphologiques existantes à l'avant du barachois de Paspébiac. Sont présentées ici la superficie couverte par chaque type de structure ainsi que la direction moyenne des courants qui les ont générés si valables. 1 : strates sableuses, 2 : dunes sableuses asymétriques (direction 2 N0, 3 : dunes sableuses asymétriques (direction 33 N), 4 : système de barre d'avant côte, 5 : champ de zostères, 6 : flèche sableuse dont la partie sud est immergée, 7. dunes sableuses asymétriques (direction 255 N), 8 : zone sableuse plate. Plus de détails dans le texte.

5.2.2. Description du site de Saint-Godefroi

Le site de Saint Godefroi, localisé à l'est du barachois de Paspébiac, se situe à la sortie de la Rivière-Nouvelle. La description de cette zone permet d'identifier plusieurs structures singulières. Sur la Figure 60 qui représente le modèle numérique d'élévations en 2D, l'échelle verticale est multipliée par 11. La description générale présente l'embouchure de la Rivière-Nouvelle avec deux chenaux clairement visibles qui diffèrent fortement dans leurs expressions morphologiques. Ainsi, le chenal situé à l'est a une apparence homogène et de texture lisse alors que le chenal ouest présente des structures ressemblant à des dunes (d'amplitude de l'ordre du mètre) dont les crêtes sont bien visibles.

5.2.2.1. Description (Figure 60)

Il est important de noter que seul les numéros de 1 à 5 sont liés aux numéros présentés dans la Figure 60.

- Cette structure est issue d'éboulements de la falaise dus aux différents processus d'érosion tels que l'action des vagues. Ici les éboulements sont encore en place, ce qui suggère que l'effondrement est relativement récent.
- 2. Ensemble de structures présentant des strates régulières ayant pour direction 85°N et situées à une profondeur moyenne de 1.33 mètres. Ces strates ont une épaisseur moyenne de 0,33m. Il s'agit fort probablement d'un affleurement de substratum rocheux constitué par la formation de Bonaventure (grès et conglomérats datant du Carbonifère). Cet affleurement devient prédominant sur sa partie orientale en raison de l'action érosive du chenal et il finit par disparaître sous un fin placage sédimentaire en provenance de l'est.
- 3. Les chenaux ouest et est sont tous deux marqués par une morphologie dissymétrique : la pente de leur flanc est est beaucoup plus accentuée que celle du flanc ouest. Cela traduit une érosion plus marquée sur l'un des flancs du chenal sous l'action des eaux en provenance de la Rivière-Neuve : cette observation est en accord avec la direction de cette rivière au moment de sa jonction avec la baie des Chaleurs.

- 4. L'existence de deux chenaux traduit des modifications de l'histoire géologique de cette zone. Les variations isostatiques liées à la période post-glaciaire (Long et al, 2006), en particulier le rebond glacio-isostatique, phase régressive située entre 8 et 10 ka, pourraient être à l'origine des modifications de position des chenaux qui ont emprunté les lignes de faiblesse du substratum rocheux.
- 5. Le chenal ouest présente des structures longitudinales en forme de bancs, à une profondeur moyenne de 6.32 mètres avec une longueur d'onde moyenne de 36.85 mètres et une amplitude moyenne de 0.39 mètres. La direction générale des crêtes de ces bancs est de 135°N. Cette direction est parallèle à la direction générale du chenal. Ces bancs peuvent correspondre à des figures d'érosions mise en place lors de la phase de regression marine ou bien à des dépôts remaniés de matériaux directement apportés par les eaux fluviatiles et repris par les houles. Il s'agirait de bancs longitudinaux de remplissage de chenal. Cependant, il faut prendre en considération l'asymétrie de ces bancs en coupe qui montre que le sens du courant responsable de leur mise en place est de 225°N ce qui correspond à un courant NE-SO.
- 6. Zone présentant des dunes d'orientation identique aux structures présentes dans le chenal ouest. Leur longueur d'onde moyenne est de 52.37 mètres avec une amplitude de 0.32 mètres. C'est une zone de placage sédimentaire de faible épaisseur, mise en place par un courant de dérive littorale de direction E-O. L'épaisseur du placage est de l'ordre du tiers de l'amplitude des dunes observées, soit 10 cm environ.
- 7. Accumulations sédimentaires au niveau des enrochements sur la côte. Ils mettent en évidence un processus de dérive littorale de direction E-O

5.2.2.2. Interprétation

Cette zone est soumise à un courant de dérive sédimentaire de direction générale E-O qui est souligné par les accumulations sédimentaires de type « plage » le long de la côte (5) au niveau des enrochements et épis rocheux. Au large, ce transport s'exprime par une migration de sédiment d'est en ouest sous la forme de dunes de faible amplitude et de très

grande longueur d'onde qui prennent l'aspect d'un fin couvert sédimentaire (4). Cette fine couverture sédimentaire traduit un apport sédimentaire très faible en provenance de l'est.

Le chenal est est probablement l'ancien chenal actif de l'embouchure de la Rivière-Nouvelle. En effet, il est possible que l'embouchure de la rivière ait migré au cours du temps sous l'influence de courants de dérive littorale plus forts que le débit de la rivière. Cette hypothèse est renforcée par la présence de deux chenaux bien distincts mais également par les chenaux plus petits visibles dans le marais situé à l'embouchure de la Rivière-Nouvelle ainsi qu'une petite rivière débouchant dans la partie est du marais.

Le chenal ouest est tapissé de structures sédimentaires en bancs et à l'aspect de dunes dissymétriques. Ces bancs peuvent correspondre à des figures d'érosions mise en place lors de la phase de regression marine ou bien à des dépôts sédimentaires remaniés. Dans ce dernier cas, cette accumulation sédimentaire est donc plus importante ou tout du moins plus active que celle existante dans le chenal est. Cette différence est le résultat de l'apport sédimentaire de la Rivière-Nouvelle. Bien qu'il n'existe aucune information sur le débit et la charge sédimentaire de cette dernière, il est ici indéniable qu'elle joue un rôle non négligeable dans l'approvisionnement du courant de dérive sédimentaire existant sur la zone.



Figure 60. Relevé de basse densité (LR) de la zone de Saint-Godefroi. Plusieurs types de structures sont visibles tels que des chenaux sous-marins, des affleurements de substratums rocheux et des dunes sableuses.



Figure 61. Détail des différentes coupes réalisées à l'avant de l'embouchure de la Rivière-Nouvelle. Pour l'échelle verticale des couleurs, se reporter à la Figure 60.



Figure 62. Profil bathymétrique réalisé au-dessus d'un affleurement de substratum rocheux à l'embouchure de la Rivière-Nouvelle. Le [0] reporté sur le trait de coupe 1 de la Figure 61 représente l'origine du profil.



Figure 63. Profil bathymétrique réalisé au-dessus des structures sédimentaires localisées dans le chenal ouest à l'embouchure de la Rivière-Nouvelle. Le [0] reporté sur le trait de coupe 2 de la Figure 61 représente l'origine du profil.



Figure 64. Profils bathymétriques parallèles réalisés au-dessus des chenaux sousmarins localisés à l'embouchure de la Rivière-Nouvelle. Le [0] reporté sur le trait de coupe 3a (bleu) et 3b (rouge) de la Figure 61 représente l'origine du profil.

5.2.3. Structures de dérives sédimentaires

L'étude des différentes structures sédimentaires le long du littoral permet de déterminer l'existence et la direction de processus hydrodynamiques qui existent sur la zone d'étude. Un descriptif des différents sites et de leurs structures morpho-sédimentaires est réalisé d'est en ouest entre Hope Town et Caplan (Figure 65). Une image, dont l'échelle verticale est amplifiée 10 fois, est utilisée pour chaque site. La description est contenue dans la légende de chaque image. Par la suite, une synthèse régionale est dressée et comparée aux résultats existants.



Figure 65. Sites d'étude des différents processus morpho-sédimentaires sur les zones de Paspébiac et de Saint-Siméon.

5.2.3.1. Hope Town



Figure 66. Accumulation sédimentaire au niveau de l'enrochement d'Hope Town. Le courant de dérive littorale est orienté NE-SO. La partie supérieure de l'image présente des taches ayant une texture plus rugueuse. Ce sont des champs de laminaires et/ou fucus. La zone présentant une texture lisse dans la partie supérieure de l'image est une zone sableuse. Dans la partie inférieure de l'image, la texture rayée correspond à des strates mises à l'érosion du substratum rocheux sous-jacent. L'échelle verticale est multipliée par 10.

5.2.3.2. Plage à Norbert



Figure 67. Accumulation sédimentaire au niveau de l'enrochement de la Plage à Norbert. Le courant de dérive littorale est orienté NE-SO. Le coin supérieur droit de l'image présente une texture plus rugueuse. Ce sont des champs de laminaires et/ou fucus. Le champ de zostère de la Plage à Norbert est visible sur le côté gauche de l'image. Enfin, les structures semi-circulaires qui traversent en diagonale l'image sont des artéfacts issue du balayage du scanner. L'échelle verticale est multipliée par 10.

5.2.3.2. Embouchure de la petite Bonaventure



Figure 68. Accumulation sédimentaire au niveau de l'embouchure de la petite Bonaventure. Le courant de dérive littorale orienté NO-SE est responsable de la mise en place de la flèche sableuse (a) qui barre l'embouchure de la rivière. La mise en place de cette flèche démontre le faible apport sédimentaire provenant de la rivière. De plus, le début d'un ancien chenal est visible au niveau de l'origine de la flèche. L'échelle verticale est multipliée par 10.

5.2.3.2. Port de Ruisseau-Leblanc



Figure 69. Port de Ruisseau-Leblanc. Ce port est aujourd'hui partiellement ensablé et inutilisé. Cette image réalisée à partir du relevé à haute densité présente un double phénomène. En effet, les accumulations sédimentaires de part et d'autre de la jetée du port montrent qu'il y a deux processus de dérives sédimentaires de direction ESE-ONO et de sens opposés sur cette zone ESE-ONO et ONO-ESE. Le trait de coupe (c) est présenté ci-dessous.



Figure 70. Profil bathymétrique de l'entrée du port de Ruisseau-Leblanc. Ce port a des problèmes importants d'ensablement. Un trait de coupe réalisé dans le long de l'entrée du port montre bien l'orientation de la progradation des dunes sableuses vers l'intérieur. Cette migration de direction ESE-ONO est l'expression d'un courant de dérive littorale de même direction. Les échelles verticale et horizontale de ce profil ne sont pas respectées.

5.2.3.2. Enrochement de Caplan



Figure 71. Enrochement de Caplan. L'accumulation sédimentaire sur le côté ouest de l'enrochement montre bien la direction de la dérive littorale. L'échelle reportée représente 200 mètres.

5.2.4. Discussion

La précision des données issues du SHOALS permet de mettre en évidence et d'établir les caractéristiques d'unités morpho-sédimentaires ainsi que leur répartition et leur évolution au cours du temps.

- La dynamique sédimentaire se traduit par des zones d'érosion (affleurement de socle ou de sédiments anciens), la formation de structures comme les flèches sableuses, les barres d'avant côte ou les champs de dunes (qui traduisent les directions de déplacement des masses d'eau) ou encore des chenaux fluviatiles et leur remplissage.
- Un essai de chronologie de ces mécanismes peut être tenté sur la base des relations topographiques et géométriques. Pour mieux contraindre ces données et ces hypothèses, il s'agit à présent d'utiliser les informations du SHOALS afin d'identifier la nature des structures identifiées.

5.3. Carte sédimentaires issue de la classification des données du SHOALS

Cette partie présente les résultats obtenus grâce aux différents algorithmes développés pour créer des cartes sédimentaires des fonds marins à partir de données du SHOALS. Dans un premier temps, une description de la méthode de fusion des différentes données utilisées est présentée. Dans un deuxième temps, un ensemble de résultats obtenus sur des zones tests de Paspébiac est présenté, suivi par les résultats globaux des zones de Paspébiac et de Saint-Siméon-Bonaventure. Troisièmement, une étude de la qualité des résultats obtenus pour chaque zone est réalisée. Enfin, une discussion sur l'efficacité et les limitations de cette méthode est abordée.

5.3.1. Méthode de fusion des données obtenues par les approches de modélisation et d'analyse du signal de retour du fond du SHOALS

Comme cela a été précisé auparavant (chapitre 4), deux approches d'étude du signal de retour du fond des données du SHOALS ont été développées. Une première méthode s'attache à modéliser le signal par une approche de mixture gaussienne et une deuxième méthode extrait le signal de retour du fond pour en caractériser sa forme grâce à un ensemble de paramètres morpho-statistiques.

De cette façon, deux modèles de classifications sédimentaires, qui présentent des similitudes et des différences, sont obtenus pour une même zone (Figure 72). Un modèle de classification sédimentaire est une image de (m x n) pixels dont la couleur de chaque pixel représente une classe sédimentaire déterminée. Ainsi, tous les pixels ayant comme attribut la classe « sable fin » auront une couleur bleu ciel (cyan dans la figure ci-dessous) et tous les pixels correspondant à des affleurements de substratum rocheux auront une couleur noire (dans l'exemple ci-dessous).

La fusion de ces deux modèles en un modèle unique permet d'intégrer les points forts de chaque modèle et de corriger les erreurs et dérives de ces derniers à l'aide d'autres modèles complémentaires.



Figure 72. Exemple des modèles sédimentaires obtenus par les deux approches sur le site de Paspébiac. Le modèle issu de la modélisation est dans la partie supérieure de la figure et le modèle résultant de l'analyse du signal est dans la partie inférieure. Les résultats obtenus sont très similaires. Ainsi la comparaison pixel à pixel est simple puisque dans la majorité des cas les deux pixels sont de classe identique. En outre, ces résultats bruts montrent des artefacts liés à l'algorithme de classification. Ces derniers devront être corrigés par la méthode de fusion des données.

La fusion de ces deux modèles se fait par une comparaison pixel à pixel dont le résultat est ensuite traité par un arbre de décision. La comparaison pixel à pixel des deux modèles produit trois types de résultats :

- Les deux pixels ont la même classe sédimentaire (sable fin, sable fin).
- Les deux pixels ont le même type de classe sédimentaire (sable fin, sable moyen par exemple).

• Les deux pixels ont des classes sédimentaires différentes (sable fin, affleurement de substratum rocheux).

Le cas 1 est le cas idéal, le modèle issu de la fusion aura la classe de départ. La situation 2 et 3 est un peu plus délicate parce qu'un retraitement de ces points est nécessaire avec l'aide d'autres informations afin de déterminer la classe sédimentaire qu'il faut attribuer au modèle final. Dans le cas 2, si aucun résultat concluant n'est obtenu avec l'apport des autres informations, alors la classe attribuée est une classe générique (« sable » dans notre exemple). Pour la situation 3, si aucun consensus n'est obtenu, alors la classe finale attribuée est « non classifiée ».

Les autres informations utilisées et intégrées à l'arbre de décision sont :

- la rugosité
- l'inclinaison de la pente et sa direction
- la densité de points au sol
- des masques binaires contraignant des zones géographiques et/ou une condition (Figure 73). Un masque binaire est une image noire et blanche qui exprime si une condition énoncée est réalisée (pixel blanc) ou non (pixel noir).



511730 W 55116730 W 55116730 W 55116730 W 651159 5511430 W 6511430 W 6511330 W 5511330 W 55112730 W 5511730 W 6511030 W 551030 W 551030 W 55130 W 55130 W 551330 W

Figure 73. Exemple de masque binaire réalisé à partir d'un filtre sur la rugosité. *Tous les pixels en blanc expriment une rugosité inférieure à 5 (*Figure 28)*. Ce masque permet de localiser des étendues homogènes composées de sables (toutes granulométries)* à l'avant du barachois de Paspébiac et le long du littoral. Il permet également de localiser les zones de mélanges sédimentaires (sables, galets par exemple) matérialisées par des zones grisées comme à l'est du barachois de Paspébiac. Le nord géographique est vers le haut de l'image. Ces paramètres, lorsqu'ils sont utilisés seuls, permettent de différencier correctement trois types de faciès, sables, galets et laminaires (Cottin et al., 2007), à partir de valeurs statistiques caractéristiques déterminées sur des zones tests (Tableau 6).

Tableau 6. Valeur moyenne maximum des différents paramètres caractérisant les ensembles sédimentaires déterminés à partir de zones tests. Ici seuls les faciès moyens sont exprimés. Ainsi, le faciès « sables » regroupe tous les sables dont la granulométrie est comprise entre moyen et fin. Le faciès « galets » est un ensemble issu d'un mélange de sédiments grossiers, d'affleurement de substratum rocheux et de tâches algaires éparses et peu denses. Le faciès « Laminaire » est également un ensemble de différents faciès comprenant des sables grossiers avec des graviers petits à moyens et une couverture de laminaires presque continue et dense. Les valeurs de rugosités n'ont pas d'unités, les angles (en valeur absolue par rapport à l'horizontale) et directions (par rapport au nord) sont en degrés et la densité de points n'a pas d'unité. Le terme « nd » signifie « non déterminé » parce il n'est pas possible d'attribuer une valeur statistiquement significative à la classe concernée en l'état actuel des recherches.

	Sables	Galets	Laminaires
Rugosité	5	11	23
Angle pente	1	2.1	4.8
Direction	42N et 130N	85N	160N
Densité points	nd	nd	≤10

Les valeurs du Tableau 6 ne peuvent donc être utilisées pour effectuer une classification sédimentaire fine. Ils constituent néanmoins une aide nécessaire pour résoudre les incertitudes des cas 2 et 3 précédemment mentionnés. En outre, il est possible de réaliser une carte sédimentaire synthétique simplifiée d'une zone à partir de ces valeurs de références (Figure 74).



Figure 74. Carte sédimentaire synthétique simplifiée de Paspébiac. En rouge sont exprimés les faciès de type « sables ». Le vert représente le faciès « galets » et les tâches bleues blanches expriment le faciès « laminaires ».

5.3.2. Exemple de classification sédimentaire fine obtenue sur des zones tests (avant application de la « méthode de fusion des données »).

La méthode a été présentée en détail dans le paragraphe « approche par images multibandes » et dont les principes généraux sont rappelés ici.

Des paramètres morpho-descriptifs du signal de retour du fond sont établis soit en modélisant le signal soit en l'extrayant. Chaque paramètre est par la suite tramé (réalisation d'une image à partir d'un nuage de points) créant ainsi un nombre d'images équivalent au nombre de paramètres générés précédemment. L'ensemble de ces images est concaténé pour créer une image multi-bandes (1 bande = 1 paramètre). Après avoir transformé chacune des bandes de cette image multi-bandes à l'aide d'une analyse en composante principale, les bandes les plus significatives (qui contiennent le plus d'informations) sont extraites et utilisées comme données de bases pour une procédure de classification supervisée. Cette dernière nécessite des zones d'apprentissages (zone dont la sédimentologie est considérée comme homogène) qui sont définies grâce à des photographies sous-marines, des échantillons sédimentaires et des lignes de relevés géophysiques (sonar latéral, Seistec-IKB).

Cette méthode de travail a donc été testée sur des petites zones afin de valider l'approche et de s'assurer de la qualité des résultats. Un ensemble de onze zones tests a été sélectionné sur le site de Paspébiac étant donné l'excellente qualité des données obtenues en raison des conditions environnementales du relevé (voir partie précédente, efficacité du système).

Trois résultats (Figure 75, Figure 77, Figure 79) sont présentés selon un ordre croissant du nombre de faciès sédimentaires (de 3 à 9) existant sur une zone. De plus, il s'agit de résultats de classification brute obtenus avant la « méthode de fusion » précédemment évoquée. La position des différentes zones est présentée dans la Figure 30. Afin de comprendre les images présentées ci-dessous, il est nécessaire de les commenter. L'image en noir et blanc représente la première bande de l'image multi-bandes après avoir subit une transformation en composante principale. Le paramètre correspondant à la première bande est le paramètre d'asymétrie du signal de retour du fond, soit le skewness. En vignette, ce sont les points de contrôles qui sont nécessaires à la classification supervisée. Il s'agit ici, soit de photographies sous-marines (Figure 75, Figure 77 et Figure 79), soit de courbes granulométriques réalisées à partir d'échantillons sédimentaires (Figure 77 et Figure 79). Le liseré de couleur entourant les vignettes, définit la couleur utilisée pour représenter une classe sédimentaire exprimée par l'image couleur dans la partie droite de l'exemple.

De plus pour chaque zone, une visualisation en trois dimensions (Figure 76, Figure 78 et Figure 80) dont l'échelle verticale a été exagérée 10 fois est présentée. Ces images sont des supports d'aide à la compréhension du modèle de fusion entre différentes sources de données. En effet, elles permettent de soulever des erreurs ou bien de mettre en évidence des dérives de la méthode de classification utilisée.

5.3.2.1. Classification sédimentaire fine de la zone 1 (Figure 75)

i. Description des trois faciès sédimentaires observés

- le premier faciès (f1) est constitué par une couverture algaire dense constituée de laminaires et des fucus.
- le deuxième faciès (f2) est un mélange d'affleurement de substratum rocheux d'une couverture disséminée et peu dense de laminaires.
- le troisième faciès (f3) est constitué d'un ensemble de galets dont la taille granulométrique s'étend de large à très large.

ii. Description des résultats

La répartition des faciès est dominée par f1 et f2 avec un faciès f3 très peu représenté. Or la partie inférieure de la Figure 75 regroupe, à priori (selon le paramètre skewness), les faciès f3 et f2 avec une domminance pour ce dernier. Le faciès f3, est largement sous estimé dans le réjsultat de la classification.

Les résultats présentés sur la Figure 75 indiquent l'existence d'une zone, située au-dessus de la surface d'apprentissage du f2, dans laquelle la densité de points est faible. Sur la

visualisation 3D de ce site (Figure 76), ces zones interpolées sont clairement visibles et sont exprimées par un ensemble de pics hérissés. Ces zones, en l'état actuel des connaissances, sont interprétées comme étant des champs d'algues de forte densité, puisque Kuus (2008) a montré en comparant les données du SHOALS avec des données de multifaisceaux sur le site de Saint-Siméon-Bonaventure, que les contours des trous des données SHOALS correspondaient aux limites des zones d'algues cartographiées avec le multifaisceaux. En outre, le faciès f2 est défini dans la partie supérieure de la zone. Or, dans les données de départ, il n'y a pas d'interpolation des données dans cette partie de la zone. Cependant, la vue 3D montre l'existence d'une zone exprimant des pics, mais qui sont plus denses et moins élevés que ceux précédemment observés. Il semble donc qu'il existe deux types de couverture algaires différents. La première, définie par le faciès f1 est un mélange de fucus et de laminaires. La deuxième, qui n'a pas été observée lors des investigations de terrain, semble être constituée majoritairement de laminaires, la densité de couverture de ce champ est probablement plus dense que celui de f1.

De plus les tâches noires de l'image de droite (Figure 75) représentent des zones « non classifiées ». La correspondance de ces zones « non classifiées » avec l'image de départ montre qu'elles correspondent à des taches claires non couvertes par les zones d'apprentissage. Il y a donc ici une quatrième classe dont il n'est pas possible de déterminer la nature sédimentaire en l'état actuel des investigations.

La précision globale de la classification est de 48%. Afin d'améliorer ce résultat, deux nouveaux faciès, f4 et f5 sont intégrés, ils correspondent à des fortes concentrations de laminaires denses et une autre classe sédimentaire non définie en l'état actuel.



Figure 75. Résultat de classification sédimentaire supervisée sur la sous zone 1. L'image de gauche présente le paramètre morphologique skweness avec les différents points d'apprentissage. Les figures du centre sont les points d'apprentissages et l'image de droite est le résultat de la classification.



Figure 76. Vue en 3D de la sous zone 1. *Les différentes textures permettent de mettre en évidence les limitations de l'algorithme de classification supervisée.*
5.3.2.2. Classification sédimentaire fine de la zone 7 (Figure 77)

i. Description des cinq faciès sédimentaires observés

- le premier faciès (f1) est constitué de sables très fins, de silts et de petits graviers.
- le deuxième faciès (f2) est un mélange de sables très fins, recouvrant des sédiments grossiers, avec une couverture relativement dense de fucus et de laminaires.
- le Troisième faciès (f3) est constitué par une association de sables grossiers et de galets de taille moyenne à large.
- le quatrième faciès (f4) est un ensemble de sables fins avec graviers et galets.
- le cinquième et dernier faciès (f5) est constitué de sables grossiers.

ii. Description des résultats

Les résultats montrent que l'ensemble des cinq faciès sédimentaires est représenté et en accord relatif avec les sites d'apprentissage. Cependant, deux artéfacts peuvent être observés.

Dans la partie supérieure de l'image (Figure 77), les zones d'apprentissages f1 et f2 se chevauchent faiblement. Il en résulte une distribution bimodale de la tache blanche en forme de « c ». Or l'observation de la vue 3D (Figure 78) montre clairement que cette zone en forme de « c » est de texture lisse et homogène et correspond à f1. En revanche, l'intérieur de ce « c » possède une texture rugueuse (présence de pics denses et peu élevés) et correspond à f2. C'est pourquoi, la distribution bimodale de cette zone est une erreur et seule la classe f1 devrait lui être attribuée et cette zone devrait apparaître entièrement en rouge.

En outre, comme dans l'exemple précédent, il existe une zone d'interpolation au centre de l'image. La vue en 3D présente des pics peu nombreux et plus élevés que ceux de la classe f2. Il semble donc, qu'une autre classe non définie, correspondant à des champs de laminaires, soit présente.

Le deuxième artefact correspond à l'inversion de faciès qui existe entre la position des sites d'apprentissages et le résultat obtenu. En effet, dans le bas de la Figure 77 le faciès f4 est situé « au-dessus » du faciès f5. Or dans le résultat, la position des faciès est inversée et f5 est situé « au-dessus » de f4. De plus, la zone correspondant au faciès f5 (limite inférieure de l'image) est presque totalement effacée du résultat et déplacée « au-dessus » de f4. Il est difficile de conclure si cela est une erreur ou non de la part de l'algorithme puisque aucun prélèvement n'existe « au-dessus » du faciès f4.

La précision globale de la classification est de 67%. Afin d'améliorer cette dernière, il serait nécessaire d'intégrer la classe manquante correspondant à des champs de laminaires. Il serait également important de mieux comprendre s'il y a une inversion entre les positions de f4 et de f5. Il pourrait également être proposé de déplacer la zone d'apprentissage de f5 « au-dessus » de f4.



Figure 77. Résultat de classification sédimentaire supervisée sur la sous zone 7. L'image de gauche présente le paramètre morphologique skewness avec les différents points d'apprentissage. Les figures du centre sont les points d'apprentissages et l'image de droite est le résultat de la classification.



Figure 78. Vue en 3D de la sous zone 1. Les différentes textures permettent de mettre en évidence les limitations de l'algorithme de classification supervisée.

5.3.2.3. Classification sédimentaire fine de la zone 8 (Figure 79)

i. Description des faciès neuf sédimentaires observés

- le premier faciès (f1) est constitué de sables fins à très fins.
- le deuxième faciès (f2) est composé de sables fins avec des granules.
- le troisième faciès (f3) représente un couvert végétal constitué de fucus et de laminaires.
- le quatrième faciès (f4) est constitué d'un ensemble de graviers moyens à très larges avec une couverture éparse d'Ulvae lactiqua (Algue verte (Chlorophycées) communément appelée *laitue de mer*).
- le cinquième faciès (f5) est similaire à f4 mais ne contient aucune Ulve.
- le sixième faciès (f6) est un affleurement de substratum rocheux avec quelques Ulves
- le septième faciès (f7) est également un affleurement de substratum rocheux avec des blocs mais sans présence d'algues.
- le huitième faciès (f8) est composé de sables fins avec des graviers moyens à larges.
- le neuvième faciès (f9) est un mélange de sables fins avec des granules et des débris de coquilles.

ii. Description des résultats

L'ensemble des faciès observés par les données de terrain est représenté dans le résultat. Cependant, comme précédemment, quelques phénomènes présents dans le résultat soulignent des artéfacts liés à la méthode utilisée.

Le faciès f5, qui a été observé au centre de l'image (Figure 79) grâce à des photographies sous-marines, est peu exprimé à cet endroit, mais se retrouve dans les zones d'interface entre deux faciès.

De la même manière, dans le bas de l'image, le faciès f3 est exprimé. Or, sur la vue en 3D (Figure 80), ce faciès est bien caractérisé par une texture relativement rugueuse

par rapport au reste de la zone. Sa texture, constituée de pics de faible amplitude mais en nombre relativement important, est l'expression d'une zone de fucus possédant quelques laminaires. Or, selon le résultat, cette texture devrait se retrouver dans le bas de l'image, ce qui n'est pas le cas. Ainsi, le faciès f3 exprimé dans le bas de l'image est une erreur.

De plus, la même hypothèse que dans les exemples précédents peut-être proposée. Il semble exister deux populations d'algues différentes : une constituée de fucus et de laminaires et une autre de laminaires uniquement. Cette dernière n'est toutefois pas cartographiée.

Enfin, même si l'algorithme de classification éprouve quelques difficultés dans certaines situations particulières, il est tout de même important de souligner son efficacité à mettre en évidence la transition entre les faciès f1 et f2. En effet, ces deux faciès sont très similaires d'un point de vue sédimentaire, ce qui pour l'algorithme de classification peut représenter une limitation potentielle quant à la distinction de ces faciès. Dans cet exemple, cela a été réalisé avec succès et cette transition est exprimée dans la vue 3D, où le changement de texture est visible.

La précision globale de la classification pour cette zone est de 65%. Afin d'améliorer cette dernière, il serait nécessaire d'intégrer la classe manquante correspondant aux champs de laminaires.



Figure 79. Résultat de classification sédimentaire supervisée sur la sous zone 8. L'image de gauche présente le paramètre morphologique skewness avec les différents points d'apprentissage. Les figures du centre sont les points d'apprentissages et l'image de droite est le résultat de la classification.



Figure 80. Vue en 3D de la sous zone 1. Les différentes textures permettent de mettre en évidence les limitations de l'algorithme de classification supervisée.

5.3.3. Cartes sédimentaires proposées pour l'ensemble des sites d'étude

Les deux cartes sédimentaires proposées pour les sites de Paspébiac et de Saint-Siméon-Bonaventure sont présentées aux Figure 83 et Figure 85.

Ce sont des cartes globales issues de la « méthode de fusion des données » précédemment exposée.

Tout d'abord, il convient de décrire ces cartes sédimentaires et leurs caractéristiques, puis les problèmes rencontrés pour réaliser ces cartes.

5.3.3.1. Description

Les cartes ci-dessous sont des cartes sédimentaires des zones sous-marines à l'avant des sites de Paspébiac et de Saint-Siméon-Bonaventure. En outre, les classifications réalisées ne concernent que les faciès marins. C'est pourquoi, seule la partie marine des site est représentée sur les carte. Le trait de côte (niveau zéro) est matérialisé par la partie supérieure des cartes.

i. Site de Paspébiac : cartes brutes avant fusion des données (Figure 72)

Avant de décrire les cartes sédimentaires finales proposées, il est important de décrire brièvement, à titre d'exemple, les deux cartes brutes (avant fusion des données) obtenues pour la zone de Paspébiac (Figure 72).

- Les deux cartes obtenues sont extrêmement similaires et leurs différences restent subtiles et par conséquent, très difficilement discernables à l'œil nu.
- En outre, ces deux modèles présentent des erreurs et des limitations évidentes qu'il faut corriger par le processus de fusion. La première erreur est une surestimation de la couverture des laminaires (en blanc) près de la zone littorale. La deuxième limitation des modèles est qu'ils présentent des zones de laminaires et d'affleurement de substratum rocheux (en noir) à l'avant du barachois de Paspébiac. Or, cette zone est entièrement sableuse. Il est donc nécessaire de mettre une limite ouest quant à la répartition géographique des laminaires et du substratum rocheux.
- Enfin, il semble exister une corrélation entre la bathymétrie et la répartition des faciès sédimentaires. Cependant, lors de la sélection des bandes utilisées pour la

classification supervisée, la bande « profondeur » a été délibérément omise afin de s'affranchir de ce paramètre. En effet, aucune correction du signal de retour en fonction de la profondeur n'a été effectuée, ce qui a certainement engendré une corrélation entre la profondeur et le signal de retour. Cependant, il existe de façon naturelle, une relation entre la profondeur et la répartition granulométrique des sédiments. Ainsi, une estimation de la validité de la répartition sédimentaire en fonction de la profondeur est tentée par la suite.

- En outre, cette répartition sédimentaire en fonction de la bathymétrie se retrouve sur les cartes sédimentaires proposées pour les sites de Paspébiac et de Saint-Siméon-Bonaventure (Figure 83, Figure 84 et Figure 85).
- Deux détails de la carte sédimentaire complète proposée pour la zone de Paspébiac sont présentés avec une superposition d'isobathes afin d'étudier la corrélation existant entre la répartition des faciès sédimentaires obtenue par la méthode de fusion des données avec la bathymétrie. Les zones détaillées sont situées à l'avant de la partie est du barachois de Paspébiac (Figure 81) et à l'embouchure de la Rivière-Nouvelle (Figure 82). Les isobathes correspondent aux profondeurs suivantes : 0 m, -2 m, -4 m, -7 m, -9 m, -10 m et -12 m. Chaque couleur de la carte correspond à un faciès sédimentaire qui est précisé sur la carte complète (Figure 83). Ainsi, la répartition des faciès sédimentaires en fonction de la profondeur est très nette sur les exemples présentés ci-dessous. Il est donc possible de déterminer pour chaque faciès une tranche bathymétrique d'existence pour la zone de Paspébiac (Tableau 7).

Tableau 7. Faciès sédimentaire et tranche bathymétrique d'existence pour la zone de Paspébiac. Ce tableau présente les différents faciès sédimentaires existant sur la zone de Paspébiac ainsi que leur répartition bathymétrique proposée dans la carte sédimentaire complète (Figure 83).

Profondeur	<i>Faciès exprimés</i> Sable, laminaires et fucus Sable très fin, fin, moyen, grossier et galet		
0-4 m			
4-7 m			
7-10 m	Substratum rocheux et galet		
10-12 m	Sable moyen, grossier et galet		



Figure 81. Détail de la carte sédimentaire complète de Paspébiac proposée en Figure 83 avec une superposition d'isobathes. La zone présentée est centrée sur la partie est du barachois de Paspébiac. Les courbes bathymétriques présentées ici correspondent à : 0 m, -2 m, -4 m, -7 m, -9 m, -10 m et -12 m. Il semble exister une corrélation entre la répartition bathymétrique des sédiments et la profondeur.



Figure 82. Détail de la carte sédimentaire complète de Paspébiac proposée en Figure 83 avec une superposition d'isobathes. La zone présentée est centrée sur l'embouchure de la Rivière-Nouvelle près de Saint-Godefroi. Les courbes bathymétriques représentées ici correspondent à : 0m, -2m, 4-m, -7m, -9m, -10m et -12m. Il semble exister une corrélation entre la répartition bathymétrique des sédiments et la profondeur.

ii. Site de Paspébiac : deux cartes sédimentaires proposées après fusion des données

- Le nombre de faciès original été établi à douze pour l'ensemble de la zone de Paspébiac. La carte sédimentaire obtenue et non présentée ici était peu satisfaisante puisqu'elle présentait beaucoup d'artefacts et de dérives. En outre, la carte finale était difficilement interprétable à cause du manque de synthèse. De plus, la précision globale de ce modèle était alors de 17%, ce qui est inacceptable.
- La Figure 83 présente une carte sédimentaire avec neuf faciès sédimentaires différents. Ces neuf faciès sont le résultat d'une synthèse légère des douze faciès originaux. Il y a quatre faciès dans les sables (de très fins à grossiers), deux faciès pour les algues (laminaires et fucus) et deux faciès représentés par les affleurements de substratum rocheux et les galets. Enfin, un dernier faciès (sable) est l'expression des contraintes imposées au résultat brut lors de la fusion des données. Cette carte est la plus complète des deux cartes proposées et synthétise de façon détaillée les observations de terrain. Sa précision globale est de 45% selon la matrice de confusion.
- La Figure 84 représente une carte sédimentaire synthétique qui a regroupé différentes classes similaires de la carte précédente et en accord avec les grandes classes sédimentaires présentées dans « la carte de distribution des sédiments de surface » de Long (2006). Il y a donc quatre faciès exprimés qui représentent les grands ensemble sédimentaires présents sur la zone. Ainsi, il n'y a qu'un faciès « sable » qui regroupe tous les ensembles sableux (de très fins à grossiers) de la carte précédente plus le faciès générique « sable ». Les quatre autres faciès sont ceux exprimés dans l'autre carte (laminaires, fucus, Roc, Galets). La précision globale de cette carte synthétique est de 53% selon la matrice de confusion.
- Grâce à la méthode de « fusion des données » développée dans cette thèse, il est possible de faire une distinction entre les laminaires (blanc) et les fucus (cyan)

existant sur les zones proche des littoraux. Cette différenciation est essentiellement basée sur la rugosité ainsi que sur l'amplitude et la densité des pics visibles sur les modèles en 3D.

- Les deux modèles présentent une ligne blanche localisée au niveau du trait de côte (partie supérieure de la carte) entre la Plage à Norbert et Rivière-Nouvelle. Cette ligne blanche est un artefact et ne représente en aucun cas des zones de laminaires.
- Il existe une variation granulométrique des sables au niveau du barachois de Paspébiac en fonction de la profondeur (Figure 83). Or cette répartition présente une progression des sédiments fins vers des sédiments plus grossiers avec une augmentation de la profondeur. Or, théoriquement, la taille granulométrique des sédiments diminue avec l'augmentation de la profondeur. Cette variation obtenue sur la carte sédimentaire est comparée, par la suite, à celle observée sur le terrain grâce aux échantillons prélevés.







Figure 84. Proposition de carte sédimentaire simplifiée pour le site de Paspébiac

<u>iii. Site de Saint-Siméon-Bonaventure : carte sédimentaire proposée après fusion des données</u>

Pour le site de Saint-Siméon-Bonaventure, seule la carte de synthèse finale est proposée. La Figure 85 comme la figure précédente, est en accord avec les faciès présentés dans la « carte de distribution des sédiments de surface » de Long (2006). Cette synthèse est effectuée ici afin de pouvoir comparer les deux cartes.

- Le faciès « roc » regroupe les affleurements de substratum rocheux mais également les zones de laminaires et celles de laminaires et fucus. Le faciès « gravier » correspond à des faciès de galets observés sur le site d'étude. Enfin le faciès « sable » regroupe les différents ensembles granulométriques de sables observés sur la zone (majoritairement des sables grossiers) ainsi que les graviers.
- La zone couverte par la carte est inférieure à celle couverte sur le site de Paspébiac, alors que la zone de relevé était de même superficie. Cela montre qu'une quantité importante de points a été enlevée du jeu de données final. Ce phénomène est particulièrement important sur la zone à l'est du marais de Saint-Siméon.
- De la même manière que pour le site de Paspébiac, la répartition générale des sédiments est longitudinale, sub-parallèle à la côte et en relation directe avec la bathymétrie. Ainsi, l'organisation de cette carte synthétique est relativement simple. En outre, la précision générale de la carte est estimée à 55% selon la matrice de confusion.
- Cette organisation longitudinale est très bien respectée dans la partie ouest de la carte. En revanche, les limites, « gravier-roc » et « sable-gravier », présentent des circonvolutions importante dans la zone est de la carte au niveau du village de Bonaventure et de l'embouchure de la rivière Bonaventure.



Figure 85. Proposition de carte sédimentaire pour le site de Saint-Siméon-Bonaventure.

5.3.3.2. Problèmes rencontrés pour réaliser ces cartes

Bien que les différents problèmes rencontrés lors de la réalisation de ces cartes ont déjà été présentés dans le paragraphe « 4.2.6.6. Généralisation de la procédure pour l'ensemble des zones d'études», ils sont rappelés ci-dessous.

- **Partitionnement de la zone d'étude.** En effet, un problème informatique a nécessité le partitionnement d'une zone en sous zones avant de les regrouper pour faire une carte globale. Cette procédure est responsable de la coupure (ligne droite d'une certaine épaisseur sur laquelle il n'y a pas de données). En dehors du temps nécessaire au partitionnement du fichier original et à la manipulation de ces derniers, le temps de calcul pour une zone reste excellent, environ 10 minutes.
- Sélection des bandes statistiquement significatives de la transformée en composante principale. Effectivement, l'algorithme de classification supervisée qui utilise des images multi-bandes nécessite au préalable que les bandes de l'image soient décorrélées pour extraire le maximum d'informations statistiques de chaque bande. Pour cela, une transformée en composante principale de l'ensemble des bandes est réalisée. Ainsi pour un ensemble de onze bandes, seules quatre ou plus peuvent représenter toute l'information nécessaire à la classification supervisée : ce sont les variables synthétiques. Il est ainsi nécessaire de faire un choix de quatre bandes, ou plus, parmi les onze disponibles. La pertinence de ce choix déterminera la qualité du résultat de la classification supervisée. Or, pour les zones tests, chacune d'elles avait sa propre transformation et donc sa sélection de bandes, ce qui va à l'encontre de la généralisation. Il est en effet nécessaire de faire une sélection qui fera consensus pour l'ensemble des zones. Ce choix va inévitablement favoriser certaines zones et donc certains faciès au détriment d'autres. Cette sélection aura une influence sur la qualité finale du résultat obtenu.
- Diminution du nombre de faciès. Le nombre de faciès a été réduit étant donné que d'un point de vue sédimentologique, plusieurs faciès des zones tests étaient très similaires voire identiques. Ainsi, à des fins de clarification et de synthèse du résultat, il est suggéré de fusionner les faciès sédimentaires de nature très similaires.

• Existence de variations et/ou de chevauchements dans l'expression de certains faciès. Il peut arriver que deux faciès, ou plus (pas forcement de nature sédimentaire identique), donnent une réponse similaire à un faisceau laser. Dans ce cas, il devient quasiment impossible de séparer statistiquement ces différents faciès. S'il s'agit de faciès ayant une nature sédimentaire relativement similaire, il est suggéré de les regrouper. S'il s'agit de faciès de natures différentes, il faut utiliser la « méthode de fusion des données » pour lever les incertitudes et contraindre l'algorithme à des zones géographiques d'existence de certains faciès.

5.3.3.3. estimation de la qualité des résultats obtenus

Des moyens statistiques tels que la matrice de confusion (présentée au 4.2.6.3.*iii. Calcul de la matrice de confusion pour estimer la qualité du résultat*), le coefficient kappa ou la précision globale, sont des moyens courants pour évaluer la qualité d'un processus de classification.

La matrice de confusion est un moyen statistique de connaître la redistribution des points à l'intérieur d'une zone d'apprentissage correspondant à une classe dans les autres classes. En effet, une zone d'apprentissage représente, idéalement, une surface sur laquelle les propriétés sédimentologiques sont identiques. Ainsi, à l'issue du processus de classification, tous les points contenus à l'intérieur d'une zone d'apprentissage devraient avoir, en théorie, la classe correspondant à la zone d'apprentissage. Il arrive cependant, que plusieurs de ces points soit reclassés dans des classes différentes. La matrice de confusion permet d'avoir une estimation chiffrée classe par classe de ces reclassements. Au-delà de la qualité du résultat, cela permet également d'évaluer la qualité des zones d'apprentissage utilisées. En effet, si au terme de la procédure de classification, un pourcentage important (supérieur à 60%) des points sont reclassés, alors il faut

Un autre moyen de déterminer la qualité et la pertinence des résultats obtenus est de confronter les cartes sédimentaires avec les points de contrôles disponibles. Il s'agit ici, de comparer les résultats avec des photographies sous-marines, des échantillons sédimentaires et des lignes de sonar à balayage latéral pour la zone de Paspébiac. Pour le

reconsidérer, si possible, la définition de la zone d'apprentissage considérée.

site de Saint-Siméon-Bonaventure, la carte sédimentaire obtenue est comparée à un ensemble de photographies sous-marines et à la « carte de répartition des sédiments de surface » de Long (2006).

Cette dernière méthode est préférée étant donné quelle fait appel à des données de terrain vérifiées et sûres alors que la première méthode se base sur une analyse statistique des zones d'apprentissage. Or, les résultats de ces méthodes statistiques sont fonction du soin apporté à la définition des zones d'apprentissage et donc de leurs qualités statistiques. En outre, il existe des outils permettant de déterminer cette qualité, comme l'indice de séparabilité (4.2.6.3.ii. Calcul des indices de séparabilité des régions d'apprentissages.).

i. Site de Paspébiac

La Figure 86 présente les points de contrôle disponibles pour la zone de Paspébiac. Ces points sont de deux types, photographies sous-marines (croix) et lignes de relevés de sonar à balayage latéral (losanges). Les photographies sous-marines sont localisées dans la zone située entre la partie est du barachois de Paspébiac et l'embouchure de la Rivière-Nouvelle à l'est, alors que les relevés de sonar sont concentrés sur la zone comprise entre la partie ouest du barachois de Paspébiac et New-Carlisle. Les couleurs utilisées pour chaque symbole correspondent à la couleur du faciès présenté dans les cartes sédimentaires.



Figure 86. Localisation des différents points de contrôle relevés sur la zone de Paspébiac. Les croix représentent les photographies sous-marines alors que les losanges représentent des lignes de sonar à balayage latéral. Les photographies sousmarines sont concentrées dans la zone situées entre la partie est du barachois de Paspébiac et l'embouchure de la Rivière-Nouvelle. Les relevés de sonar à balayage latéral sont concentrés sur la zone comprose entre la partie ouest du barachois de Paspébiac et New-Carlisle à l'ouest. Le fond de la carte représente l'elevation obtenue à partie des données SHOALS.

214

Tableau 8. Corrélation entre les points de contrôle issus des photographies sousmarines et la carte sédimentaire complète proposée pour la zone de Paspébiac. Les colonnes représentent les faciès définis par les photographies. Les lignes sont les faciès proposés par la carte sédimentaire. Il faut noter que les nombre final de faciès de la carte sédimentaire est plus grand que celui des photographies sous-marines parce que une distinction est faite entre les laminaires et les fucus et il existe un faciès supplémentaire : « sable » générique. Une station représente une photographie. La position des stations est présentée sur la Figure 86.

	Roc	laminaires	Galet	Sable grossier	Sable moyen	Sable fin	Sable très fin
Roc	65%	8%	25%	-	-	10%	-
laminaires	12%	50%	-	-	-	5%	-
fucus	12%	17%	-	5 -	-	10%	18%
Galet	-	-	63%	-	-	5%	9%
Sable	6%	-	-	50%	-	45%	18%
Sable grossier	×	-	-	50%	-	-	9%
Sable moyen	6%	17%	12%	-	100%	5%	9%
Sable fin	1	-	-	-	-	15%	18%
Sable très fin	-	8%	-		-	5%	18%
Nombre de stations	51	36	24	6	6	60	33

Tableau 9. Corrélation entre les points de contrôle issus des photographies sousmarines et la carte sédimentaire simplifiée proposées pour la zone de Paspébiac. Les colonnes représentent les faciès définis par les photographies. Les lignes sont les faciès proposés par la carte sédimentaire

	Roc	laminaires	Galets	Sable
Roc	70%	9%	12%	14%
laminaires	6%	33%	-	-
fucus	12%	33%	-	14%
Galet	(.	-	63%	14%
Sable	12%	25%	25%	58%
Nombre de stations	51	36	24	105

i.1. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des photographies sous-marines collectées pendant la campagne 2007.

Le Tableau 8 présente une estimation de la répartition des faciès observés sur les photographies sous-marines par rapport aux résultats proposés par la carte sédimentaire complète de Paspébiac.

- La majorité des faciès cartographiés regroupent plus de 50% des photographies correspondantes. Il y a deux exceptions : les faciès « sable fin » et « sable très fin » regroupent respectivement 15% et 18% des photographies.
- 45% des photographies du faciès « sable fin » est cartographié comme du « sable » et les photographies du faciès « sable très fin » sont réparties dans toutes les classes de façon homogène.
- 67% des photographies correspondantes au faciès « laminaires » sont cartographiées comme des laminaires (50%) et des fucus (17%).
- 100% des photographies du faciès « sable moyen » sont attribuées à la même classe.
- 25% des photographies du faciès « galet » sont attribuées au faciès « roc ». La distinction entre ces deux faciès est toujours délicate.
- La précision globale pour chaque faciès est de : roc=65%, laminaires=67%, galet=63%, sable=74%.

De la même manière, le Tableau 9 présente une estimation de la répartition des faciès observés sur les photographies sous-marines par rapport aux résultats proposés par la carte sédimentaire simplifiée de Paspébiac, en particulier :

- La carte regroupe plus de la moitié du nombre de photographies d'un faciès.
- Contrairement aux résultats précédents, les sables sont également bien distribués.
- Le faciès « galet » n'est pas mélangé avec les faciès « roc » et « laminaires » comme précédemment.
- Les photographies du faciès « roc » ne sont jamais cartographiées comme « galet ». En revanche, une partie du faciès « galet » et toujours attribuée au faciès

« roc »

- Le faciès laminaires, regroupe 66% des photographies correspondantes et est distribué équitablement entre les faciès « laminaires » et « fucus ». Alors que seulement 9% est attribué au faciès « roc » contre 25% pour le sable.
- La précision globale pour chaque faciès est : roc=70%, laminaires=66%, galet=63%, sable=58%.

Les résultats montrent qu'il y a une bonne corrélation entre les photographies de terrain et les cartes sédimentaires proposées. En effet, un pourcentage supérieur à la moyenne est atteint dans la grande majorité des cas. Seules deux exceptions existent pour les faciès « sable fin » et « sable très fin » de la carte complète.

En outre, la simplification d'une carte sédimentaire améliore la qualité de certains résultats (comme pour le faciès « roc »), ne change rien ou bien la diminue. Ces variations ne sont pas encore bien comprises en l'état actuel.

i.2. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des relevés de sonar à balayage latéral réalisés pendant l'été 2005.

L'interprétation des données du sonar à balayage latéral a été synthétisé afin d'avoir une correspondance entre les faciès des différentes données. Le

Tableau 10 présente cette comparaison.

- Il n'y a pas de correspondance entre les faciès « roc ». En effet, les points de sonar à balayage latéral déterminés comme étant du « roc » sont répartis dans le faciès « fucus » et « sable ».
- De même pour le faciès « sable », il n'y a pas de correspondance entre les deux faciès similaires. Les points « sable » sont répartis entre les faciès « roc », « laminaires » et « fucus ».
- Seules les algues présentent une corrélation entre les deux sources de données puisqu'elles regroupent les faciès « laminaires » et « fucus ».
- L'analyse de la position des lignes de relevés indique un décalage entre les deux jeux de données. Ce décalage a probablement un impact quant à la qualité des

corrélations, mais ne justifie pas à lui seul cette mauvaise corrélation.

• La position des différents faciès déterminés par l'analyse des données tend à montrer une certaine organisation des faciès selon la profondeur.

Tableau 10. Corrélation entre les points de sonar à balayage latéral issus de la campagne de relevés de 2005 et la carte sédimentaire simplifiée proposée pour la zone de Paspébiac. Les colonnes représentent les faciès définis par l'interprétation des données provenant du sonar latérale et des photographies sous-marines. Les lignes sont les faciès proposés par la carte sédimentaire

	Roc	Sable	Algues
Roc	-	36%	-
laminaires	-	9%	40%
Fucus	75%	15%	60%
Galet	-	-	-
Sable	25%	-	-
Nombre de stations	8	405	5

La corrélation entre les données de sonar à balayage latéral et la carte sédimentaire simplifiée proposée n'est pas bonne. Deux raisons peuvent être évoquées. La première est un problème de positionnement, mise en évidence sur la figure 86 ou les lignes de relevés passe au-dessus des digues du port de Paspébiac. Cette différence est probablement due au fait que les données du DGPS enregistrées lors de la campagne de relevé du sonar à balayage latérale n'ont pas était corrigées avec les données d'une station de base. La deuxième est un problème d'interprétation des données du sonar. En effet, l'interprétation se fait visuellement en observant les variations relatives de nuances de gris sur les rouleaux papier d'enregistrements, ce qui laisse place à une part d'interprétation subjective. De plus, chaque rouleau a sa propre tonalité qui est le résultat des réglages (gain d'entré, contraste du tracé, etc.) du système pour un relevé donné en fonction des conditions environnementales, ainsi, d'un rouleau à l'autre le même faciès peut ne pas avoir les mêmes nuances de gris moyen.

i.3. Comparaison de la carte sédimentaire proposée avec des échantillons sédimentaires (Figure 87) collectés pendant la campagne 2007.

Il est intéressant d'étudier la zone sableuse située à l'avant de la partie est du barachois de Paspébiac. En effet, la collecte d'échantillons sédimentaires dans cette zone a montré qu'il existe une variation granulométrique de faciès avec la profondeur. Il s'agit ici de mettre en relation ces variations avec celles observées sur la carte sédimentaire proposée et ainsi de déterminer la corrélation qui existe entre les résultats obtenus par ces deux approches.

Cinq faciès ont été observés et sont présentés (Figure 87). D'une manière générale, dans les zones peu profondes, les sables fins mélangés avec des graviers, les granulets et les galets dominent. Ces ensembles alternent avec des sables grossiers. Puis, à une plus grande profondeur, les sables fins et très fins deviennent dominant. C'est donc une décroissance de la granulométrie avec l'augmentation de la profondeur qui est observée.

La carte granulométrique proposée traduit une augmentation de la granulométrie exprimée par un passage de sables très fins à grossiers suivi par des sables moyens avec l'augmentation de la profondeur.

Les observations et les résultats sont donc en accord sur la présence de sable grossiers au milieu d'une séquence de sables fins et très fins. Ceci est également cohérent avec l'existence d'une surface de transgression mise en place en période de remontée marine datant de l'holocène. Cette surface a en outre été mise en évidence dans l'analyse des structures morpho-sédimentaires. En comparant point par point (Figure 87), des similitudes existent. En effet, 5/9 des points des faciès « sable fin+gravier+galet », « sable fin+ granulet » et « sable grossier » sont situés sur des faciès de sables fins, moyens et grossiers. En outre, 2/2 points du faciès « sable fin+granules » sont localisés sur le faciès « sables » comme pour le faciès « sables très fins ». 4/6 du faciès « sables fins+graviers+galets » est localisé sur le faciès « sables moyens »

Cette étude montre qu'il existe des correspondances et des similitudes entre les deux sources de données. Cependant, même si la corrélation n'est pas parfaite, il est intéressant

de constater que la méthode de fusion des données est tout de même sensible aux variations de granulométriques exprimées par les sédiments.



Figure 87. Détail de la carte sédimentaire complète proposée pour la zone de Paspébiac. Ce détail est centré sur la partie est à l'avant du barachois de Paspébiac. Les cercles colorés représentent la position des échantillons collectés au courant de la campagne de terrain 2007. Leurs couleurs correspondent à la granulométrie déterminée pour chaque échantillon. Les rectangles de couleurs représentent les différents faciès cartographiés par l'algorithme de classification supervisée.

ii. Site de Saint-Siméon-Bonaventure

L'étude de la qualité des résultats obtenus se fait en deux étapes. Tout d'abord, la carte de Long (2006) est visuellement comparée avec la carte sédimentaire obtenue. Ensuite, une évaluation de la correspondance existant entre les photographies sous-marines collectées pour cette thèse et la carte de Long (Figure 88) est présentée.



Figure 88. Carte de la répartition des sédiments de surface pour la zone de Saint-Siméon-Bonaventure, établie par Long (2006). La comparaison qualitative de la carte sédimentaire produite par rapport à celle de Long (2006) met en évidence que, les circonvolutions observées au large du village de Bonaventure et de sa rivière sont également présentes sur la carte de Long (2006) et que dans la partie ouest de la zone, l'organisation longitudinale n'est pas retrouvée sur la carte de Long (2006).

De plus, une comparaison des limites de faciès de Long et de la carte sédimentaire est présentée sur la Figure 90. Elle montre qu'il n'y a pas accord total entre les deux cartes. Cependant, dans la zone à l'avant du village de Bonaventure, il est intéressant de constater une très forte similitude de forme dans les circonvolutions exprimées par Long (2006) et celles de la carte sédimentaire (Figure 89).

En outre, bien qu'il y ait correspondance de forme, il y a un décalage horizontal important (pouvant atteindre 300m) entre les deux limites. Ce décalage est le résultat des problèmes de navigations (échouages) rencontrés due aux faibles profondeurs existant sur la zone.



Figure 89. Détail de la Figure 90 soulignant la similitude de forme des limites de faciès qui existe entre la carte de Long (2006) et la carte sédimentaire proposée pour le site de Saint-Siméon-Bonaventure. En plus de la similitude, il existe un décalage latéral vers l'est de la carte proposée par rapport à Long.



Figure 90. Superposition des limites sédimentaires de Long (2006), des photographies sous-marines réalisées pendant l'été 2007 et la carte sédimentaire synthétique établie à partir des données SHOALS pour la zone de Saint-Siméon-Bonaventure. Les photographies sous-marines sont représentées par des symboles correspondant à un faciès sédimentaire (croix : substratum rocheux, étoile : substratum rocheux avec laminaires, losange : laminaires et fucus, triangle : galets, carré : graviers et sables grossiers). Les limites des zones sédimentaires sont celles de la carte de Long présentée en Figure 88. Le code de couleur pour la carte sédimentaire est : vert=sable, bleu=graviers, rouge=roc.

Tableau 11. Corrélation entre les points de contrôle et les faciès définis par Long (2006) pour le site de Saint-Siméon-Bonaventure. Les colonnes représentent les faciès observés lors des investigations de terrain. Les lignes regroupent les faciès définis par la « carte de répartition des sédiments de surface » de Long (2006). Le nombre de stations correspond au nombre de points de contrôle disponibles pour chaque faciès. Les pourcentages expriment le taux de correspondance de chaque faciès de terrain par rapport à ceux définis par Long. Ce tableau est la synthèse chiffrée d'une partie des informations présentées dans la Figure 90.

	Roc	Roc+laminaires	laminaires+fucus	Galets	Gravier+Sable grossier
Roc	100%	50%	60%	40%	-
Gravier	-	33%	40%	60%	100%
Sable	-	17%	-	-	-
Nombre de stations	10	180	50	50	10

Le Tableau 11 présente la correspondance entre les faciès observés avec les photographies sous-marines et ceux déterminés par Long (2006) dans sa carte de distribution des sédiments de surface. Quelques points nécessitent d'être commentés :

- Il y a 100% de correspondance entre les faciès « roc ». Cela signifie que la totalité des photographies sous-marines qui présentent des affleurements de substratum rocheux est localisées dans des zones cartographiées comme étant également des affleurements de substratum rocheux selon Long (2006).
- Le faciès « roc+laminaires » est redistribué dans trois faciès différents, « roc », « graviers » et « sable » avec des pourcentages respectifs de 50%, 33% et 17%. Ainsi la moitié des photographies est localisée dans une zone d'affleurement de substratum rocheux selon Long (2006). L'autre moitié des photographies est répartie selon un rapport 2/3-1/3, respectivement entre les faciès « graviers » et « sable ». Il est probable que cette répartition soit le résultat d'une variation de la densité du couvert végétal des laminaires. En effet, une forte densité produit des rugosités importantes comme pour les affleurements de « roc » alors qu'une très faible densité produit des rugosités de faible valeur qui seront proche de celles exprimées par le faciès « sable ».
- Il en est de même pour le faciès « laminaires+fucus » dont 60% sont correspond à des faciès « roc » et le reste est classé en « graviers ». Ici, en plus de la densité du couvert végétal intervient la notion de type d'algues. En effet, les laminaires sont des algues de plus grande taille par rapport aux fucus. Ainsi, à densité égale, les fucus expriment des rugosités inférieures à celles exprimées par des laminaires.
- Enfin, le faciès « gravier+sable grossier » est entièrement localisé dans les zones correspondantes au faciès « gravier ».

La comparaison met en évidence qu'une correspondance comprise entre 67% et 100% existe entre les faciès et les photographies sous-marines. Cette différence est fonction des critères utilisés pour définir une erreur. En effet, est-ce que classer le faciès « roc+laminaires » dans le faciès « gravier » est une erreur ? En sachant de plus que des laminaires peuvent pousser sur des galets.

Ainsi, quels que soient les critères utilisés, ces résultats démontrent encore une fois la grande qualité des données de Long (2006).

5.3.4. Conclusion

Une des parties de ce travail consistait à tenter de relier les données du SHOALS à la nature du substrat en développant une méthode dédiée à l'adaptation du SHOALS à la cartographie sédimentaire côtière.

Dans cette étude, plusieurs approches de cartographies sédimentaires ont été développées en utilisant conjointement, le filtrage de différents paramètres (rugosité, densité de points, pente) du fond marin, la modélisation du signal de retour du fond et l'analyse morphologique du signal de retour du fond. Les cartes sédimentaires obtenues sont soit synthétiques, soit détaillées et représente une première approximation puisqu'elles contiennent des dérives et des erreurs.

C'est pourquoi, un modèle de fusion des données a été développé pour corriger les cartes et les rendre cohérentes aux investigations de terrain. Avec cette méthode, plus de la moitié des points de contrôle d'un faciès se retrouve cartographiée correctement. En outre, la comparaison de la carte de distribution des sédiments de surface réalisée par Long (2006) avec celle obtenue à partir des données du SHOALS montre une répartition quasi similaire des différentes classes sédimentaires pour la zone de Saint-Siméon-Bonaventure avec cependant un décalage entre les deux cartes.

6. Discussion

.

L'hypothèse de départ de ce travail était de réaliser des cartographies sédimentaires des fonds marins peu profonds en utilisant uniquement les données SHOALS. Ce travail a pu être entrepris en raison de la très bonne connaissance de la zone d'étude, la baie des Chaleurs, qui permettait de tester à la fois les données bathymétriques, les observations géodynamiques et la nature sédimentologique issues du traitement des données SHOALS, à celles établies lors de campagnes antérieures (Long, 2006). Ce travail pionnier a nécessité le développement de bases informatiques indispensables à la lecture et à l'utilisation des données SHOALS utilisées pour ce projet, puis de définir une méthode de travail permettant d'adapter le SHOALS à la cartographie sédimentaire côtière. Il est possible, à l'issue de l'exposé des données analytiques, de dégager les principaux résultats obtenus, puis de les discuter afin de dégager des axes de recherches futurs dans une direction qui est très prometteuse.

6.1. Étude bathymétrique

L'étude des données bathymétriques établies à l'aide du SHOALS et leur comparaison avec les autres types de cartes bathymétriques établies auparavant sur la même zone démontre que le SHOALS permet d'établir des cartes bathymétriques de grande précision et rapidement de manière continue entre les zones littorales et côtières peu profondes mais également des sites difficiles d'accès et/ou dangereux pour la navigation côtière. La profondeur limite atteinte par le SHOALS, respectivement 8 m et 17 m pour Bonaventure et Paspébiac, est essentiellement fonction de la clarté de la colonne d'eau mais également de la nature du fond et de la présence ou non de végétation. De plus, la rapidité de relevé du SHOALS ouvre la possibilité de surveiller l'évolution des zones côtières avec une haute résolution temporelle avec une résolution supérieure à l'ensemble des cartes actuellement disponibles. Cependant, l'application directe des données du SHOALS a mis en évidence des difficultés qu'il s'agit de tester et réduire à l'avenir.

6.1.1. Décalage des isobathes.

Plusieurs facteurs ont été identifiés comme responsables des problèmes de calage entre les données du SHOALS et celles du SHC : la différence d'unité des isobathes utilisées, la modification du trait de côte entre la date d'établissement de la carte du SHC (1979) et le relevé SHOALS (2006), le biais introduit dans les profondeurs reportées sur la carte afin d'assurer une marge de sécurité supplémentaire pour la navigation, des erreurs de navigation, des erreurs de positionnement dues aux systèmes de positionnement, sextant et/ou micro-ondes, alors utilisés, la petite échelle de la carte finale, d'erreurs d'interprétation des isobathes à partir de points collectés sur le terrain, ou enfin lors de la numérisation et du géoréférencement du document.

Cependant, il n'est pas possible de conclure quant à la dominance d'une source d'erreur par rapport à une autre ou bien même de connaître quelle est l'amplitude de l'erreur engendrée par chacune des sources.

Ce problème de décalage des isobathes est essentiel lorsqu'il s'agit de superposer des données issues de modes d'obtention différents.

6.1.2. Signification des « trous » dans les modèles bathymétriques

Les modèles bathymétriques présentent des trous⁵. Dans le modèle de classification développé dans ce travail, ces trous ont été empiriquement déterminés comme correspondant à des champs de laminaires sur la base de plusieurs observations. En effet, les quelques points qui subsistent à l'intérieur des trous présentent des décalages d'élévation avec leur environnement immédiat, ce qui montre que le faisceau laser a été bloqué « plus haut » que le fond. De plus, Kuus (2008) a montré en comparant les données du SHOALS avec des données de multifaisceaux sur le site de Saint-Siméon-Bonaventure, que les contours des trous des données SHOALS correspondaient aux limites des zones d'algues cartographiées avec le multifaisceaux. En outre, certains prélèvements et observations sur le terrain confortent cette hypothèse.

⁵ Un "trou" dans les données SHOALS est une zone où la densité de points est inférieure à la moyenne définie par les paramètres du relevé. On rappelle que la densité moyenne pour un relevé de 2 x 2 mètres est de 1 point.m⁻². À partir de cette moyenne, plusieurs valeurs seuils peuvent être définies pour caractériser la nature du fond.
Cependant, dans la partie est du site de Paspébiac, certaines observations contredisent cette interprétation. En effet, différents prélèvements sédimentaires, localisés dans les trous ou à proximité, montrent que les trous existent au dessus d'un ensemble varié de faciès tels que : laminaires, galets, galets et laminaires, sables fins, sables argileux.

Il en est de même pour la partie ouest de la zone de Paspébiac. Cette zone a une densité de points très faible. Or, l'interprétation des lignes de sonar latéral sur cette zone a montré un ensemble de faciès très varié, sable, sables fins et grossiers, galets, des affleurements de roches mères et quelques algues.

Il est par ailleurs intéressant de noter la présence de trous dans certains marais et embouchures, alors que d'autres en sont dépourvus. Le marais de Saint-Siméon présente un trou en son centre alors qu'il n'y a pas de trou dans le barachois de Paspébiac ni dans celui de l'embouchure de la Rivière-Nouvelle.

Ces deux derniers sites sont de même nature morphologique : chenaux peu profonds et peu végétés, entourés d'étendues sableuses ou argileuses qui découvrent à marais basse. Ils ont cependant une nature sédimentaire différente. Ainsi, Paspébiac et l'embouchure de la Rivière-Nouvelle sont a dominance sableuse alors que Saint-Siméon est à dominance argileuse. De plus, la transparence des eaux est une fonction de la nature sédimentaire et de la dynamique locale. Ainsi, il semblerait que l'ouverture du marais de Saint-Siméon sur le large, conjuguée à des conditions météorologiques extrêmes quelque temps avant le relevé ont influencé les conditions de turbidité de la colonne d'eau. En effet, seule la partie centrale du marais est manquante. Or, cette zone centrale concentre les chenaux les plus profonds par lesquels l'eau circule chargée de sédiments en suspension.

Concernant le barachois de Paspébiac, il n'est plus ouvert vers l'extérieur depuis l'hiver 2006, puisque sa passe s'est refermée, stoppant tout apport d'eau direct de l'extérieur. En outre, durant la période de relevé, les prélèvements d'eau ont montré une eau très claire assurant au SHOALS une pénétration maximale du système.

La Rivière-Nouvelle présente également des résultats de grande qualité. Ceci est du au fait que son embouchure est protégée par une flèche sableuse des phénomènes du large. Ces eaux, faiblement chargées en sédiments, ne sont pas soumises aux conditions extérieures.

Il en est de même pour l'embouchure de la rivière Bonaventure. Des résultats exceptionnels ont été obtenus et aucun trou n'est visible. Pourtant la charge sédimentaire a un rôle non négligeable dans le bilan sédimentaire de la baie des Chaleurs bien qu'aucunes études ne renseignent sur la charge sédimentaire de la rivière Bonaventure (Xhardé, 2007).

Au vu des ces observations et en l'état actuel des connaissances, il est impossible de conclure s'il existe une relation entre la nature sédimentaire des fonds marins et l'existence de trous dans les données SHOALS. Des études ultérieures devront déterminer le rôle que peut jouer la transparence des eaux dans leur existence.

6.1.3. Analyse des modèles bathymétriques pour mettre en évidence différentes populations d'algues

A l'intérieur des trous précédemment évoqués, il peut y avoir un ensemble de pics qui est le résultat du faible nombre de points existant à l'intérieur de ces zones. Ces pics présentent une différence d'élévation avec le fond situé à proximité immédiate et représentent les points laser qui ont été stoppés par la canopée de champs d'algues denses.

Cependant, l'observation détaillée de ces zones de pics montre qu'il existe différents ensembles de pics qui sont l'expression de différents types d'algues. Ainsi, il y a des zones avec de nombreux pics serrés et de relativement faible amplitude. Cet ensemble correspond selon les observations, à des zones de fucus. Par ailleurs, il existe des zones présentant des pics épars avec une amplitude supérieure à l'ensemble précédent. La densité des points est extrêmement faible, c'est le résultat d'une perte plus importante de points. C'est typiquement ce qui se passe au-dessus des champs de laminaires.

Ceci montre donc qu'une visualisation en 3D de la zone permet de mettre en évidence des ensembles biologiques qui peuvent être caractérisés par la densité et l'amplitude des pics existant.

<u>6.2. Étude des structures morpho sédimentaires et des processus associés</u>

La grande précision des données du SHOALS a permis d'établir l'existence et de préciser les caractéristiques de corps sédimentaires dont certains étaient jusque-là essentiellement connus en coupe (longueur, orientation...). De plus cela a permis de les étudier dans leur répartition cartographique.

Dans la zone étudiée, l'analyse des modèles bathymétriques issus du SHOALS permet :

- de caractériser des unités morpho sédimentaires (dune, barre d'avant côte, flèche sableuse), d'en mesurer les paramètres essentiels pour comprendre leur genèse (taille, longueur d'onde, orientation) ainsi que leurs répartitions;
- de proposer une séquence chronologique de mise en place des différents ensembles morpho sédimentaires, et ainsi d'introduire la dimension temps dans l'analyse des processus sédimentaires;
- de déterminer la nature et l'orientation préférentielle des processus hydrodynamiques associés aux champs de dunes, à partir desquels il est possible de retracer la vitesse et l'orientation des courants qui en sont à l'origine;
- de mettre en évidence des courants de dérives littorales et leurs directions grâce a l'observation d'accumulations sédimentaires au niveau des obstacles (digue, épis rocheux, port) côtiers;
- de localiser les zones d'érosion et les zones de sédimentation.

Grâce aux données du SHOALS, il est possible d'avoir une information précises et en continu sur la disposition des particules sédimentaires à l'interface eau-sédiment. Il est donc possible de déterminer la géométrie des structures morpho-sédimentaires avec une résolution de quelques centimètres et donc de mieux comprendre leur mode de mise en place. Les processus hydrodynamiques associés à ces corps sédimentaires sont déduits et une compréhension des phénomènes hydrodynamiques est développée en évaluant leurs interactions et les modifications engendrées avec les zones littorales. A partir de données SHOALS établies à des intervalles de temps réguliers, la surveillance de l'évolution de ces structures sédimentaires devient un instrument

précis de gestion des zones littorales.

6.3. Adaptation du SHOALS à la cartographie sédimentaire côtière

L'un des buts majeurs de ce travail était de relier directement les données du SHOALS à la nature du substrat. Une méthode a été développée pour adapter le SHOALS à la cartographie sédimentaire côtière. Elle tient compte des deux principaux paramètres à prendre en considération : la nature et la taille des particules.

Dans l'étude de la baie des Chaleurs :

- plusieurs approches de cartographies sédimentaires ont été développées en utilisant des méthodes basées sur le filtrage de différents paramètres (rugosité, densité de points, pente) du fond marin, la modélisation du signal de retour du fond ou l'analyse morphologique du signal de retour du fond. Les cartes sédimentaires obtenues sont soit synthétiques et donnent une première estimation de la répartition des différents faciès sédimentaires, soit détaillées et établit des cartes finales de répartition des sédiments de surface;
- les différents faciès observés lors des investigations de terrain ont été cartographiés grâce aux méthodes développées et une cartographie cohérente avec la réalité et un modèle de fusion des données ont été développés pour contraindre les dérives et erreurs produites par les algorithmes de classification.

Deux résultats majeurs se dégagent :

- la comparaison des résultats obtenus avec les points de contrôle montre que plus de la moitié des points de contrôle d'un faciès se retrouve cartographiée correctement;
- la comparaison de la carte de distribution des sédiments de surface réalisée par Long (2006) avec celle obtenue à partir des données du SHOALS montre une répartition quasi similaire des différentes classes sédimentaires pour la zone de Saint-Siméon-Bonaventure avec cependant un décalage entre les deux cartes.

Les résultats indiquent qu'il existe une relation entre la qualité du résultat (correspondance entre les données de terrain et le résultat de l'algorithme) obtenu et la taille des grains. En effet, les meilleurs résultats, principalement compris entre 70% et 50%, sont obtenus pour les affleurements de substratum rocheux et le faciès « galets ». Les faciès plus fins, de types sable ont des résultats compris entre 58% et 15%.

La qualité des résultats peut être reliée à la profondeur et à la nature sédimentaire du substrat. En effet, la profondeur et la clarté de la colonne d'eau ont un impact direct sur la qualité des résultats obtenus avec le SHOALS. Ce dernier pénètre entre deux (phénomènes d'absorption dominant) et trois fois (phénomènes de diffusion dominant) la profondeur mesurée par un disque de Secchi (Guenther, 2001). Le rapport entre les phénomènes d'absorption et de diffusion est fortement corrélé avec les cycles de marées, les saisons et les climats et demande une étude plus approfondie. En outre, la diffusion du faisceau laser dans la colonne d'eau est également affectée par la clarté de l'eau. Ainsi, le diamètre de demie énergie (diamètre d'un disque qui représente la moitié de l'énergie réfléchie) atteint, dans la plupart des conditions environnementales, un étalement qui se situe entre 10% et 30% de la profondeur atteinte ajouté au diamètre du faisceau à l'interface air/eau, soit deux mètres environ. Dans des conditions extrêmes, eau très turbide ou très profonde, cette valeur peut atteindre 50% (Guenther, 2001). Cet effet d'étalement diminue la résolution verticale et horizontale et affecte, le calcul de la profondeur, la détection des objets de petite taille et la détection des faciès sédimentaires. En effet, la détection des faciès est réduite puisque l'augmentation de l'emprunte du faisceau laser au niveau du fond va englober plusieurs faciès sédimentaire différents, ce qui provoque un lissage de la réponse du fond et engendre des erreurs au niveau de l'algorithme.

En outre, certains faciès vont être plus ou moins sensibles aux phénomènes de mélanges de par leurs natures sédimentaires. En effet, les faciès fins sont mobiles sous l'action des houles et des courants et vont donc se mélanger. En revanche, les faciès grossiers et les affleurements de substratum rocheux sont exceptionnellement ou pas mobiles. Ainsi, les faciès fins mélangés provoquent des effets de lissage plus important que les faciès grossiers qui sont généralement plus homogènes.

Dans cette étude, les sédiments fins sont localisés à des profondeurs plus faibles que les affleurements de substratum rocheux et les galets. Ainsi, selon ce qui a été énoncé précédemment et les résultats obtenus, l'effet de mélange a un impact plus important que celui d'étalement du faisceau laser en fonction de la profondeur.

Cependant, il n'est pas possible, en l'état actuel de quantifier l'effet de chacun des phénomènes dans la qualité des résultats. Il est cependant vital d'étudier ces résultats et leur validité dans le futur afin de dégager des orientations de recherches qui permettront de mieux comprendre l'impact de la profondeur et de la nature sédimentaire sur la qualité des résultats.

6.3.1. Nombre de faciès utilisés et précision des résultats

6.3.1.1. Un paramètre constant dans la zone d'étude

L'excellente connaissance sédimentologique de la zone d'étude permet non seulement de comparer les données de faciès sédimentaires issues des données du SHOALS, mais elle a aussi permis d'établir que la totalité des dépôts de cette zone est de nature silicoclastique. Le paramètre de la nature chimique des dépôts étudiés est ainsi constant. Il est certain que dans d'autres zones d'études, on rencontrera des mélanges de particules de nature siliceuse et carbonatée, facteur de complexité supplémentaire pour l'analyse des données et l'établissement des faciès. Afin de comprendre l'influence de la nature minéralogique des sédiments sur les résultats obtenus, il est nécessaire de développer un laser terrestre similaire au système SHOALS qui permettra d'effectuer des mesures en milieu contrôlé.

6.3.1.2. Le nombre de faciès et leur limite

L'établissement de classes de faciès est donc basé sur trois types de « particules » : le sédiment meuble silico-clastique qui se différencie selon la taille des particules (galets, gravier, sable...), l'affleurement du substratum rocheux et la présence ou non d'algues (fucus, laminaires...).

Le nombre de faciès défini pour une zone a une influence directe sur la qualité des résultats obtenus lors du processus de classification. Ainsi, pour la zone de Paspébiac, l'utilisation de 12 classes pour l'établissement de la carte sédimentaire donne une précision de 17% alors que l'utilisation de 9 et 4 classes donne respectivement 45% et 53% de précision globale.

Donc, plus le nombre de classe est réduit et meilleur est le résultat de la classification.

En revanche, les résultats obtenus pour les zones tests deux fois plus petites, montrent une autre tendance. Ainsi, l'utilisation de 9 classes, 5 classes et 3 classes donne respectivement 65%, 67% et 48% de précision globale. La réduction du nombre de classe de 9 à 5 a augmenté la précision globale. Cependant, le résultat obtenu pour 3 classes est nettement moins bon, alors qu'il devrait être meilleur que les deux précédents. Cette différence provient probablement de la qualité du résultat obtenu à cause des zones d'apprentissage et de l'omission de deux classes. Il est fort probable que l'intégration des deux classes manquantes dans le résultat (laminaires et une classe non déterminée pour cet exemple) augmenterait la qualité du résultat avec une valeur supérieure à 66.98%.

La taille de la zone traitée a également une influence sur le résultat.

En effet, à nombre de classe égale, la qualité du résultat est meilleure pour de petite superficie, 65% contre 20% pour 9 classes et 67% contre 53% pour 4/5 classes. L'exemple pour 3 classes est également significatif. Cependant pour les mêmes raisons que précédemment, il est fort probable que la différence de qualité aurait été supérieure avec une meilleure classification.

237

7. Conclusion

Le but principal de ce travail était d'adapter le SHOALS à la cartographie sédimentaire des zones côtières peu profondes. Pour cela, il a été nécessaire de développer trois axes de recherches : l'analyse bathymétrique, l'enregistrement des processus hydrodynamiques et la cartographie sédimentaire proprement dite. La fusion de ces trois méthodes d'analyses permet d'aboutir à une méthode de cartographie sédimentaire des zones côtières jusqu'à des profondeurs voisines de quinze mètres.

La première partie de ce travail concerne l'analyse des données selon un aspect topographique en se basant sur une comparaison des données bathymétriques obtenues par des méthodes différentes.

La comparaison bathymétrique entre les données du SHOALS, avec celles de Long (2006) et du Service Hydrographique du Canada (1979), montre des corrélations variables entre les trois sources de données disponibles. Ces différences résultent, dans ce cas, de plusieurs facteurs : la différence d'unité des isobathes utilisées, la modification du trait de côte entre la date d'établissement de la carte du SHC (1979) et le relevé SHOALS (2006), le biais introduit dans les profondeurs reportées sur la carte afin d'assurer une marge de sécurité supplémentaire pour la navigation, des erreurs de navigation, des erreurs de positionnement dues aux systèmes de positionnement (sextant et/ou micro-ondes alors utilisés), de la petite échelle de la carte finale, des erreurs d'interprétation des isobathes à partir de points collectés sur le terrain, ou lors de la numérisation et du géoréférencement du document.

La deuxième partie de ce travail porte sur l'identification des corps sédimentaires ainsi que sur la mise en évidence d'indications géologiques et hydrodynamiques qu'ils peuvent fournir.

-L'analyse et l'identification des corps sédimentaires se font à partir de profils qui permettent d'en connaître les caractéristiques : amplitude, asymétrie, direction, orientation, épaisseur.

-La dynamique sédimentaire se traduit par des zones d'érosion, des affleurements de strates, des structures comme les flèches sableuses, les barres d'avant côte, les champs de

dunes ou encore des chenaux fluviatiles avec leur remplissage.

-Une chronologie de mise en place, utile pour connaître l'évolution du système au cours du temps, est basée sur les relations topographiques et géométriques des différentes structures sédimentaires identifiées.

Ainsi, le SHOALS permet d'obtenir des cartes bathymétriques dans un temps rapide et dans des zones difficiles d'accès par d'autres méthodes. De plus, l'établissement de cartes bathymétriques à des intervalles de temps rapprochés permet de déceler les modifications de topographies dues à des mécanismes d'érosions ou hydrodynamiques et ainsi d'introduire une dimension temps dans l'étude des systèmes côtiers. En outre, la précision des données de LiDAR bathymétrique est supérieure à la capacité cartographique et permet donc de mettre en évidence des structures sédimentaires et géologiques de taille décimétrique.

La troisième partie se concentre sur l'analyse du signal de retour et sur le développement de techniques de cartographie sédimentaire des zones côtières peu profondes.

-Plusieurs approches de cartographies sédimentaires ont été développées en utilisant conjointement la modélisation du signal de retour du fond (mixture gaussienne) et l'analyse morphologique du signal de retour du fond (extraction des paramètres morphostatistiques).

-L'analyse d'un signal par une mixture gaussienne consiste à supposer qu'un signal peutêtre modélisé par une somme de n courbes de Gauss, où n est un nombre entier connu à priori. Chaque courbe, appelée population, a des paramètres statistiques qui lui sont propres (sa moyenne, son écart type et son poids dans le mélange). La méthode d'analyse d'Espérance Maximisation consiste à retrouver dans le mélange la gaussienne qui correspond au signal de fond et d'extraire ses paramètres statistiques. A partir des ces paramètres, une image multi-bandes est générée. Dans cette image, chaque bande correspond à un paramètre. Cette approche présente deux limitations majeures : un temps de calcul long et le fait que les gaussiennes modélisées sont normales et donc symétriques par rapport à leurs moyennes. Or, le signal du fond n'est pas symétrique par rapport à son centre.

-L'analyse par extraction du signal du fond, consiste à isoler un signal afin d'en étudier les différents paramètres morpho-statistiques préalablement définis. Différents types de paramètres sont ainsi calculés, certains spécifiques au retour du fond (amplitude, longueur et angle), d'autres sont calculés à partir de l'ensemble de la courbe (rapport d'amplitude, angle) et enfin d'autres paramètres font appel à l'ensemble des points du fichier (densité, rugosité). A partir des ces paramètres, une image multi-bandes est générée.

La limitation majeure de cette approche provient du calcul des quatre points de la courbe (surface du plan d'eau, début de la colonne d'eau, fin de la colonne d'eau et fond) nécessaire à l'extraction du signal de retour du fond. Certaines morphologies du signal, font échouer l'algorithme développé ce qui rend ainsi de nombreux points nonconformes. Cependant le comportement homogène de l'algorithme sur l'ensemble des points limite l'impact sur le résultat final. En effet, les problèmes sont toujours du même type et provoquent les mêmes résultats en créant une erreur systématique sur un même type de signal.

-Lorsque ces méthodes d'analyses sont appliquées à l'ensemble d'une zone d'étude, des limitations supplémentaires apparaissent. En effet, la sélection des bandes statistiquement significatives issue de la transformée en composante principale, pose un problème puisque selon la zone considérée, les bandes les plus significatives ne sont pas toujours les mêmes. Il faut trouver un consensus qui ne détériore pas la qualité du résultat final. De plus, le nombre de faciès et la superficie de la zone étudiée ont un impact direct sur la qualité des résultats obtenus. Enfin, il existe des variations et/ou des chevauchements dans l'expression de certains faciès, ce qui « aveugle » l'algorithme de classification supervisée et provoque des erreurs dans le résultat final.

-Les cartes sédimentaires obtenues ont un degré de qualité qui peut être évalué par corrélation entre les données de terrain et les résultats obtenus avec les algorithmes à partir des deux méthodes d'analyses. Cette qualité est comprise entre 100% et 17%, avec

dans la majorité des cas, une valeur supérieure à 50%. Ces résultats très encourageants doivent être considérés comme une première approximation puisqu'ils contiennent des dérives et des erreurs actuellement corrigées par un modèle de fusion des données, basé sur le filtrage de différents paramètres (rugosité, densité de points, pente) du fond marin, pour les rendre cohérentes avec les investigations de terrain. De plus, on a établi que la qualité est dépendante du type de faciès puisque les meilleurs résultats sont obtenus pour les faciès grossiers et les moins bons pour les faciès fins. Il est certain que les études futures permettront d'améliorer les résultats actuels.

Perspectives de recherches

-Etude de sites d'environnements sédimentaires variés

Il est indispensable, outre le développement de petits lasers terrestres dédiés au calibrage en milieu contrôlé du système SHOALS, d'appliquer le protocole développé ici sur des sites qui représentent chacun un environnement sédimentaire spécifique et uniforme (et pour lequel on dispose de mesures de terrain), afin de pouvoir caractériser chaque type d'environnement sédimentaire dans son milieu naturel.

-Etablissement d'une banque de données des spécifications du signal de retour du SHOALS en fonction des caractéristiques sédimentologiques.

Les sites étudiés représentent deux types de dépôts sédimentaires, silico-clastique de moyenne énergie et silico-clastique de faible énergie. Il est nécessaire d'appliquer ce protocole de mesure à d'autres types de dépôts (selon leur nature minéralogique, granulométrique, leur degré de compaction et de diagénès...) afin d'étendre les capacités d'analyse des différents faciès, mais également d'étudier sa portabilité à d'autres environnements.

-Multiplication des levés au-dessus d'une même zone d'étude

Cela permettra non seulement d'étudier les mouvements des sédiments sur cette zone, mais surtout de mettre en évidence quels types de sédiments se déplacent et sous l'effet de quels facteurs. Il en résultera une nouvelle approche de la dynamique sédimentaire actuelle, avec une précision d'étude et d'analyse jamais égalée jusqu'à présent.

En fusionnant les données laser avec des données obtenues au sol, ou à l'interface eausédiment, une nouvelle approche de la connaissance des environnements côtiers se développe. Les applications de ce nouveau mode de connaissance vont permettre une meilleure gestion des littoraux. Dans le même temps, cette somme d'informations inédites va également préciser la connaissance de mécanismes géologiques qui ont permis d'identifier de tels environnements côtiers dans les séries sédimentaires anciennes.

Ainsi, les résultats présentés ici, confirment qu'une meilleure gestion des environnements actuels et une meilleure connaissance des environnements anciens seront certainement issues de nouvelles études, basées sur les mêmes techniques, dans des travaux futurs.

8. Bibliographie

Amos, C. L., and King, E. L., 1984. Bedforms of the Canadian eastern seaboard: a comparison with global occurrences. Marine Geology 57, pp.167-208.

Analytical Spectral Device Inc, 2002. *FieldSpec*® UV/VNIR, HandHeld Spectroradiometer, User's Guide. ASD part : #600300, 72 pages.

Analytical Spectral Device Inc, 1999. *Technical Guide*, 4th edition. Managing Editor: Hatchell, D.C., 136 pages.

Ashley, G.M., 1990. Classification of large-scale subaqueous bedforms : a new look at an old problem. Journal of Sedimentary Petrology, vol. 60, pp. 160-172.

Banic, J.R and Cunningham, A.G., 1998. Airborne laser bathymetry: a tool for the next millennium. EEZ Technology, Aug/Sep, pp.75-80.

Banic, J.R., Sizgoric S., and O'Neil, R., 1986. *Scanning lidar bathymeter for water depth measurement*. In Proceedings SPIE Laser Radar Tech. and Appl., Vol. 663, Quebec City, Quebec, pp. 187-195.

Billard B. and Wilsen P.J., 1986. Sea surface and depth detection in the WRELADS airborne depth sounder. Applied Optics, 25, 13, pp. 2059-2066.

Bergeron P., 1995. Étude de faisabilité de la restauration et de la mise en valeur du barachois de Paspébiac. Biorex Inc. Sainte-Foy, Québec, Canada, 216 pages.

Berné, S., Castaing, P., Le Drezen, E. and Lericolais, G., 1993. Morphology, internal structure, and reversal of asymmetry of large subtidal dunes in the entrance to gironde estuary (France). Journal of Sedimentary Petrology, vol. 63, pp. 70-793.

Boucher, M., 2007. Relations empiriques des données laser aéroportées (LiDAR) et des paramètres géologiques et géotechniques au sol, Golfe du Saint-Laurent, Baie des Chaleurs, Québec. [Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès Sciences (M.Sc.) en Sciences de la terre]. Long, B. F. (Directeur). Québec, Université du Québec, xix, 189 pages.

Boucher M., Xhardé, R. and Long, B.F., 2005. *LiDAR application for coastal mapping: a example of the Gulf of Saint-Lawrence, Chaleur Bay, Quebec*. Proceedings of the 12th Canadian Coastal Conference, Dartmouth, NS, Canada. 19 pages.

Brooks, M.W., Cupper, E., Guenther, G.C. and LaRocque, P.E., 1998. Advancements and applications of the SHOALS laser bathymetry system. ION GPS 98, Nashville, TN, 8 pages.

Collin, A., Cottin, A. and Long, B. F., 2007. SHOALS benthic habitat discrimination using multivariate analysis. First FUDOTERAM workshop - GEOIDE, (28 - 30 mars 2007, Toronto, Canada).

Collin, A., Cottin, A., Long, B., Kuus, P., Clarke, J.H., Archambault, P., Sohn, G., and Miller, J., in press. *Statistical classification methodology of SHOALS 3000 backscatter to mapping coastal benthic habitats*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters.

Collins, B., Penley, M., Monteys, X., 2007. *LiDAR seabed classification*. Site Hydro International, archive: July/August, volume 11, number 7 [en ligne], http://www.hydro-international.com/issues/articles/id819-Lidar_Seabed_Classification.html (Site consulté le 11 juin 2008)..

Collins, B., Penley, M., Monteys, X., 2008. Quester Tangent – Seabed classification using LiDAR data. Site Quester Tangent [en ligne], http://www.questertangent.com/default.asp x?PageID=1054#process (Site consulté le 11 juin 2008).

Compton, J.S. and Hudson, M.A., 1988. *New charting technology in Australia: the Laser Airborne Depth Sounder*. Int'l. Hydro. Rev. LXV(2), Monaco, pp. 145-157.

Cottin, A. and Long, B.F., 2005. *The FUDOTERAM project: A SHOALS application in the Gulf of St-Lawrence*. 12ième Canadian Coastal Conference, (Dartmouth, Canada).

Cottin, A. and Long, B.F., 2006. *L'utilisation du LiDAR SHOALS à travers le programme FUDOTERAM*. 8ième Conférence scientifique annuelle du Réseau GEOIDE, (31 mai - 2 juin 2006, Banff, Canada). http://www.geoide.ulaval.ca/Files/ProgConf2006FR.pdf.

Cottin, A. and Long, B.F., 2007. Using the SHOALS-3000's reflectance for an advance mapping and classification of a coastal zone. International LIDAR Mapping Forum (ILMF) 2007, Baltimore, États-Unis. http://www.gisuser.com/content/view/10735 /

Cottin, A., Collin, A. and Long, B.F., 2007. *Analysis of the impulsion waveform with the gaussian mixture model, first results*. First FUDOTERAM workshop - GEOIDE, (28 - 30 mars 2007, Toronto, ON, Canada).

Cottin, A., Long, B.F., Hughes-Clarke, J. and Tao, V., 2005a. SHOALS double laser beam intensity calibration and sediment determination in Chaleur Bay, Gulf of St-Lawrence. 12th Canadian Coastal Conference, Dartmouth, NS, Canada.

Cottin, A., Long, B.F., Arsenault, P. and Cantin, D., 2006. SHOALS *Mapping Application in a Medium Energy Nearshore Zone*. IGARSS (International Geoscience and Remote Sensing Symposium) 2006, Denver, Colorado, États-Unis.

Cottin, A., Long, B.F., Hughes-Clarke, J., Tao, V. and Forbes, D., 2005b. *SHOALS double laser beam intensity calibration sediment determination in the gulf of St.Lawrence*. 7ième Conférence scientifique annuelle du Réseau GEOIDE, Québec, QC, Canada.

Amos, C. L., and King, E. L., 1984. Bedforms of the Canadian eastern seaboard: a comparison with global occurrences. Marine Geology 57, pp.167-208.

Analytical Spectral Device Inc, 2002. *FieldSpec*® UV/VNIR, HandHeld Spectroradiometer, User's Guide. ASD part : #600300, 72 pages.

Analytical Spectral Device Inc, 1999. *Technical Guide*, 4th edition. Managing Editor: Hatchell, D.C., 136 pages.

Ashley, G.M., 1990. Classification of large-scale subaqueous bedforms : a new look at an old problem. Journal of Sedimentary Petrology, vol. 60, pp. 160-172.

Banic, J.R and Cunningham, A.G., 1998. Airborne laser bathymetry: a tool for the next millennium. EEZ Technology, Aug/Sep, pp.75-80.

Banic, J.R., Sizgoric S., and O'Neil, R., 1986. *Scanning lidar bathymeter for water depth measurement*. In Proceedings SPIE Laser Radar Tech. and Appl., Vol. 663, Quebec City, Quebec, pp. 187-195.

Billard B. and Wilsen P.J., 1986. Sea surface and depth detection in the WRELADS airborne depth sounder. Applied Optics, 25, 13, pp. 2059-2066.

Bergeron P., 1995. Étude de faisabilité de la restauration et de la mise en valeur du barachois de Paspébiac. Biorex Inc. Sainte-Foy, Québec, Canada, 216 pages.

Berné, S., Castaing, P., Le Drezen, E. and Lericolais, G., 1993. *Morphology, internal structure, and reversal of asymmetry of large subtidal dunes in the entrance to gironde estuary (France)*. Journal of Sedimentary Petrology, vol. 63, pp. 70-793.

Boucher, M., 2007. Relations empiriques des données laser aéroportées (LiDAR) et des paramètres géologiques et géotechniques au sol, Golfe du Saint-Laurent, Baie des Chaleurs, Québec. [Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès Sciences (M.Sc.) en Sciences de la terre]. Long, B. F. (Directeur). Québec, Université du Québec, xix, 189 pages.

Boucher M., Xhardé, R. and Long, B.F., 2005. *LiDAR application for coastal mapping: a example of the Gulf of Saint-Lawrence, Chaleur Bay, Quebec.* Proceedings of the 12th Canadian Coastal Conference, Dartmouth, NS, Canada. 19 pages.

Brooks, M.W., Cupper, E., Guenther, G.C. and LaRocque, P.E., 1998. Advancements and applications of the SHOALS laser bathymetry system. ION GPS 98, Nashville, TN, 8 pages.

Collin, A., Cottin, A. and Long, B. F., 2007. *SHOALS benthic habitat discrimination using multivariate analysis*. First FUDOTERAM workshop - GEOIDE, (28 - 30 mars 2007, Toronto, Canada).

Collin, A., Cottin, A., Long, B., Kuus, P., Clarke, J.H., Archambault, P., Sohn, G., and Miller, J., in press. *Statistical classification methodology of SHOALS 3000 backscatter to mapping coastal benthic habitats*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters.

Collins, B., Penley, M., Monteys, X., 2007. *LiDAR seabed classification*. Site Hydro International, archive: July/August, volume 11, number 7 [en ligne], http://www.hydro-international.com/issues/articles/id819-Lidar_Seabed_Classification.html (Site consulté le 11 juin 2008)..

Collins, B., Penley, M., Monteys, X., 2008. Quester Tangent – Seabed classification using LiDAR data. Site Quester Tangent [en ligne], http://www.questertangent.com/default.asp x?PageID=1054#process (Site consulté le 11 juin 2008).

Compton, J.S. and Hudson, M.A., 1988. *New charting technology in Australia: the Laser Airborne Depth Sounder*. Int'l. Hydro. Rev. LXV(2), Monaco, pp. 145-157.

Cottin, A. and Long, B.F., 2005. *The FUDOTERAM project: A SHOALS application in the Gulf of St-Lawrence*. 12ième Canadian Coastal Conference, (Dartmouth, Canada).

Cottin, A. and Long, B.F., 2006. *L'utilisation du LiDAR SHOALS à travers le programme FUDOTERAM*. 8ième Conférence scientifique annuelle du Réseau GEOIDE, (31 mai - 2 juin 2006, Banff, Canada). http://www.geoide.ulaval.ca/Files/ProgConf2006FR.pdf.

Cottin, A. and Long, B.F., 2007. Using the SHOALS-3000's reflectance for an advance mapping and classification of a coastal zone. International LIDAR Mapping Forum (ILMF) 2007, Baltimore, États-Unis. http://www.gisuser.com/content/view/10735 /

Cottin, A., Collin, A. and Long, B.F., 2007. *Analysis of the impulsion waveform with the gaussian mixture model, first results*. First FUDOTERAM workshop - GEOIDE, (28 - 30 mars 2007, Toronto, ON, Canada).

Cottin, A., Long, B.F., Hughes-Clarke, J. and Tao, V., 2005a. SHOALS double laser beam intensity calibration and sediment determination in Chaleur Bay, Gulf of St-Lawrence. 12th Canadian Coastal Conference, Dartmouth, NS, Canada.

Cottin, A., Long, B.F., Arsenault, P. and Cantin, D., 2006. SHOALS *Mapping Application in a Medium Energy Nearshore Zone*. IGARSS (International Geoscience and Remote Sensing Symposium) 2006, Denver, Colorado, États-Unis.

Cottin, A., Long, B.F., Hughes-Clarke, J., Tao, V. and Forbes, D., 2005b. *SHOALS* double laser beam intensity calibration sediment determination in the gulf of *St.Lawrence*. 7ième Conférence scientifique annuelle du Réseau GEOIDE, Québec, QC, Canada.

Cunningham, A. G., Lillycrop, W. J., Guenther, G. C. and Brooks, M.W., 1998. *Shallow water laser bathymetry: accomplishments and applications*. Oceanology International, Brighton, England, 1998, 3, pp. 277-288.

Dipin, 2008a. What is a Secchi disk ?. In The Secchi Dip-in, [en ligne]. http://dipin.kent.edu/secchi.htm. (Page consultée le 11 juin 2008).

Dipin, 2008b. *Is There A "Proper" Design for a Secchi Disk?*. In The Secchi Dip-in, [en ligne]. http://dipin.kent.edu/ Disk%20Design.htm. (Page consultée le 11 juin 2008)

Duchesne, M. J., 2005. Apport de méthodes géophysiques marines et de la scanographie à l'étude de la genèse des faciès de sismiqueréflexion de haute et très haute résolution. [Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophiae doctor (Ph.D.) en Sciences de la terre]. Long, B. F. (Directeur). Québec, Université du Québec, xxxiv, 404 pages.

Estep, L., Lillycrop, W. J. and Parson, L., 1994. *Sensor fusion for hydrographic mapping applications*. Proc. U.S. Army Corps of Engineers 1994 Training Symposium, Surveying and Mapping, Remote Sensing/GIS, New-Orleans, LA, pp. 1-7.

Fager, Gary. *Spectralon*. (4 Septembre 2007). [Courrier électronique à Antoine Cottin], [En ligne]. Adresse par courrier électronique: antoine.cottin@ete.inrs.ca.

Feygels, V. I., 2005. Prediction of SHOALS-1000 Performance in Bay de Chaleur (Quebec) Region. Optech International Inc, 11 pages.

Finkl, C. W., Benedet, L. and Andrews, J. L., 2005a. *Interpretation of seabed geomorphology based on spatial analysis of high-density airborne laser bathymetry*. Journal of coastal research, 2005, 21, pp. 501-514.

Finkl, C. W., Benedet, L. and Andrews, J. L., 2005b. Submarine geomorphology of the continental shelf off southeast Florida based on interpretation of airborne laser bathymetry. Journal of coastal researc, 2005, 21, pp. 1178-1190.

Fletcher, C., Rooney, J., Barbee, M., Lim, S. and Richmond, B., 2003. *Mapping shoreline change using digital orthophotogrammetry on Maui, Hawaii*. Journal of coastal research, 38, pp. 106-124.

Forbes D. L., Parkes, G. S., Manson, G. K. and Ketch, L. A., 2004. *Storms and shoreline retreat in the Southern Gulf of St. Lawrence*. Marine Geology, vol. 210, pp. 169-204.

Francis, K and Tuell, G., 2005. *Rapid environmental assessment: the next advancement in airborne bathymetric lidar*. Ocean news & technology, 4 pages.

Gal, O., 2003. *A Collection of Fitting Functions*. Site Matlab© Central. [en ligne]. http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/loadFile.do?objectId=4222&obje ctType=FILE (Page consultée le 11 juin 2008).

Gorodetzky, D., 2007. *ENVI Code Library - pca_band_contrib.sav*. Site ITT Visual Information Solutions. [en ligne]. http://www.ittvis.com/codebank/search.asp?FID=72 (Page consultée le 11 juin 2008).

Guenther, G.C., 1985. Airborne laser hydrography: System design and performance factors, NOAA Professional Paper Series, National Ocean Service 1, National Oceanic and Atmospheric Administration, Rockville, MD, 385 pages.

Guenther, G.C., 1986. Wind and nadir angle effects on airborne lidar water surface returns, in Proceedings SPIE Ocean Optics VIII, Vol. 637, pp. 277-286.

Guenther, G. C., 2001. *Airborne LiDAR Bathymetry*. In: David F. Maune (editor), Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual, Chapter 8 ASPRS, 2001, 540 pp.

Guenther, G.C. and Goodman, L.R., 1978. *Laser applications for near-shore nautical charting*. In Proceedings SPIE Ocean Optics V, Vol. 160, pp. 174-183.

Guenther, G. C. and Mesick, H. C., 1988. Analysis of airborne laser hydrography waveforms. SPIE Ocean Optics IX, 1988, 935, pp. 232-241.

Guenther, G. C., Brooks, M. W. and LaRocque, P. E., 2000a. *New capabilities of the SHOALS airborne lidar bathymetry*, Remote Sensing of Environment, vol 73, pp. 247-255.

Guenther, G. C.; LaRocque, P. E. and Lillycrop, W.J., 1994. *Multiple surface channels in SHOALS airborne lidar*. Ocean Optics XII in Proceedings SPIE, 1994, 2258, pp. 422-430.

Guenther, G.C., Thomas, R.W.L. and LaRocque, P.E., 1996a. *Design Considerations for Achieving High Accuracy with the SHOALS Bathymetric Lidar System.* SPIE Laser Remote Sensing of Natural Waters from Theory to Practice, volume 2964, pp 26–37.

Guenther, G. C., Cunningham, A. G., LaRocque, P. E. and Ried, D. J., 2000b. *Meeting the accuracy challenge in airborne lidar bathymetry*. Proc. of the 20th EARSeL Symposium: Workshop on Lidar Remote Sensing of Land and Sea, European Association of Remote Sensing Laboratories, Dresden, Germany, 2000, pp. 1-27

Guenther, G., Eisler, T. J., Riley, J. L. and Perez, S. W., 1996b. *Obstruction detection and data decimation for airborne laser hydrography*. Proceedings of the Canadian Hydrographic Conference, Halifax, N.S., pp. 51-63.

Guilford, J. and Palmer, M., 2008. *Multiple applications of bathymetric LiDAR*. Paper 6-4, Proceedings of the Canadian Hydrographic Conference and National Surveyors Conference, Victoria, BC.

Héral, M., 1994. *Estimation des houles résiduelles dans le Bassin de Marenne Oléron*. In Research project of the EEC program in the Fisheries, sector « FAR » Tropic capacity of an estuarine echosystem : determination of biological criteria for the management of cultivated population of oysters and their socio-economical consequences, Contrat 925526049, 4. pp. 1-20.

IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment, Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pages.

Irish, J. L., 2000. An introduction to coastal zone mapping with airborne lidar: the SHOALS system. In Proceedings of the 21 Corso di Aggiomamento in: Techniche per la Diffesa Dallinquinamento, Cosenza, Italy, 8 pages.

Irish, J. L. and Lillycrop, W.J., 1999. *Scanning laser mapping of the coastal zone: the SHOALS system*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Elsevier Science Inc., 1999, 54, pp.123-129.

Irish, J.L. and White, T., 1998. *Coastal engineering applications of high-resolution lidar bathymetry*. Coastal engineering, 1998, 35, pp. 47-71.

Irish, J.L. and Wozencraft, J.M., 2000. Regional mapping of the coastal zone with airborne lidar. PIANC, US Section, Newsletter, Washington, D.C., 2 pages.

Irish, J.L., McClung, J.K. and Lillycrop, W.J., 2000. Airborne lidar bathymetry: the SHOALS system. PIANC Bulletin, Vol 103, pp. 43-53.

Komar P. D., 1976. *Beach processes and sedimentation*. Prentice-Hall, New Jersey, USA, 431 pages.

Koutitonsky, V.G., Long, B., Lefaivre, D. and Sala, M., 1991. The influence of hydrodynamical processes on sediment transport in the northern Gulf of St. Lawrence. Continental Shelf Research., 11, pp.1209-1221.

Krumbein W.C., 1936. Application of logarithmic moments to size frequency distribution of sediments. Journal of Sedimentary Petrology. Vol. 6, pp. 35-47.

Kuus, P., 2008. Bottom Tracking Issues and Recognition Thereof using SHOALS3000 Green Laser in Dense Fields of Zostera Marina and Laminaria sp. M.Sc.E.thesis, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, N.B., Canada, 230 pp.

Labsphere, Inc., 2006. Optical-Grade spectralon material. Site de la société Labsphere, [en ligne]. http://www.labsphere.com/productdetail.aspx?id=226 (Page consultée le 11 juin 2008) LaRocque, R.E., Banic, J.R. and Cunningham, A.G., 2004. *Design description and field testing of the SHOALS-1000T airborne bathymeter*. Proceedings SPIE volume 5412, Laser Radar Technology and Applications IX, pp162-184.

Lee, M. and Tuell, G., 2003. *A technique for generating bottom reflectance images from SHOALS data*. U.S. Hydrographic Conference, Biloxi, MS, 13 pages.

Le Roux, C., Pastol, Y. and Louvart, L., 2006. *LITTO3D* ® - A SEAMLESS DIGITAL TERRAIN MODEL. Proceeding of coastGIS 2006, 13-17 July in Wollongong and Sydney, Australia.

Lillycrop, W. J. and Banic, J. R., 1993. Advancements in the U.S. Army Corps of Engineers hydrographic survey capabilities: the SHOALS sytem. Marine geodesy, 1993, 15, pp.177-185.

Lillycrop, W.J., Parson, L.E., and Guenther, G.C., 1993. *Processing lidar returns to extract water depth*. In Proceedings Int'l. Symp. Spectral Sens. Res., Nov. 1992, Maui, Hawaii.

Lockhart, C., Arumugam, D. and Millar, D., 2005. *Meeting Hydrographic Charting Specifications with the SHOALS-1000T Airborne Lidar Bathymetry*. U.S.Hydrographic Conference Proceedings, San Diego, California, 2005, 8 pp.

Logimer, 1984. Étude du littoral de la MRC de Bonaventure. Logimer Inc., Québec, QC, Canada. 66 pages.

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. Rapport pour le Ministère des Transports du Québec. INRS-ETE, Québec, QC, Canada. 121 pages, annexes.

Long, B., Cottin, A. and Collin, A., 2007. *What Optech's Bathymetric Lidar Sees Underwater*. IGARSS (International Geoscience and Remote Sensing Symposium) 2007, (23 - 27 Juillet 2007, Barcelone, Espagne).

Long B.F., Xhardé, R. and Boucher, M., 2006. *Significance of LiDAR return signal intensities in coastal zone mapping applications*. Proceedings of the 2006 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium and 27th Canadian Symposium on Remote Sensing, Denver, CO, USA. 4 pages.

Louvart, L. and Grateau, C., 2005. The Litto3D project. IEEE Conference & Exhibition, Oceans'05 Europe, 20-23 juin 2005, Le Quartz, Brest, France, 8 pages.

McClung Wozencraft, J. and Irish, J.L., 2000. Airborne lidar surveys and regional sediment management. Proceedings of the 20th EARSeL Symposium: Workshop on

Lidar Remote Sensing of Land and Sea, European Association of Remote Sensing Laboratories, Dresden, Germany, 2000, 1, pp. 28-38.

Michaux, P., Debese, N. and Louvart, L., 2005. *The Litto3D Project: The French approach to integrated coastal management.* in Shallow Survey 2005, 4th International conference high resolution surveys in shallow water, Plymouth, Devon, United Kingdom, 12-15 septembre 2005.

Morang, A., Irish, J. L. and Pope, J., 1996. *Hurricane Opal morphodynamic impacts on east pass, Florida: preliminary findings*. Proceedings of the 9th national conference on beach preservation technology, St Petersburg, FL.

Optech Incorporated, 2004a. SHOALS-1000T Airborne Operation Manual. document number: 001565/Rev B, May 2005, 311 pages.

Optech Incorporated, 2004b. SHOALS-1000T Ground Control System User Manual. document number: 0015767/Rev D/5.10, May 2004, 184 pages.

Optech Incorporated, 2004c. *Field Test Report for CHARTS*, contract number: DACW42-01-C-0023, 82 pages.

Organisation hydrographique internationale, 1998. Normes OHI pour les levés hydrographiques. 4^{ième} édition, avril 1998, publication spéciale 44, publié par le Bureau hydrographique international, Monaco, 27 pages.

Pastol, Y. and Louvart, L., 2007. SHOM: *Bathymetric LiDAR and hydrography*. First FUDOTERAM workshop - GEOIDE, (28 - 30 mars 2007, Toronto, ON, Canada).

Pe'eri, S. and Mayer, L., 2007. *Extending Airborne LiDAR Bathymetry (ALB) Capabilities using Inelastic Scattering*. First FUDOTERAM workshop - GEOIDE, (28 - 30 mars 2007, Toronto, ON, Canada).

Pe'eri, S. and Philpot, W., 2007. *Increasing the Existence of Very Shallow-Water LIDAR Measurements Using the Red-Channel Waveforms*. In Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on. Volume: 45, Issue: 5, Part 1. pp. 1217-1223.

Pe'eri, S., Morgan, L., Armstrong, A., Philpot, W. D. and Guenther, G.C., 2007. *LIDAR as a tool for shoreline mapping*. U.S. Hydro 2007, Norfolk, VA.

Penny, M.F., Abbot, R.H., Phillips, D.M., Billard, B., Rees, D., Faulkner, D.W., Cartwright, D.G., Woodcock, B., Perry, G.J., Wilsen, P.J., Adams, T.R., and Richards, J., 1986. *Airborne laser hydrography in Australia*. Applied Optics. 25, 13, pp. 2046-2058.

Philpot, W. D. and Wang, C.K., 2002. *Detecting submerged aquatic vegetation in turbid water using a towed hyperspectral instrument*. Ocean Optics XVI, Santa Fe, New Mexico.

Pope, J. and Lillycrop, W.J., 1988. *Development of a helicopter lidar bathymeter system*. In Proceedings U.S. Army Corps of Engineers Surveying Conf., Fort Belvoir, VA, pp. 213-216.

Pope, R.W., Reed, B.A., West, G.R. and Lillycrop, W.J., 1997. Use of an airborne laser depth sounding system in a complex shallow-water environment. Proceedings of Hydrographic Symposium XVth International Hydro Conference, Monaco.

Renaud, L., 1999. Évolution et dégradation du barachois de Paspébiac. Mémoire de Maîtrise en Sciences océanographiques. UQAR, Rimouski, QC, Canada. 123 pages.

Ressources naturelles Canada, 2008. *Système canadien de référence spatiale - GPS-H en ligne*. Site de Ressources naturelles Canada. [en ligne].http://www.geod.rncan.gc.ca/tools-outils/gpsh_f.php (Page consultée le 12 juin 2008).

Ressources naturelles Canada, 2007. *Centre canadien de télédétection – Tutoriel : Notions fondamentales de télédétection*. Site de Ressources naturelles Canada. [en ligne]. http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_f.pdf (Page consultée le 12 juin 2008).

Richards, J.A., 1999. Remote Sensing Digital Image Analysis, Springer-Verlag, Berlin, 240 pages.

Riley, J.L., 1995. *Evaluating SHOALS bathymetry using NOAA hydrographic survey data*. Proceedings of the 24th Joint Meeting of UJNR Sea-Bottom Surveys Panel, Japan.

Ropars, Y., 1995. *Restauration et mise en valeur du barachois de Paspébiac*. Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, 71 pages.

Service hydrographique du Canada, 2003. Tables des marées et courants du Canada, Golfe du Saint-Laurent, Volume 2. 90 pages.

Setter, C. and Willis, R.J., 1994. *LADS -- From development to hydrographic operations*. In Proceedings of the U.S. Hydro. Conf. 1994, The Hydrographic Society, April 18-23, Norfolk, VA, Special Pub. No. 32, 134-139.

Simpkin, P.G., 2005. *The Boomer sound source as a tool for shallow water geophysical exploration*. In Marine Geophysical Researchers, 26, pp. 171-181.

Simpkin, P.G., 2007. *IKB Technologies Limited – IKB-SEISTEK*. Site IKB Technologies Limited. [en ligne]. http://www.seistec.ca/seistec.html (Site visité le 11 juin 2008).

Smith, R.A., Irish, J.L. and Smith, M.Q., 2000. Airborne lidar and airborne hyperspectral imagery: a fusion of two proven sensors for improved hydrographic surveying. Proceedings of the Canadian Hydrographic Conference, Montreal, Canada.

Sorenson, G.P., 1966. *Proposed airborne fathometer system for high-speed offshore beach mapping*. Technical Note, Standford Research Institute.

Sorenson, G.P., Honey, R.C. and Payne J.R., 1966. *Analysis of the use of airborne laser radar for submarine detection and ranging*. SRI Report No 5583, Stanford Research Institute.

Steinvall, O. and Koppari, K., 1996. *Depth sounding lidar -- an overview of Swedish activities and future prospects*. Laser Remote Sensing of Natural Waters: From Theory to Practice, V. I. Feigels, Y. I. Kopilevich, Editors, Proc. SPIE, Vol. 2964, pp. 2-25.

Steinvall, O., Koppari, K. and Karlsson, U., 1994. Airborne laser depth sounding. System aspects and performance. SPIE vol. 2258, Ocean Optics XII, pp.392-403.

Syvitski, J., 1992. *Marine geology of Baie des Chaleurs*. Géographie physique et quaternaire, 1992, 46, pp. 331-348.

Tuell, G. and Lorhentz, S., 2005. *High-level Data Fusion Software for SHOALS-1000TH*. FY05 Annual Report, 4 pages.

Tuell, G. and Park, J.Y., 2004. Use of SHOALS bottom reflectance images to constrain the inversion of a hyperspectral radiative transfer model. Proceedings of SPIE, vol. 5412, Laser Radar Technology and Applications IX, September 2004, pp. 185-193.

Tuell, G., Park, J. Y., Aitken, J., Ramnath, V., Feygels, V., Guenther, G. and Kopilevich, Y., 2005. *SHOALS-enabled 3D benthic mapping*. Proceedings SPIE: Algorithms and technologies for multispectral, hyperspectral, and ultraspectral imagery XI, 2005, 5806.

Tuell, G., Feygels, V., Kopilevich, Y., Weidemann, A.D., Cunningham, A.G., Mani, R., Podoba, V., Ramnath, Park, J. Y. and Aitken, J., 2007. *Measurement of ocean water optical properties and seafloor reflectance with Scanning Hydrogrpahic Operational Airborne Lidar Survey (SHOALS): II. Practical results and comparison with independent data.* In Proceedings SPIE Vol. 5885, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XI, S. Chen and P. Lewis Ed.. in press.

Tulldahl, M. and Steinvall, K.O., 1999. Analytical waveform generation from small objects in lidar bathymetry. Applied Optics 38, pp. 1021-1039.

Tulldahl, H., Vahlberg, C., Axelsson, A. Karlsson, H. and Jonsson P., 2007. *Sea floor classification from airborne lidar data*. Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing III, Proceedings of the SPIE, Volume 6750, pp. 675003.

Tyler, J. and Preisendorfer, R., 1962. The Sea, Hill, M. (ed.), 397 pages.

Wang, C.K. and Philpot, W.D., 2002. Using SHOALS LIDAR system to detect bottom material change. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS '02. 2002 IEEE International. Vol. 5, pp. 2690-2692.

Wang, C.K. and Philpot, W.D., 2007. Using airborne bathymetric lidar to detect bottom type variation in shallow water. Remote Sensing of Environment, vol. 106, pp. 123-135.

West, G. R., Graham, T., Smith, K. and Spittal, J., 1999. *Improving the efficiency, safety* and economy of the New Zealand national charting programme through the integrated use of lidar in a multi-sensor surveys. Proceedings of the U.S. Hydrographic Conference, Mobile, AL.

Woolard, J. W., Aslaksen, M., Longenecker, L. J. and Ryerson, A., 2003. Shoreline mapping form airborne lidar in Shilshole Bay, Washington. U.S. Hydrographic Conference, Biloxi, MS.

Wozencraft, J. and Millar, D., 2005. Airborne LiDAR and integrated technologies for coastal mapping and nautical charting. Marine technology society journal, Vol 39, Number 3, pp. 27-35.

Wozencraft, J., Francis, K. and Pope, J., 2002. SHOALS airborne laser hydrography to support lake Ontario-st lawrence river water level study. Proceedings of the Canadian Hydrographic Conference, Toronto, Canada.

Wozencraft, J., Lee, M., Tuell, G. and Philpot, W., 2003. Use of SHOALS data to produce spectrally-derived depths in Kaneohe Bay, Hawaii. U.S. Hydrographic Conference, Biloxi, MS.

Xhardé, R., 2007. Application des techniques aéroportées vidéographiques et LiDAR à l'étude des risques naturels en milieu côtier. [Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophiae doctor (Ph.D.) en Sciences de la terre]. Long, B. F. (Directeur). Québec, Université du Québec, 252 pages, 7 chapitres, 33 tableaux, 129 figures.

Xhardé, R., Boucher, M. and Long, B. F., 2006. *Coastal geohazards monitoring using airborne lidar surveys: an application in the Baie-des-Chaleurs, Quebec.* Proceedings of the 12th Canadian Coastal Conference, Dartmouth, Nova Scotia, 2006.

Yang, E., Sitar, M., Pan, W. and Francis, K., 2008. *Bridging the land/water boundary using shoals bathymetric lidar*. Proceedings of the Canadian Hydrographic Conference and National Surveyors Conference, Victoria, BC.

Ytreeide, G., 2008. THE SECCHI DISK - WHAT IS IT? Site de la Michigan Lake and Stream Associations [en ligne]. http://www.mlswa.org/secchi.htm (Page consultée le 11 juin 2008).