



Caractérisation sédimentologique et géomorphologique
des unités hydrosédimentaires de Pointe-aux-Loups et
de la Baie de Plaisance, Route 199, Îles-de-la-Madeleine



ENVIRONNEMENT



ÉTUDES ET RECHERCHES
EN TRANSPORT

**CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE DES
UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE
PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE**

Sous la direction de
Pascal Bernatchez, Ph. D.
Université du Québec à Rimouski

Présenté au ministère des Transports du Québec

Mai 2010

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports du Québec et a été financée par la Direction de l'environnement et de la recherche.

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du ministère des Transports du Québec.

Collaborateurs

Pascal Bernatchez, Ph. D., Université du Québec à Rimouski
Tarik Toubal, M. Sc., professionnel de recherche, LDGIZC, UQAR
Stéphanie Van-Wiersts, B. Sc., étudiante à la maîtrise, LDGIZC, UQAR
Susan Drejza, M. Sc., professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR
Stéphanie Friesinger, M. Sc., professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR
Isabelle Paquin, B. Sc., professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR
Steeve Dugas, B. Sc., professionnel de recherche, LDGIZC, UQAR
Tristan Boutin-Miller, B. Sc., étudiant à la maîtrise, U. Laval
Marjolaine De Sinety, technicienne, LDGIZC, UQAR
François Miousse, technicien, LDGIZC, UQAR
Sébastien Pomerleau, B. Sc., étudiant à la maîtrise, LDGIZC, UQAR
Catherine Denis, M. Sc., professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR
Étienne Bachand, B. Sc., étudiant à la maîtrise, LDGIZC, UQAR
Isabelle Lemus-Lauzon, B. Sc., LDGIZC, UQAR
David Lacombe, étudiant au baccalauréat en géographie

Soucieux de protéger l'environnement, le ministère des Transports du Québec favorise l'utilisation de papier fabriqué à partir de fibres recyclées pour la production de ses imprimés et encourage le téléchargement de cette publication.

Imprimé sur du papier Rolland Enviro100 contenant 100 % de fibres recyclées postconsommation, certifié Éco-Logo, procédé sans chlore, FSC recyclé et fabriqué à partir d'énergie biogaz.



© Université du Québec à Rimouski, 2010
ISBN 978-2-550-67469-6 (imprimé)
ISBN 978-2-550-67470-2 (PDF)

Dépôt légal – 2013

Bibliothèque et Archives nationales du Québec

Tous droits réservés. La reproduction de ce document par procédé mécanique ou électronique, y compris la microreproduction, et sa traduction, même partielles sont interdites sans l'autorisation écrite des Publications du Québec.

Titre et sous-titre du rapport Caractérisation sédimentologique et géomorphologique des unités hydrosédimentaires de Pointe-aux-Loups et de la baie de Plaisance, route 199, Îles-de-la-Madeleine	N° du rapport Transports Québec RTQ-11-03 Date de publication du rapport (Année-Mois) 2012-12	
Titre du projet de recherche Caractérisation sédimentologique et géomorphologique des unités hydrosédimentaires de Pointe-aux-Loups et de la baie de Plaisance, route 199, Îles-de-la-Madeleine	N° du contrat 33-110-X002.1	N° de projet ou dossier X002.1
Responsable de recherche Pascal Bernatchez, Ph. D., Géomorphologie côtière et télédétection Université du Québec à Rimouski	Date du début de la recherche Mai 2008	Date de fin de la recherche mai 2010
Auteur(s) du rapport Bernatchez, Pascal, Tarik Toubal et coll.	Coût total de l'étude 160 000 \$	
Étude ou recherche réalisée par Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières Département de biologie, chimie et géographie Université du Québec à Rimouski 300, allée des Ursulines, C. P. 3300, succ. A Rimouski (Québec) G5L 3A1	Étude ou recherche financée par (nom et adresse de l'organisme) Direction de l'environnement et de la recherche Ministère des Transports 930, chemin Sainte-Foy, 6^e étage Québec (Québec) G1S 4X9	
Problématique Le contexte géomorphologique particulier des îles de la Madeleine et leur situation géographique au centre du golfe du Saint-Laurent en font un milieu très sensible aux ondes de tempêtes et à la hausse du niveau marin, hausse qui devrait s'accroître dans le contexte des changements climatiques. La réduction du couvert de glace littorale et une période glaciaire écourtée, comme ce fut le cas à l'hiver 2007, soumet le littoral à un plus grand nombre de tempêtes. L'érosion côtière aux îles de la Madeleine soulève un enjeu important, celui du maintien et de la gestion de la route 199 qui franchit d'étroites flèches sableuses (tombolos) et constitue le seul lien routier permettant le passage d'une île à l'autre. Depuis sa construction dans les secteurs à proximité de la mer, le ministère des Transports du Québec (MTQ) a dû aménager et maintenir des structures de protection de la route contre l'érosion marine, structures qui nécessitent des interventions d'entretien récurrentes et souvent effectuées en urgence à la suite des tempêtes. Cette problématique est particulièrement préoccupante dans le secteur de la plage de la Pointe aux Loups et de la baie de Plaisance. Aux Îles-de-la-Madeleine, tous les sites subissant l'érosion le long de la route 199 sont protégés au moyen d'enrochements ou de murets de bois. Ces structures doivent être entretenues fréquemment pour préserver la liaison routière entre les différentes îles, et les coûts d'entretien risquent d'augmenter avec les changements climatiques. Ces ouvrages, même s'ils permettent de stabiliser la migration du trait de côte, modifient généralement les processus côtiers, réduisent les apports sédimentaires et amplifient l'érosion des plages au pied des ouvrages de protection de la route, ce qui réduit la résilience de la côte aux événements de tempête et peut avoir comme conséquence d'augmenter le risque de submersion de l'arrière-côte lors des événements de tempête. Dans un tel contexte, des solutions alternatives doivent être envisagées. Ces solutions doivent être non seulement adaptées à la dynamique côtière actuelle, mais surtout à celle appréhendée avec les changements climatiques pour les sites ciblés par le MTQ.		

Objectifs

L'étude vise à acquérir les données géomorphologiques et sédimentologiques de base, essentielles et préalables à la réalisation d'une étude coûts-avantages sur les différentes solutions d'adaptation à l'érosion et à la submersion côtière le long de la route 199 dans les secteurs de la baie de Plaisance et de Pointe-aux-Loups aux Îles-de-la-Madeleine. Les objectifs sont :

- dresser l'évolution historique de la dynamique des systèmes côtiers et départager les causes naturelles et anthropiques qui régissent leur évolution;
- établir le budget sédimentaire global des unités hydrosédimentaires de ces systèmes côtiers et quantifier le transit, les gains ainsi que les pertes nettes de sédiments;
- effectuer une caractérisation sédimentologique et géomorphologique des zones supratidale, intertidale et pré littorale;
- établir les profils de plage types des zones artificielles et naturelles;
- quantifier les effets des structures de protection sur la morphosédimentologie des plages.

Méthodologie

La méthodologie utilisée dans le projet est diversifiée et a fait appel à des techniques de terrain, de laboratoire et aussi numériques. Les levés LiDAR ont permis d'obtenir une cartographie détaillée des secteurs d'étude et des modèles numériques de terrain précis.

L'évolution historique des systèmes côtiers par photo-interprétation multodate (photos aériennes de 1963 à 2008) a été réalisée pour mieux comprendre la dynamique d'évolution des sites à l'étude. Aussi, une segmentation et une caractérisation côtière ont été réalisées à l'été 2008 et à l'été 2009 afin de délimiter les segments homogènes. Pour évaluer la variation topographique interannuelle des plages, des profils de plage ont été effectués le long de transects perpendiculaires à la côte à l'aide d'un DGPS, et 720 échantillons de plage ont été prélevés pendant la période 2008-2009. Des images numériques aéroportées acquises à partir de la plate-forme SAIGA-3D en 2008 et en 2009 ont permis de cartographier la géomorphologie de la zone intertidale, de quantifier l'évolution à haute résolution sur une période annuelle et ont servi aussi à arrimer les données bathymétriques. Les images multispectrales acquises en 2008 ont été mosaïquées de manière automatisées avec le logiciel C3D Mosaïc 4.2 et orthorectifiées à partir des données LiDAR. Pour les deux secteurs à l'étude, un budget sédimentaire et un indice de budget sédimentaire des plages ont été effectués.

Des caméras de suivi ont été installées sur deux sites relevés au DGPS pour identifier les événements et les processus côtiers affectant le littoral.

Résultats et recommandations

Les résultats de cette recherche peuvent contribuer à améliorer d'éventuelles interventions du MTQ pour la protection de la route 199 dans les deux portions étudiées, mais aussi de manière plus générale. Tout d'abord, toute gestion devrait être menée à l'échelle de l'intégralité de la cellule hydrosédimentaire, notamment en ce qui a trait aux effets des interventions telles que l'enrochement. Bien que les ouvrages de protection en enrochement aient permis de limiter le recul de la côte, l'abaissement du niveau de la plage et la réduction de sa largeur qu'ils ont provoqué entraînent une augmentation du risque de submersion de la route 199. Ces ouvrages ont aussi amplifié l'érosion à leurs extrémités. Afin d'atténuer ces effets, la recharge en sable semble être une solution à envisager dans le contexte madelinot, puisqu'elle permet d'augmenter la résilience de la côte par l'élargissement de la plage et l'augmentation du budget sédimentaire. Le niveau de la plage postrecharge devra toutefois être assez haut pour soustraire la base des enrochements à l'action des vagues. Des solutions devront aussi être envisagées pour atténuer les effets de bout qui peuvent se faire sentir en aval des ouvrages sur une distance de 600 m pour le trait de côte et de 75 m pour la morphologie de la plage. L'élargissement et l'accrétion de la plage, ainsi que la progradation du trait de côte à la suite de l'échouage d'une barge dans l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups, permettent d'évaluer la possibilité d'implanter des brise-lames comme solutions d'adaptation. Enfin, l'étude de l'évolution historique de la côte et du budget sédimentaire a permis de cartographier les zones sensibles à l'érosion, ce qui permettra de planifier à long terme toute nouvelle installation d'infrastructure afin de limiter leur vulnérabilité aux aléas côtiers. Il est aussi essentiel dans la planification de l'implantation des infrastructures routières ou des interventions de prendre en considération la dynamique naturelle des dunes qui peuvent être sujettes à des cycles d'érosion et d'accumulation successifs importants. Ces milieux naturels servent de tampons contre l'érosion et la submersion, et devraient être protégés afin de maintenir leur résilience, puisqu'ils limitent la vulnérabilité des tronçons routiers situés derrière.

Mots clés

Changements climatiques, érosion côtière, plages, route 199, Îles-de-la-Madeleine, empierrement, LiDAR, caractérisation sédimentologique, bilan sédimentaire, cellules hydrosédimentaires, profils de plage, profils bathymétriques

Nombre de pages

177

Nombre de références bibliographiques

36

Langue du document

☒ Français
☐ Anglais
Autre (spécifier) :

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	19
1.1 Mise en contexte du mandat	19
1.2. Objectifs du projet.....	21
1.3. Présentation du rapport.....	21
2. MÉTHODOLOGIE	23
2.1 Segmentation et caractérisation côtières	23
2.2 Relevés topographiques et sédimentologiques de la plage	24
2.3 Échantillonnage en mer.....	25
2.4. Traitement des échantillons en laboratoire.....	28
2.4.1 <i>Traitement préalable</i>	28
2.4.2 <i>Analyse proprement dite</i>	29
2.5 Télédétection aéroportée.....	29
2.5.1 <i>Caractéristiques de la plate-forme aéroportée utilisée et acquisition des données aéroportées</i>	29
2.5.2 <i>Acquisition des données aéroportées et calibration des caméras</i>	30
2.5.3 <i>Traitement des données aéroportées</i>	30
2.5.3.1 Traitement des données LiDAR.....	30
2.5.3.2 Développement des modèles d'élévation de terrain et des contours topographiques.....	31
2.5.3.3 Mosaïquage et orthorectification des images multispectrales.....	31
2.5.4 <i>Traitement des données bathymétriques</i>	32
2.5.4.1 Transformation du zéro des cartes	32
2.5.4.1.1 Unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance	32
2.5.4.1.2 Unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups	32
2.5.4.2 Cartographie de la bathymétrie.....	33
2.6 Évaluation du bilan sédimentaire.....	33
2.6.1 <i>Largeur des plages et du cordon dunaire</i>	33
2.6.2 <i>Budget sédimentaire</i>	34
2.6.3 <i>Indice du budget sédimentaire des plages</i>	34
2.7 Évolution historique de la zone côtière par photo-interprétation	35
2.7.1 <i>Le trait de côte et la ligne de rivage</i>	35
2.7.2 <i>Intégration des photographies aériennes dans un SIG et calcul de l'évolution historique</i>	36
2.8 Évolution récente du trait de côte (2005-2009)	37
2.8.1 <i>Réseau de suivi de l'érosion côtière</i>	37
2.8.2 <i>Relevés au DGPS du trait de côte</i>	37
2.8.3 <i>Caméras de suivi</i>	40
3. CARACTÉRISATION DES TYPES DE CÔTE	41
3.1 Caractérisation côtière de la baie de Plaisance	41
3.1.1 <i>Côte à falaise rocheuse de la baie de Plaisance</i>	43
3.1.2 <i>Côte à terrasse de plage de la baie de Plaisance</i>	44
3.1.3 <i>Côte à tombolo de la baie de Plaisance</i>	44
3.2 Caractérisation côtière du secteur de Pointe-aux-Loups.....	46

3.2.1 Côte deltaïque à base rocheuse du secteur de Pointe-aux-Loups	48
3.2.2 Côte dunaire à base rocheuse du secteur de Pointe-aux-Loups	49
3.2.3 Côte à falaise rocheuse du secteur de Pointe-aux-Loups	49
3.2.4 Côte à terrasse de plage du secteur de Pointe-aux-Loups	50
3.2.5 Côte à tombolo du secteur de Pointe-aux-Loups	51
4. CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE DE LA ZONE CÔTIÈRE	53
4.1 Délimitation des unités et des cellules hydrosédimentaires	53
4.2 Analyses sédimentologiques (2008-2009)	56
4.2.1 Unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance	56
4.2.1.1 Caractérisation sédimentologique des plages.....	56
4.2.1.2. Caractérisation sédimentologique de la zone pré littorale.....	64
4.2.2 Unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups	69
4.2.2.1 Cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups.....	69
4.2.2.1.1 Caractérisation sédimentologique des plages	69
4.2.2.1.2 Caractérisation sédimentologique de la zone pré littorale	74
4.2.2.2 Cellule hydrosédimentaire de Fatima.....	80
4.2.2.2.1 Caractérisation sédimentologique des plages	80
4.2.2.2.2 Caractérisation sédimentologique de la zone pré littorale	84
5. ÉVOLUTION HISTORIQUE ET RÉCENTE DE LA CÔTE (1963-2009)	89
5.1 Évolution historique (1963-2008).....	89
5.1.1 Évolution côtière de l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance	89
5.1.1.1 Côtes à falaises rocheuses à sommet meuble.....	92
5.1.1.2 Côtes à falaises rocheuses	92
5.1.1.3 Côtes à terrasse de plage	93
5.1.1.4 Côtes à tombolo.....	93
5.1.2 Évolution côtière de l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups	94
5.1.2.1 Côtes deltaïques à base rocheuse.....	97
5.1.2.2 Côtes à falaises rocheuses à sommet meuble.....	98
5.1.2.3 Côtes à falaises rocheuses	98
5.1.2.4 Côtes dunaires à base rocheuse	99
5.1.2.5 Côtes à terrasse de plage	99
5.1.2.6 Côtes à tombolo.....	99
5.1.3 Synthèse de l'évolution historique	100
5.2 Évolution récente du littoral (2005-2008).....	101
5.2.1 Évolution de la ligne de rivage.....	101
5.2.2 Évolution des profils de plage et bathymétriques	107
5.2.2.1 Unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance	107
5.2.2.2 Unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups	118
5.2.2.3 Synthèse de l'évolution des profils de plage et bathymétriques....	138
6. BILAN SÉDIMENTAIRE DE LA ZONE CÔTIÈRE.....	141
6.1 Unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance	141
6.1.1 Secteur de La Martinique	142
6.1.1.1 Largeur des plages du secteur de La Martinique	142

6.1.1.2	Indice du budget sédimentaire des plages pour le secteur hydrosédimentaire de La Martinique	143
6.1.1.3	Volume sédimentaire et largeur du cordon dunaire du secteur de La Martinique	147
6.1.2	<i>Secteur du Cap</i>	149
6.1.2.1	Largeur des plages du secteur du Cap	149
6.1.2.2	Indice du budget sédimentaire des plages pour le secteur du Cap	151
6.1.2.3	Volume sédimentaire et largeur du cordon dunaire du secteur du Cap	153
6.2	Unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups	156
6.2.1	<i>Cellule hydrosédimentaire de Fatima</i>	156
6.2.1.1	Largeur des plages de la cellule hydrosédimentaire de Fatima ...	156
6.2.1.2	Indice du budget sédimentaire des plages pour la cellule hydrosédimentaire de Fatima.....	157
6.2.1.3	Volume sédimentaire et largeur du cordon dunaire de la cellule hydrosédimentaire de Fatima.....	160
6.2.2	<i>Cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups</i>	163
6.2.2.1	Largeur des plages de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups	163
6.2.2.2	Indice du budget sédimentaire des plages pour la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups.....	164
6.2.2.3	Volume sédimentaire et largeur du cordon dunaire de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups.....	166
6.3	Comparaison de l'IBSP pour les unités hydrosédimentaires de la baie de Plaisance et de Pointe-aux-Loups	169
7.	SYNTHÈSE DES FACTEURS ET DES CAUSES RESPONSABLES DE LA DYNAMIQUE DE L'ÉVOLUTION DU LITTORAL DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE LA BAIE DE PLAISANCE ET DE POINTE-AUX-LOUPS .	173
7.1	Rythme d'évolution côtière	173
7.1.1	<i>Alternances de cycles de progradation et d'érosion de la ligne de rivage</i>	173
7.1.2	<i>Relation entre la largeur des plages et les taux d'érosion</i>	175
7.1.3	<i>Grandes fluctuations dans la migration de la ligne de rivage en raison d'événements géomorphologiques extrêmes</i>	177
7.1.3.1	Unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups	177
7.1.3.2	Unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance : intervention humaine et dynamique sédimentaire particulière d'évolution de l'ancien goulet	177
7.2	Événements de tempête.....	180
7.3	Relation entre les processus éoliens et hydrodynamiques	182
7.4	Effet de la dérive littorale	185
7.5	Effet des courants de retour	187
7.6	Effets de la morphologie de l'avant-plage	188
7.7	Effets des mouvements gravitaires en bordure des tombolos.....	188
7.8	Effets de l'artificialité sur l'évolution côtière	191
7.8.1	<i>Unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance</i>	191
7.8.2	<i>Unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups</i>	192

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

8. CONCLUSION.....	197
9. RÉFÉRENCES	201
10. ANNEXES	205

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Carte de localisation générale des secteurs d'étude aux Îles-de-la-Madeleine	20
Figure 2.	Terminologie et subdivisions de la zone côtière pour une côte sans falaise	24
Figure 3.	Terminologie et subdivisions de la zone côtière pour une côte à falaise (et microfalaise de plus de 1,5 m).....	24
Figure 4.	Méthode d'échantillonnage : transect perpendiculaire au trait de côte	25
Figure 5.	Localisation des profils de plage, des largeurs de plage et des échantillons sédimentologiques dans la baie de Plaisance	26
Figure 6.	Localisation des profils de plage, des largeurs de plage et des échantillons sédimentologiques à Pointe-aux-Loups	27
Figure 7.	Trait utilisé pour l'évolution historique selon différentes configurations de côte.....	36
Figure 8.	Tracé du trait de côte (points GPS) du secteur de Pointe-aux-Loups (Boutin-Miller, 2010).....	38
Figure 9.	Tracé du trait de côte (points GPS) du secteur de la baie de Plaisance	39
Figure 10.	Caméras de suivi dans le secteur de la baie de Plaisance	40
Figure 11.	Type et état de la côte de l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance.....	42
Figure 12.	Exemple de falaise rocheuse à sommet meuble de l'anse au Plâtre (baie de Plaisance).....	43
Figure 13.	Exemple de terrasse de plage de la baie de Plaisance	44
Figure 14.	Exemple de côte à tombolo active de La Martinique (baie de Plaisance).	45
Figure 15.	Type et état de la côte de l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups.....	47
Figure 16.	Exemple de côte deltaïque à base rocheuse de l'île de la Pointe aux Loups	48
Figure 17.	Exemple de côte dunaire à base rocheuse (Grosse-Île).....	49
Figure 18.	Exemple de côte à falaise rocheuse à Pointe-aux-Loups.....	50
Figure 19.	Vue aérienne d'un exemple de côte à terrasse de plage avec le dépôt de sable de dragage (secteur de Pointe-aux-Loups).....	51
Figure 20.	Exemple de côte à tombolo (secteur de Pointe-aux-Loups).....	52
Figure 21.	Cellules hydrosédimentaires de l'unité de la baie de Plaisance	54
Figure 22.	Cellules hydrosédimentaires de l'unité de Pointe-aux-Loups	55

Figure 23.	Composition granulométrique moyenne des sédiments de la baie de Plaisance.....	59
Figure 24	Composition granulométrique moyenne de la baie de Plaisance	60
Figure 25.	Composition granulométrique moyenne des sédiments de la baie de Plaisance.....	61
Figure 26.	Évolution temporelle de la taille moyenne des sédiments de la plage de la baie de Plaisance	62
Figure 27.	Évolution temporelle de la taille moyenne des sédiments de plage de la baie de Plaisance	63
Figure 28.	Composition granulométrique des sédiments marins de la baie de Plaisance.....	65
Figure 29.	Composition granulométrique des sédiments marins de la baie de Plaisance.....	66
Figure 30.	Composition granulométrique des sédiments marins de la baie de Plaisance.....	67
Figure 31.	Taille moyenne des sédiments marins de la baie de Plaisance	68
Figure 32.	Composition granulométrique moyenne des sédiments des deux cellules hydrosédimentaires du secteur de Pointe-aux-Loups.....	70
Figure 33.	Évolution temporelle de la taille moyenne des sédiments de plage de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups	71
Figure 34.	Évolution temporelle de la taille moyenne des sédiments de plage de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups	72
Figure 35.	Évolution temporelle de la taille moyenne des sédiments de plage de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups	73
Figure 36.	Composition granulométrique des sédiments marins de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups	75
Figure 37.	Composition granulométrique des sédiments marins de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups	76
Figure 38.	Composition granulométrique des sédiments marins de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups	77
Figure 39.	Composition granulométrique des sédiments marins de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups	78
Figure 40.	Taille moyenne des sédiments marins de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups	79
Figure 41.	Composition granulométrique moyenne des sédiments de la cellule hydrosédimentaire de Fatima	81
Figure 42.	Composition granulométrique moyenne des sédiments de la cellule hydrosédimentaire de Fatima	82
Figure 43.	Évolution temporelle de la taille moyenne des sédiments de plage de la cellule hydrosédimentaire de Fatima.....	83
Figure 44 :	Composition granulométrique des sédiments marins de la cellule hydrosédimentaire de Fatima	85

Figure 45.	Composition granulométrique des sédiments marins de la cellule hydrosédimentaire de Fatima	86
Figure 46.	Composition granulométrique des sédiments marins de la cellule hydrosédimentaire de Fatima	87
Figure 47.	Taille moyenne des sédiments marins de la cellule hydrosédimentaire de Fatima	88
Figure 48.	Taux de migration de la ligne de rivage (1963-2008) pour l'unité de la baie de Plaisance	89
Figure 49.	Évolution côtière historique du secteur de La Martinique	90
Figure 50.	Évolution côtière historique du secteur du Cap La dynamique d'évolution du littoral est différente selon les types de côtes (tableau 7 et figure 51).....	91
Figure 51.	Taux de migration par type de côte selon les périodes	92
Figure 52.	Taux de migration de la ligne de rivage (1963-2008) pour l'unité de	94
Figure 53.	Évolution côtière historique de la cellule hydrosédimentaire de Fatima	95
Figure 54.	Évolution côtière historique de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups	96
Figure 55.	Taux de migration par type de côte selon les périodes	97
Figure 56.	Secteur du taux d'érosion maximum de la pointe aux Loups.....	98
Figure 57.	Localisation et mesures de migration du réseau de suivi (2005-2008) de la baie de Plaisance	102
Figure 58.	Localisation et mesures du réseau de suivi (2005-2008) de l'unité de Pointe-aux-Loups	103
Figure 59.	Évolution du trait de côte (2008-2009) d'un secteur de la baie de Plaisance (Boutin-Miller, 2010)	105
Figure 60.	Évolution du trait de côte (2008-2009) d'un secteur de Pointe-aux-Loups (Boutin-Miller, 2010)	106
Figure 61.	Largeurs moyennes de la plage (haute plage + haut estran) de la baie de Plaisance (m)	108
Figure 62.	Profils de plage et profils bathymétriques de la baie de Plaisance (MAR1-MAR5).....	111
Figure 63.	Profil de plage et profils bathymétriques de la baie de Plaisance (MAR6-MAR10).....	112
Figure 64.	Profils de plage naturels et profils bathymétriques de la baie de Plaisance (MAR11-MAR15).....	114
Figure 65.	Profils de plage naturels et profils bathymétriques de la baie de Plaisance (MAR16-MAR20).....	115
Figure 66.	Carte bathymétrique avec la localisation des profils bathymétriques et de la plage de l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance	117
Figure 67.	Élargissement de la largeur de la plage devant le secteur rechargé en sable	119
Figure 68.	Largeurs moyennes de plage de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups	120

Figure 69.	Profils de plage et profils bathymétriques de Pointe-aux-Loups (PLOU1-PLOU5).....	121
Figure 70.	Profils de plage et profils bathymétriques de Pointe-aux-Loups.....	122
Figure 71.	Profils de plage et profils bathymétriques de Pointe-aux-Loups (PLOU11-PLOU15).....	123
Figure 72.	Profils de plage et profils bathymétriques de Pointe-aux-Loups (PLOU16-PLOU20).....	124
Figure 73.	Profils de plage et profils bathymétriques de Pointe-aux-Loups (PLOU21-PLOU25).....	125
Figure 74.	Profils de plage et profils bathymétriques de Pointe-aux-Loups (PLOU26-PLOU29B).....	126
Figure 75.	Profils de plage et profils bathymétriques de Pointe-aux-Loups (PLOU30-PLOU34).....	127
Figure 76.	Profils de plage et profils bathymétriques de Pointe-aux-Loups (PLOU35-PLOU39).....	128
Figure 77.	Profils de plage et profils bathymétriques de Pointe-aux-Loups (PLOU40-PLOU44A).....	129
Figure 78.	Profils de plage et profils bathymétriques de Pointe-aux-Loups (PLOU45A-PLOU49A).....	130
Figure 79.	Largeurs moyennes de plage de la cellule hydrosédimentaire de Fatima	132
Figure 80.	Profils de plage et profils bathymétriques de Fatima (PLOU50-PLOU54).....	133
Figure 81.	Profils de plage et profils bathymétriques de Fatima (PLOU55-PLOU59).....	134
Figure 82.	Carte bathymétrique avec localisation des profils bathymétriques et de plage de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups	136
Figure 83.	Carte bathymétrique avec localisation des profils bathymétriques et de plage de la cellule hydrosédimentaire de Fatima	137
Figure 84.	Largeur des plages au 50 m et moyenne par compartiment de 500 m pour le secteur de La Martinique..	142
Figure 85.	Portion de côte enrochée au nord du secteur de La Martinique	142
Figure 86.	Indice du budget sédimentaire des plages et volume sédimentaire des plages du secteur de La Martinique	144
Figure 87.	Indice du budget sédimentaire des plages du secteur enroché.....	146
Figure 88.	Volume sédimentaire et largeur du cordon dunaire du secteur de La Martinique	148
Figure 89.	Taux de migration historique de la ligne de rivage (1963-2008) par compartiment de 500 m pour le secteur de La Martinique	149
Figure 90.	Largeur des plages au 50 m et moyenne par compartiment de 500 m pour le secteur du Cap.....	150

Figure 91.	Largeurs de la plage dans le secteur des résidences du chemin de la Baie-de-Plaisance	151
Figure 92.	Indice du budget sédimentaire des plages et volume sédimentaire des plages du secteur du Cap.....	152
Figure 93.	Volume sédimentaire et largeur du cordon dunaire du secteur du Cap	154
Figure 94.	Taux de migration historique de la ligne de rivage (1963-2008) par compartiment de 500 m pour le secteur du Cap	155
Figure 95.	Largeur des plages au 50 m et moyenne par compartiment de 500 m pour la cellule hydrosédimentaire de Fatima	156
Figure 96.	Effets de la présence de l'épave d'une barge sur la largeur de la plage	157
Figure 97.	Indice du budget sédimentaire des plages et volume sédimentaire des plages de la cellule hydrosédimentaire de Fatima.....	159
Figure 98.	Volume sédimentaire et largeur du cordon dunaire de la cellule hydrosédimentaire de Fatima	161
Figure 99.	Taux de migration historique de la ligne de rivage (1963-2008) par compartiment de 500 m pour la cellule hydrosédimentaire de Fatima	162
Figure 100.	Largeur des plages au 50 m et moyenne par compartiment de 500 m pour la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups	163
Figure 101.	Largeur des plages du secteur enroché de Pointe-aux-Loups.....	164
Figure 102.	Indice du budget sédimentaire des plages et volume sédimentaire des plages de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups.....	165
Figure 103.	Volume sédimentaire et largeur du cordon dunaire de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups.....	167
Figure 104.	Taux de migration historique de la ligne de rivage (1963-2008) par compartiment de 500 m pour la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups	168
Figure 105.	Indice du budget sédimentaire des plages des unités hydrosédimentaires de la baie de Plaisance et de Pointe-aux-Loups	170
Figure 106.	Exemple de cycles accumulation/érosion pour un secteur de côte à tombolo (au sud de la baie de Plaisance).....	174
Figure 107.	Exemples de cycles accumulation/érosion sur le tombolo de la cellule de Fatima (à l'est du cap de l'Hôpital).....	174
Figure 108.	Relation entre la largeur des plages et le taux de déplacement de la ligne de rivage pour la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups (Bernatchez et coll., 2008).	176
Figure 109.	Dynamique de l'ancien goulet de la baie de Plaisance.....	179

Figure 110. Événements de sapement basal inventoriés du 16 novembre 2008 au 31 août 2009 selon les niveaux d'eau mesurés (modifié de Boutin-Miller, 2010).	181
Figure 111. Effets de l'orientation de la côte sur les niveaux d'eau atteints lors d'un même événement, 27 août 2009 à 17 h 45.	182
Figure 112. Accumulation éolienne et érosion par les vagues dans la baie de Plaisance	184
Figure 113. Tendence d'évolution du tombolo de la cellule hydrosédimentaire de Fatima	186
Figure 114. Tendence d'évolution du tombolo de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups (exclusion faite du secteur artificialisé)	186
Figure 115. Accumulation à la fin de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups.....	187
Figure 116. Effet des courants de retour sur les plages des tombolos de Pointe-aux-Loups.....	188
Figure 117. Coulées de sable au pied de la falaise, secteur de Pointe-aux-Loups, 18 mars 2010.....	189
Figure 118. Nombre d'événements de mouvements gravitaires répertoriés par mois	190
Figure 119. Répartition des mouvements gravitaires en fonction de la température.	190
Figure 120. Secteur artificialisé pour la protection de la route 199	194
Figure 121. Épave ayant créé un phénomène local d'accrétion (cellule de Fatima)	195

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Précision et résolution des images avec et sans calibrage externe.....	30
Tableau 2. Ajustement vertical par rapport à 3 repères de nivellement pour l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance.....	32
Tableau 3. Ajustement vertical par rapport à 4 repères de nivellement pour l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups.....	33
Tableau 4. Classes de l'indice de budget sédimentaire des plages selon l'unité hydrosédimentaire	31
Tableau 5. Types de côte, état de la côte et processus actifs côtiers	41
Tableau 6. Types de côte, état de la côte et processus actifs côtiers dans le secteur de Pointe-aux-Loups	46
Tableau 7. Taux de migration de la ligne de rivage par période et par type de côte (m/an).....	92
Tableau 8. Proportion de côtes à tombolo en érosion ou en accumulation (en %)	90
Tableau 9. Taux d'érosion et d'accumulation par période (m/an)	90
Tableau 10. Taux de migration de la côte par période et par type de côte (m/an).....	97
Tableau 11. Proportion de côtes à tombolo sujettes à l'érosion et à l'accrétion (%)	100
Tableau 12. Taux d'érosion et d'accumulation pour les tombolos (m/an)	100
Tableau 13. Évolution du trait de côte des îles de la Madeleine (2008-2009).....	100
Tableau 14. Synthèse des résultats pour les deux unités hydrosédimentaires à l'étude.....	141
Tableau 15. Synthèse des résultats pour l'unité de la baie de Plaisance et pour les deux cellules hydrosédimentaires	141
Tableau 16. Indice du budget sédimentaire des plages pour le secteur hydrosédimentaire de La Martinique.....	145
Tableau 17. Indice du budget sédimentaire des plages pour le secteur du Cap	153
Tableau 18. Synthèse des résultats pour l'unité de Pointe-aux-Loups et pour les deux cellules hydrosédimentaires	156
Tableau 19. Indice du budget sédimentaire des plages pour la cellule hydrosédimentaire de Fatima	160
Tableau 20. Indice du budget sédimentaire des plages pour la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups	166
Tableau 21. Variabilité inter-cellule hydrosédimentaire de l'IBSP	169
Tableau 22. Variabilité intra-cellule hydrosédimentaire de l'IBSP	171
Tableau 23. Évolution saisonnière du trait de côte en bordure des caméras de suivi (m).....	181
Tableau 24. Nombre d'événements de recul répertoriés à l'aide des images des caméras installées sur les sites de Pointe-aux-Loups et de la baie de Plaisance.....	189

TABLE DES SIGLES ET DES ABRÉVIATIONS

DGPS : Differential Global Positioning System

CIDCO : Centre interdisciplinaire de développement en cartographie des océans

IBSP : Indice de budget sédimentaire des plages

km : kilomètres

ko : kilo octet

LDGIZC : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières

LiDAR : Light Detection and Ranging ou détection et télémétrie par ondes lumineuses

Mpx : mégapixels

MTQ : ministère des Transports du Québec

m³ : mètres cubes

m² : mètres carrés

m/an : mètres par année

nm : nanomètres

µm : micromètres

UQAR : Université du Québec à Rimouski

1. INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte du mandat

En 2006, 68 % des côtes des îles de la Madeleine subissaient les effets de l'érosion, ce qui représentait la plus forte valeur de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent (Bernatchez, 2006a, b). Les taux de recul moyens sont aussi parmi les plus importants. L'érosion côtière aux îles de la Madeleine soulève un enjeu important, celui du maintien et de la gestion de la route 199 (Bernatchez et Dubois, 2004; Bernatchez, 2006b; Jolicoeur et O'Carroll, 2007). Cet enjeu revêt une importance particulière dans le contexte de l'accélération récente de la hausse du niveau marin (Cazenave et coll., 2008; Holgate et Woodworth, 2004) et des nouvelles projections envisagées par la communauté scientifique (Allison et coll., 2009; Vermeer et Rahmstorf, 2009). Cette problématique est particulièrement préoccupante dans le secteur de la plage de la Pointe aux Loups et dans la baie de Plaisance. Même si près de 32 % du littoral est encore naturel et sans cadre bâti, les voies de communication peuvent occuper jusqu'à 75 % du territoire côtier dans ces secteurs (Bernatchez et coll., 2008a). Au Québec, les solutions d'adaptation proposées pour contrer le phénomène d'érosion correspondent généralement à des ouvrages en enrochement ou encore à des murets rigides. Il semble que l'accélération de l'érosion, jumelée à l'accroissement du cadre bâti en zone côtière durant les dernières décennies, a engendré une augmentation de ce type de structures de protection à plusieurs endroits (Morneau et coll., 2001; Bernatchez et coll., 2008a). Ces ouvrages, même s'ils permettent de stabiliser la migration du trait de côte, modifient généralement les processus côtiers, réduisent les apports sédimentaires et amplifient l'érosion de la plage, ce qui peut se traduire par une réduction de la largeur de la plage et un abaissement de sa surface (Bernatchez et coll., 2008a; Fichaut et Suanez, 2008; Paskoff et Clus-Auby, 2007; Samat, 2007; Sanchez et coll., 2006; Sumer et coll., 2001; Anthony, 1994). La réduction du budget sédimentaire des plages au pied des ouvrages de protection réduit la résilience de la côte aux événements de tempête et peut avoir comme conséquence l'augmentation du risque de submersion de l'arrière-côte durant les événements de tempête (Bernatchez et coll., 2008b; Hill et coll., 2004). Dans ce contexte, le ministère des Transports du Québec (MTQ) est à la recherche de solutions adaptées à la dynamique côtière des îles de la Madeleine et a mandaté le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) pour réaliser une étude de caractérisation géomorphologique et sédimentologique de la zone côtière. Cette étude vise la caractérisation de l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance et de celle de Pointe-aux-Loups (figure 1).

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

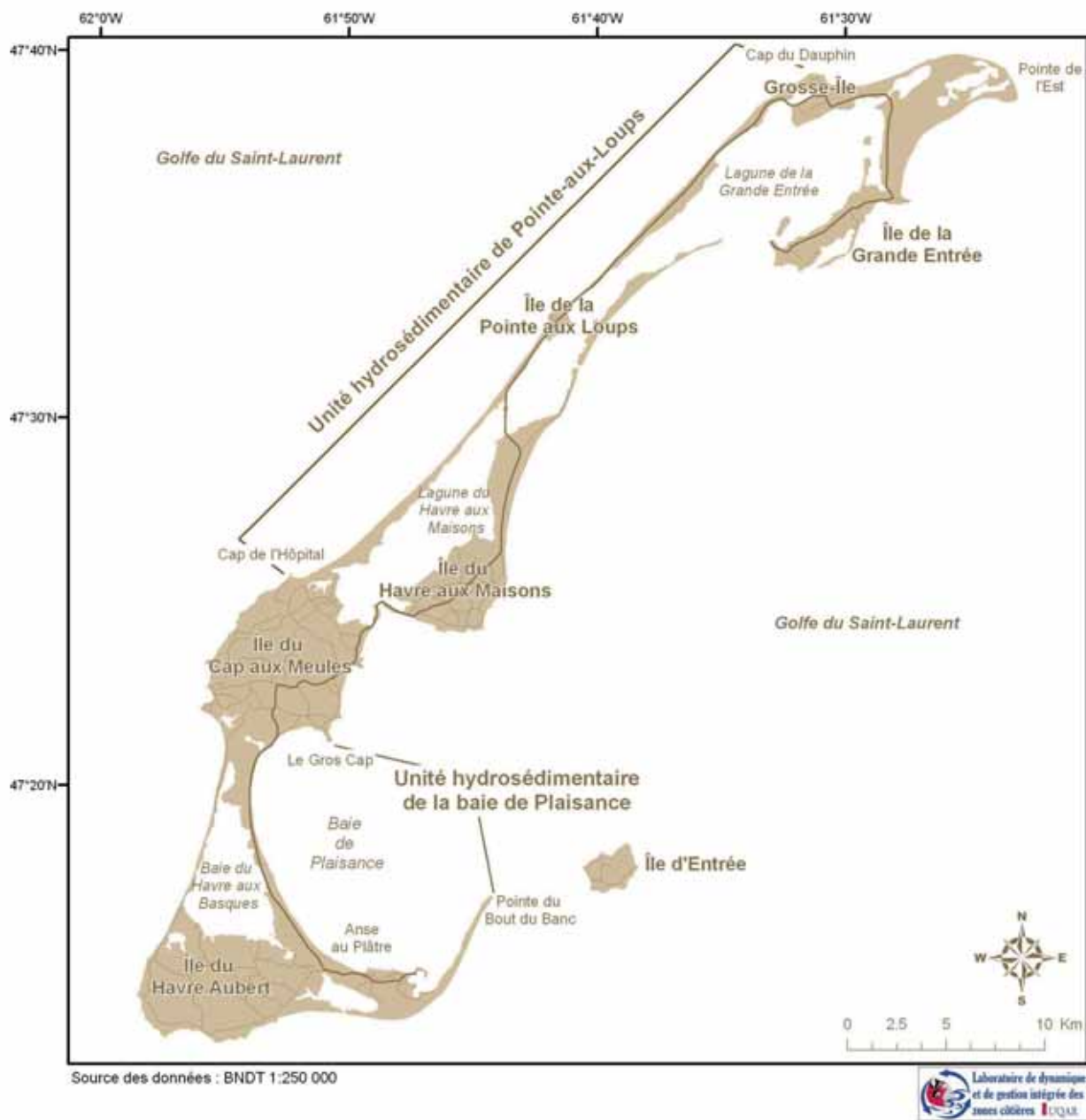


Figure 1. Carte de localisation générale des secteurs d'étude aux Îles-de-la-Madeleine

1.2. Objectifs du projet

Cette étude vise à acquérir les données géomorphologiques et sédimentologiques de base, essentielles et préalables à la réalisation d'une étude coûts-avantages sur les différentes solutions d'adaptation à l'érosion et à la submersion côtière le long de la route 199 dans les secteurs de la baie de Plaisance et de Pointe-aux-Loups.

Les objectifs sont :

- décrire l'évolution historique de la dynamique des systèmes côtiers et départager les causes naturelles et anthropiques qui régissent leur évolution;
- établir le budget sédimentaire global des unités hydrosédimentaires de ces systèmes côtiers et quantifier le transport, les gains ainsi que les pertes nettes de sédiments;
- effectuer une caractérisation sédimentologique et géomorphologique des zones supratidale, intertidale et pré littorale;
- établir les profils types de plage des zones artificielles et naturelles;
- quantifier les effets des structures de protection sur la morphosédimentologie des plages.

1.3. Présentation du rapport

Le rapport est divisé en neuf chapitres, y compris l'introduction, la conclusion et les références, et est terminé par une annexe. Dans un premier temps, nous présentons la méthodologie détaillée de l'étude. Une brève description des types de systèmes côtiers est donnée, le détail ayant déjà été présenté dans un rapport préliminaire (Bernatchez et Friesinger, 2009). Ensuite, les résultats des analyses sédimentologiques des plages et de la zone pré littorale sont exposés. Le chapitre 5 présente l'évolution historique et récente du littoral ainsi que des profils de plage selon les unités hydrosédimentaires. Les budgets sédimentaires de la plage et du cordon dunaire sont décrits au chapitre 6 et permettent de faire une évaluation préliminaire des secteurs où la route 199 est la plus vulnérable. Enfin, une synthèse des facteurs et des causes responsables de la dynamique de l'évolution du littoral des unités hydrosédimentaires de la baie de Plaisance et de Pointe-aux-Loups est présentée au chapitre 7.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1 Segmentation et caractérisation côtières

Une segmentation et une caractérisation côtières ont été réalisées en juin 2008. Le principe de segmentation côtière consiste à délimiter des segments homogènes selon plusieurs variables (annexes 1 A et 1 B) et en fonction des différentes parties de la zone côtière (figures 2 et 3). Un nouveau segment est déterminé dès qu'une des variables suivies subit un changement sur une longueur minimale de 5 m. Un point GPS est pris sur le terrain au début et à la fin de chaque segment. La ligne de base utilisée est la ligne de rivage pour les côtes basses ou les côtes sans falaise, et le trait de côte pour les côtes à falaise. Cette ligne est tracée dans un système d'information géographique (SIG) (ArcGIS 9.2) sur les mosaïques orthorectifiées de 2008, puis segmentée selon les points GPS qui déterminent les débuts et les fins de segments. Les différentes limites de la zone côtière qui ont été utilisées dans le cadre du présent projet de recherche sont définies dans les figures 2 et 3 et permettent une caractérisation tant longitudinale que perpendiculaire à la côte. La codification des différentes variables et des descripteurs recueillis a permis de développer une base de données dans le SIG, intégrant à la fois une description du type de côte, de l'état de la côte, des processus d'érosion, de la hauteur du trait de côte, de la largeur de la plage, de la stratigraphie du trait de côte et de la plage ainsi que du type et de l'état de l'artificialité. L'annexe 1 A présente la fiche de caractérisation côtière avec les différentes variables analysées pour chaque subdivision de la zone côtière et l'annexe 1 B, les classes et les descripteurs pour chaque variable. Il est possible ensuite de réaliser différentes analyses spatiales et de représenter de manière cartographique les différentes caractéristiques de la zone côtière ainsi que les facteurs géologiques, hydrodynamiques, morphosédimentologiques, morphogénétiques et anthropiques qui peuvent modifier la dynamique de la zone côtière.

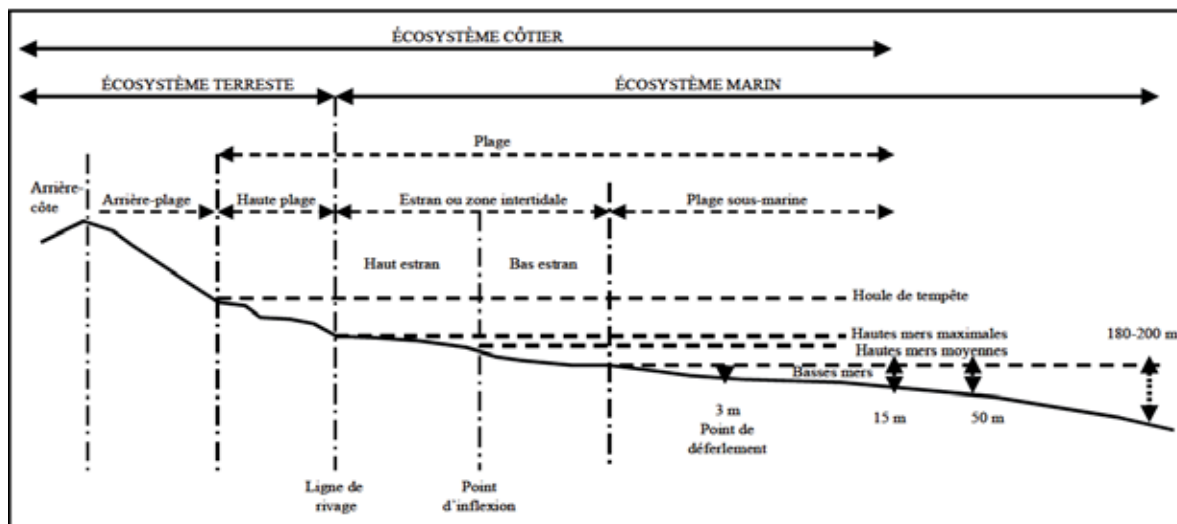


Figure 2. Terminologie et subdivisions de la zone côtière pour une côte sans falaise

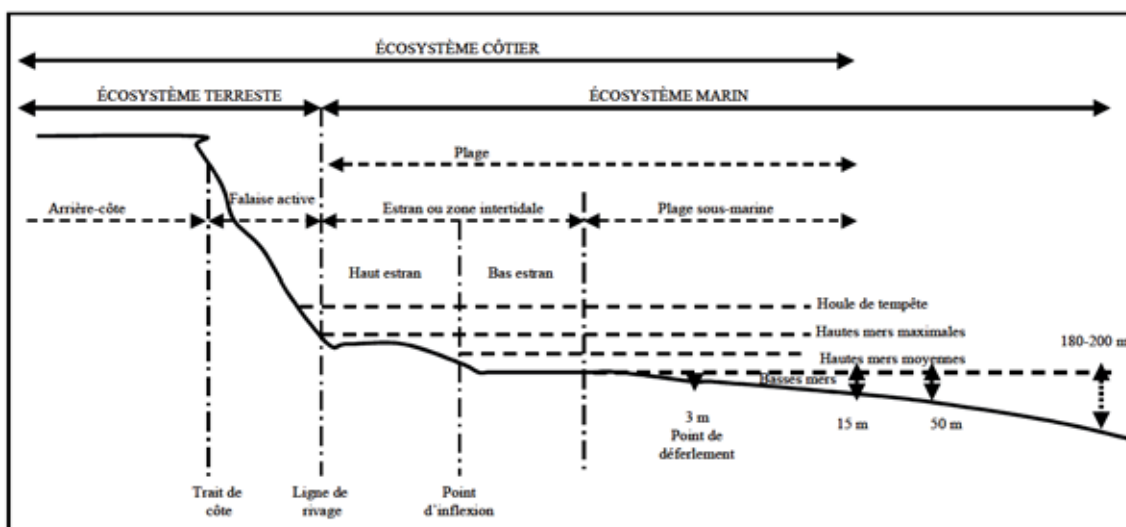


Figure 3. Terminologie et subdivisions de la zone côtière pour une côte à falaise (et microfalaise de plus de 1,5 m)

2.2 Relevés topographiques et sédimentologiques de la plage

Pour évaluer la variation topographique interannuelle des plages, des profils de plage ont été établis le long des transects perpendiculaires à la côte (figure 4) au moyen d'un DGPS ProMark3 de Thales. La précision de cet outil est de 1,2 cm à l'horizontale et de 1,5 cm à la verticale. Au total, 59 transects ont été réalisés pour le secteur de Pointe-aux-Loups (PLOU) et 20 pour celui de la

baie de Plaisance (MAR) (figures 5 et 6). Ces transects ont été réalisés selon un intervalle de 200 m devant les enrochements, de 25 m en bordure des enrochements sur une distance de 100 m et tous les 2 km devant les zones naturelles. À l'intérieur d'un transect perpendiculaire au trait de côte, un relevé de l'altitude en absolu est effectué selon un pas de 2 m. Pour chacun des transects, un profil de la plage était dessiné en y indiquant les éléments géomorphologiques. Un transect sur deux a fait l'objet d'un échantillonnage de sédiments de surface à l'aide d'une truelle, à chaque tiers de la plage ou au centre d'un changement granulométrique, ce qui correspond généralement à deux échantillons sur le haut estran et un sur le bas estran. L'échantillonnage a été optimisé pour mieux refléter les caractéristiques des sédiments de la zone d'étude. Des photographies numériques du transect étaient prises. En plus des transects réalisés au DGPS, la largeur des plages a été mesurée respectivement sur 75 et 26 sites pour les secteurs de Pointe-aux-Loups et de la baie de Plaisance. Au total, 720 échantillons de la plage ont été prélevés pendant la période de 2008-2009. Ces données permettent d'évaluer l'évolution des variations topographiques en absolu et des caractéristiques sédimentologiques des plages devant les zones naturelles et artificielles.



Figure 4. Méthode d'échantillonnage : transect perpendiculaire au trait de côte

2.3 Échantillonnage en mer

Un échantillonnage en mer a également été effectué de la fin août au début de septembre 2009. Il est à souligner que ce prélèvement a été réalisé de façon ponctuelle et a permis d'obtenir un aperçu qualitatif des sédiments marins bordant les plages prospectées. Vingt radiales ont été prospectées dans l'unité de Pointe-aux-Loups contre neuf dans celle de la baie de Plaisance (figures 5 et 6). Généralement, cinq à six échantillons par radiale ont été prélevés à 2, 4,

5, 8 et 10 m de profondeur. L'échantillon 1 étant le plus proche de la côte. Au total, 149 échantillons ont été prélevés en mer.

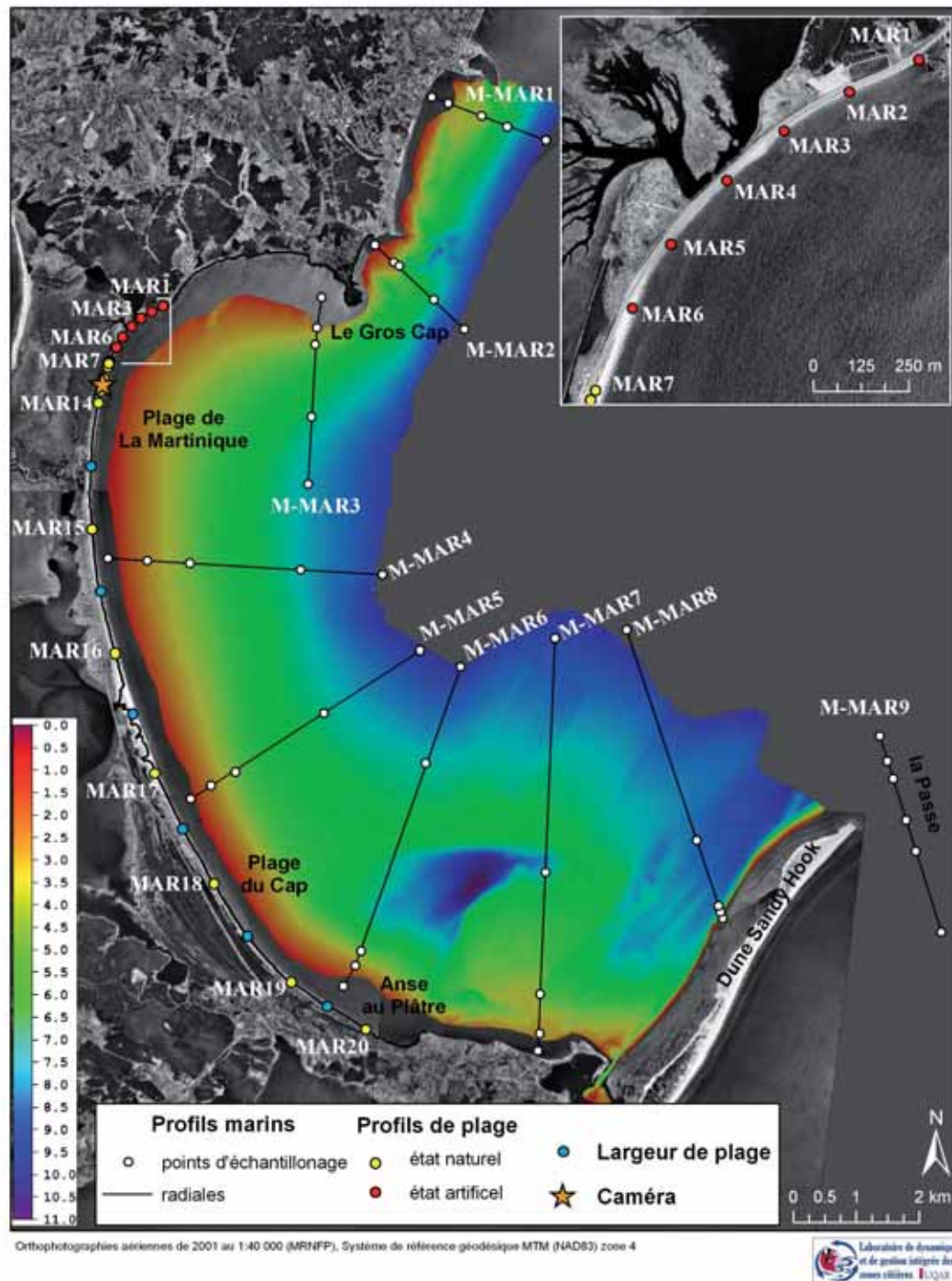


Figure 5. Localisation des profils de plage, des largeurs de plage et des échantillons sédimentologiques dans la baie de Plaisance

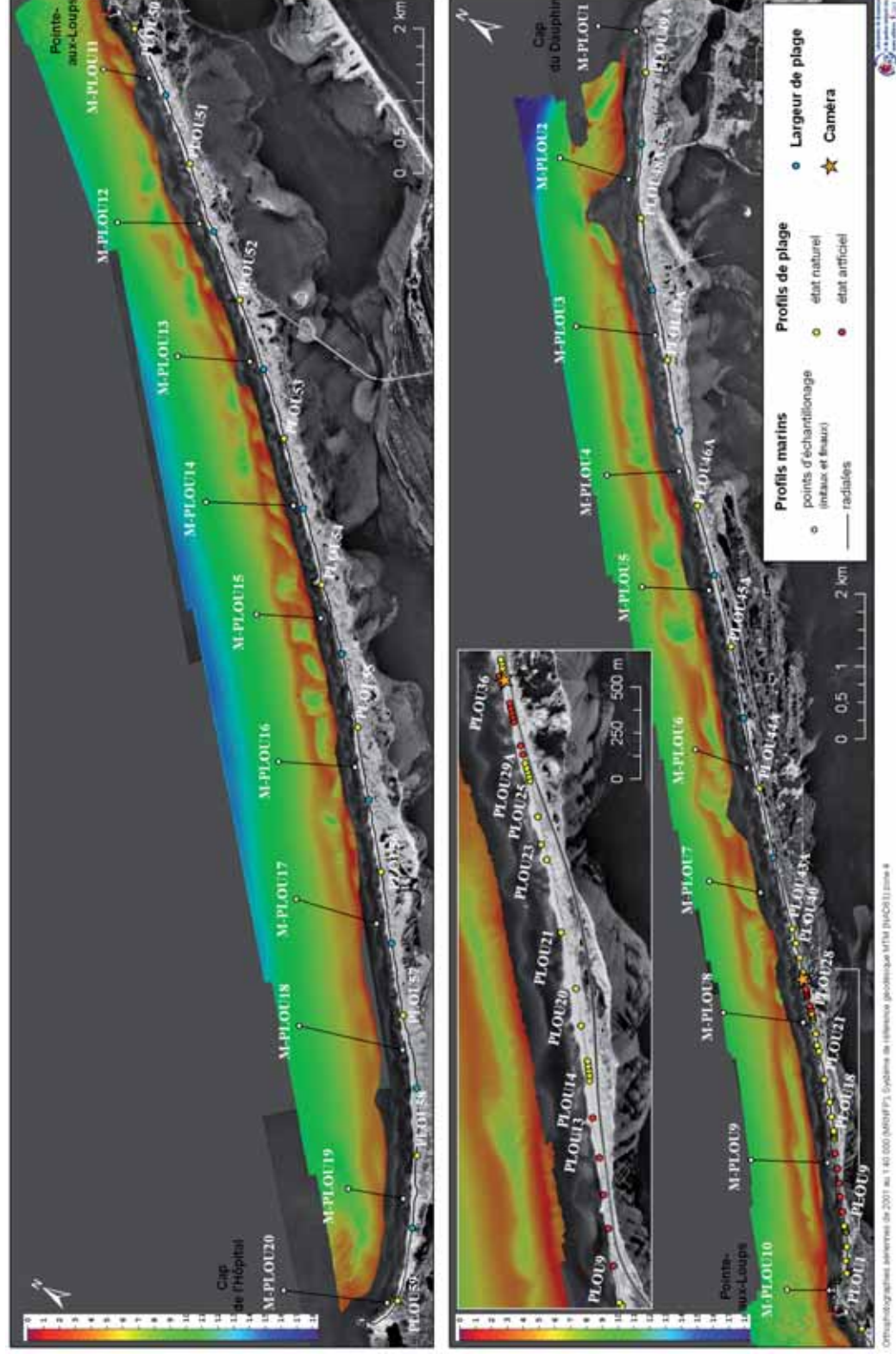


Figure 6. Localisation des profils de plage, des largeurs de plage et des échantillons sédimentologiques à Pointe-aux-Loups

2.4. Traitement des échantillons en laboratoire

La méthode de mesure de la granulométrie des sédiments prélevés repose sur une méthode physique d'analyse basée sur la diffraction laser. Il est à noter que certaines des étapes décrites ci-dessous n'ont pas été requises pour tous les échantillons. Avant l'analyse proprement dite, un traitement préalable des échantillons est requis.

2.4.1 Traitement préalable

➤ Séchage

Les sédiments prélevés sont placés dans des assiettes en aluminium et entreposés dans une étuve à 40 °C jusqu'à séchage complet de l'échantillon. L'étape a nécessité une attention particulière afin de pallier le risque de cimentation de l'échantillon.

➤ Broyage

Cette étape sert à séparer les particules les unes des autres et permet de retrouver la granulométrie initiale de l'échantillon. Le broyage s'effectue dans un mortier, à l'aide d'un pilon.

➤ Tamisage

Cette étape est nécessaire pour séparer la fraction supérieure à 2 mm de celle inférieure à 2 mm. Seule cette dernière est passée au Laser LS 13320. Avant le tamisage, les débris végétaux ainsi que les coquilles (gastéropodes, bivalves) sont enlevés de l'échantillon.

➤ Prélèvement du sous-échantillon

La méthode de l'étoile a été celle utilisée pour le prélèvement du sous-échantillon destiné à être mesuré par l'analyseur de particules. Celle-ci assure que le prélèvement se fait de façon aléatoire et que les sous-échantillons sont représentatifs sur le plan granulométrique. Selon le type de sédiment, 10 à 15 g ont été prélevés de chaque échantillon.

➤ Destruction de la matière organique

Afin de pallier la formation d'agrégats, une attaque au peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) à 33 % sur plaque chauffante est réalisée. Ce traitement permet essentiellement la destruction des composés humiques.

➤ Ajout d'agent dispersant

Un agent dispersant (Calgon : hexamétaphosphate de sodium) est ajouté à la solution. Celui-ci permet une répulsion entre les particules et évite la formation d'agrégats, ce qui pourrait induire une surestimation de la taille des sédiments.

2.4.2 Analyse proprement dite

Un analyseur de taille des particules par diffraction laser Beckman-Coulter LS 13320 a été utilisé pour les mesures granulométriques. L'avantage de cet appareil est le large éventail de classes granulométriques qu'il peut couvrir (0,04 à 2 000 μm). Les résultats ont été synthétisés à l'aide de *Gradistat v.4* (Blott et Pye, 2001).

2.5 Télédétection aéroportée

2.5.1 Caractéristiques de la plate-forme aéroportée utilisée et acquisition des données aéroportées

La plate-forme utilisée pour les relevés aéroportés est le Système d'acquisition d'images géoréférencées aéroportées en 3D (SAIGA-3D) développé à l'UQAR. Elle a été installée dans un avion de type Piper Navajo 310. Il s'agit d'une plate-forme multicapteurs comprenant un appareil photo numérique couleur haute résolution (visible), une caméra vidéographique numérique multispectrale, un LiDAR (détection et télémétrie par ondes lumineuses ou *Light Detection and Ranging*), une plate-forme inertielle (IMU), un DGPS et une antenne Beacon. Ce système est contrôlé par le logiciel d'acquisition et de synchronisation KRONOS qui assure la validité en temps réel des mesures de positionnement et le géoréférencement simultané des données des différents capteurs. Ce système permet une précision d'attribution du temps GPS aux images numériques d'une milliseconde. Le SAIGA-3D est portable et peut être installé sur différents types d'aéronefs, d'hélicoptères ou de véhicules terrestres. Les relevés ont été effectués à une altitude variant de 250 à 300 m.

La caméra multispectrale MS4100 3-CCD de Duncan Tech a permis de générer des images 8 bits dont la résolution est de $1\,920 \times 1\,080$ pixels. Le capteur utilise trois bandes spectrales dans le domaine des bandes verte, rouge et proche infrarouge (champs spectraux de 400 à 1 000 nm). La valeur centrale pour la bande verte est de 540 nm, de 670 nm pour la bande rouge et de 800 nm pour la bande infrarouge (Geospatial Systems Inc., 2006).

L'appareil photo Canon EOS-1Ds Mark II a été utilisé pour générer des images 24 bits dans le domaine du visible (RVB ou RBG), dont la résolution est d'environ 17,2 Mpx (Canon, 2009). Les données de l'appareil photo Canon sont quant à elles automatiquement générées en format JPEG et occupent un espace qui varie de 6 000 et 8 000 ko par image.

Le LiDAR utilisé est le LMS-Q140i-60 de la compagnie Riegl. À une altitude de 300 m, la distance entre les points est de 1 m dans le sens du balayage et d'au plus 1,5 m entre les lignes de balayage. La fréquence de balayage utilisée est de 40 Hz, ce qui permet l'acquisition de 10 000 points/sec. Le LiDAR émet un faisceau lumineux dans le proche infrarouge, et l'intensité du

signal de retour est enregistrée par le système (Riegl, 2004). Ces valeurs d'intensité peuvent aussi être utilisées pour caractériser les différentes surfaces.

2.5.2 Acquisition des données aéroportées et calibration des caméras

Une équipe a été déployée sur le terrain du 26 juin au 5 juillet 2008 pour faire les relevés aéroportés. En raison des conditions météorologiques et de problèmes techniques avec l'avion, les relevés n'ont pas pu être effectués. Ils ont finalement été réalisés du 22 au 26 septembre 2008. Une équipe au sol a permis de valider la précision des données LiDAR et d'imagerie aéroportée pour différentes conditions de surface de terrain.

Une calibration externe des caméras a été effectuée lors de relevés dans la zone d'étude. Les paramètres nécessaires pour ce calibrage sont les angles d'installation des caméras et la distance des caméras du point d'origine du système de navigation (antenne GPS, IMU). Des sites de calibration ont été installés avec des mesures de contrôle au sol. Des images ont ensuite été acquises au-dessus de ces sites et des paramètres de correction ont été intégrés dans le logiciel C3D Analyst 4.2 (Geo 3D, Trimble Navigation Limited). Ce calibrage consiste à corriger les erreurs de positionnement associées aux angles d'installation des différents capteurs. Ce procédé permet d'améliorer de façon notable la précision des mesures absolues, obtenues par comparaison de points de référence sur les images et des données LiDAR (tableau 1).

Tableau 1. Précision et résolution des images avec et sans calibrage externe

	Précision au nadir	Précision aux extrémités de la fauchée	Résolution au sol
Sans calibrage externe	3 à 6 m	4 à 8 m	15 à 20 cm
Avec calibrage externe	0 à 20 cm	0 à 1 m	14 à 16 cm

2.5.3 Traitement des données aéroportées

2.5.3.1 Traitement des données LiDAR

La trajectoire GPS de l'avion a été corrigée à l'aide des données DGPS collectées par une base statique installée à la base d'opérations avec le logiciel Waypoint Inertial Explorer de Novatel. Cette trace GPS corrigée a servi à corriger spatialement les données LiDAR et à produire les fichiers de données brutes X, Y et Z non projetées avec GLS2XYZ (Geo 3D, Trimble

Navigation Limited). Les fichiers en format texte ont ensuite été projetés en format ASCII [UTM NAD83(SCRS) fuseau 20] et filtrés avec l'application TerraScan (Terrasolid) pour ne conserver que les points au sol, après correction de l'attitude de l'avion (détermination des angles de roulis, tangage et lacet). Les fichiers résultants ont été compilés dans des bases de données MS Access, les points laser servant de points de contrôle pour le géoréférencement des mosaïques multispectrales. La précision obtenue pour les points laser au sol est d'environ 20 cm (et moins) en X et Y, et d'environ 10 cm en Z, par rapport aux points de contrôle terrain DGPS collectés pendant la campagne de terrain.

2.5.3.2 Développement des modèles d'élévation de terrain et des contours topographiques

Le LiDAR est une méthode de télédétection aéroportée utilisée dans l'étude de la topographie. Celle-ci implique l'émission, depuis un aéronef, d'impulsions laser orientées vers la Terre et la mesure du temps requis par celles-ci pour revenir à leur source (Bonn et Rochon, 2000). Les données LiDAR ont été acquises en simultané avec les données d'imagerie à l'aide du SAIGA-3D. Le LiDAR permet d'obtenir pour chaque point les coordonnées géographiques (X, Y), la valeur d'altitude (Z) et une valeur d'intensité du retour dans le proche infrarouge (0,9 μm). Les fichiers ASCII ont été convertis en format LAS à l'aide de l'application ArcGIS et de l'extension LP360 (Qcoherent Software), ces fichiers LAS ont ensuite été découpés par secteur puis convertis en format Shapefile. Les variations de valeurs en Z obtenues ont été utilisées pour générer des modèles altimétriques numériques (MAN) ou *digital elevation model* (DEM) de format TIFF [projection UTM NAD83(SCRS) fuseau 20] avec l'extension LP360 sur ArcGIS. Ces modèles ont ensuite été utilisés pour construire des contours topographiques tous les 50 cm à l'aide de l'extension 3D Analyst d'ArcGIS.

2.5.3.3 Mosaïquage et orthorectification des images multispectrales

Les images multispectrales acquises en 2008 ont été mosaïquées de manière automatisée à l'aide du logiciel C3D Mosaic 4.2 (Geo 3D, Trimble Navigation Limited). Les mosaïques brutes ont été orthorectifiées à partir des données LiDAR qui ont servi de points de contrôle. Finalement, les mosaïques brutes ont été découpées pour éliminer le recouvrement des lignes de vol et converties en format matriciel projeté [UTM NAD83(SCRS) fuseau 20], de format TIFF, à l'aide de l'extension Spatial Analyst d'ArcGIS.

2.5.4 Traitement des données bathymétriques

2.5.4.1 Transformation du zéro des cartes

Les données bathymétriques ont été référencées verticalement au niveau moyen des mers afin de pouvoir les comparer avec les données topographiques. Cette opération a été effectuée par le Centre interdisciplinaire de développement en cartographie des océans (CIDCO).

2.5.4.1.1 Unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance

La surface base (format CSAR) de la bathymétrie de la zone de la baie de Plaisance a été référencée verticalement par rapport au marégraphe permanent de Cap-aux-Meules (n° 1970) et nivelée par rapport au zéro des cartes (ZC). Les contours isobathymétriques au 50 cm doivent être référencés verticalement par rapport au niveau moyen des mers (NMM) de manière à être conformes aux contours isoplètes de plage déjà réalisés. Un ajustement vertical en bloc de la surface base a donc été effectué. La valeur de cet ajustement a été calculée en s'appuyant sur trois repères de nivellement dont l'altitude est à la fois connue par rapport au ZC et par rapport au NMM (tableau 2). L'ajustement vertical appliqué est de 65 cm vers le haut et a été effectué à l'aide du logiciel Caris BaseEditor. La projection utilisée est WGS84 UTM Zone 20N.

Tableau 2. Ajustement vertical par rapport à 3 repères de nivellement pour l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance

	ZC	NMM	ZC-NMM
79KZ130 (Cap-aux-Meules)	3,206	2,441	0,765
79KZ090 (Havre-Aubert)	14,096	13,477	0,619
M01L9062 (île d'Entrée)	3,291	2,727	0,564
Moyenne			0,649

2.5.4.1.2 Unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

La surface base (format CSAR) de la bathymétrie de la zone de Pointe-aux-Loups a été référencée verticalement par rapport au marégraphe installé par le CIDCO au quai de Pointe-aux-Loups, et nivelée par rapport au zéro des cartes. Les contours isobathymétriques au 50 cm doivent être référencés verticalement par rapport au niveau moyen des mers de manière à être conformes aux contours isoplètes de plage déjà réalisés. Un ajustement vertical en bloc de la surface base a donc dû être effectué. La valeur de cet ajustement a été calculée en s'appuyant sur quatre repères de nivellement

dont l'altitude est à la fois connue par rapport au ZC et par rapport au NMM (tableau 3). L'ajustement vertical appliqué est de 54 cm vers le haut. La surface a ensuite été ajustée verticalement à l'aide du logiciel Caris BaseEditor. La projection utilisée est WGS84 UTM Zone 20N.

Tableau 3. Ajustement vertical par rapport à 4 repères de nivellement pour l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

	ZC	NMM	ZC-NMM
79KZ119 (Grosse-Île)	12,084	11,65	0,434
83L9520 (Mine Seleine)	3,626	2,967	0,659
74L9501 (Pointe-aux-Loups)	8,75	8,174	0,576
77L9513 (Étang du Nord)	6,912	6,417	0,495
Moyenne			0,541

2.5.4.2 Cartographie de la bathymétrie

La méthodologie utilisée pour le traitement des données bathymétriques est détaillée dans le rapport de mission *Levés côtiers pour l'évaluation de la dynamique sédimentaire aux Îles-de-la-Madeleine* remis par le CIDCO au ministère des Transports du Québec en février 2010. Le CIDCO a principalement utilisé le logiciel Caris pour son traitement. Pour effectuer la cartographie de la bathymétrie, le CIDCO a remis au Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières les surfaces bathymétriques, les contours isobathymétriques générés tous les 50 cm et des profils bathymétriques représentant la continuité des profils de plage. À partir de ces jeux de données, des cartes ont été générées afin d'améliorer l'interprétation de la dynamique sédimentaire de deux secteurs des îles de la Madeleine.

2.6 Évaluation du bilan sédimentaire

2.6.1 Largeur des plages et du cordon dunaire

Pour les deux secteurs à l'étude, les largeurs de la plage (haut estran) et du cordon dunaire ont été mesurées à un intervalle fixe de 50 m devant les tombolos. Pour effectuer cette mesure, la limite arrière de la dune, la ligne de rivage et la flexure ont été tracées sur les mosaïques orthorectifiées de 2008 dans le logiciel ArcGIS. Comme l'un des objectifs poursuivis pour la mesure de la largeur du cordon dunaire est de quantifier le budget sédimentaire entre la route 199 et le littoral pour mieux évaluer la vulnérabilité des infrastructures routières à l'érosion, la limite arrière du cordon utilisée est l'enrochement, la route 199, les résidences (distance de 5 m) et la limite du cap rocheux pour

l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance. Pour l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups, cette limite correspond aux caps rocheux, à la route 199, à la lagune et aux enrochements. L'extension Digital Shoreline Analysis System (Thieler et coll., 2005) a été utilisée pour générer automatiquement les transects à un intervalle de 50 m et pour mesurer la distance entre les deux lignes tracées. Afin de simplifier l'analyse, les cellules hydrosédimentaires ont été séparées en compartiments de largeur fixe de 500 m linéaires sur la ligne de rivage, et la moyenne des largeurs a été calculée pour chacun des compartiments.

2.6.2 Budget sédimentaire

Les rasters d'élévation, générés à partir des nuages de points LiDAR acquis en 2008, ont été utilisés pour calculer le budget sédimentaire des deux secteurs à l'étude. Le volume calculé pour chacun des compartiments a été calculé en deux temps. Tout d'abord, le volume de sédiments du cordon dunaire a été calculé. Cette analyse permettra de connaître la quantité de sédiments contenus dans la zone tampon entre la ligne de rivage et la limite des infrastructures terrestres installées sur le cordon dunaire. La limite supérieure correspond à la ligne tracée pour calculer la largeur du cordon dunaire (voir section 2.6.1). Dans un deuxième temps, le volume sédimentaire de la plage a été calculé. La limite supérieure correspond à la ligne de rivage et la limite inférieure, à la flexure (ou point d'inflexion, soit la limite entre le bas et le haut estran, voir figures 2 et 3). Un polygone de découpage a été créé pour chacune des cellules de 500 m et l'extension Spatial Analyst d'ArcGIS a permis d'extraire un raster d'élévation pour chacune d'elles. Le volume sédimentaire a ensuite été calculé par l'extension 3D Analyst d'ArcGIS à partir d'un niveau de base et de la valeur d'altitude de chacun des pixels du raster. Le niveau moyen des basses mers (-0,4 m) aux îles de la Madeleine a été utilisé comme niveau de base pour le calcul du volume. Il est à noter que la flexure a été utilisée comme limite pour mesurer la largeur des plages, alors que le niveau moyen des basses mers a été utilisé pour calculer le volume sédimentaire.

2.6.3 Indice du budget sédimentaire des plages

Un indice du budget sédimentaire des plages (IBSP) a été calculé pour l'ensemble des transects de largeur de plage. L'IBSP correspond à l'équation :

$$IBSP = (H \times L)/2$$

où H est la hauteur de la limite supérieure du haut estran
et L est la largeur du haut estran.

La largeur du haut estran est la même que celle calculée dans la section 2.6.1. La hauteur de la limite supérieure du haut estran a été extraite pour chacun des transects à l'aide de l'extension Spatial Analyst d'ArcGIS. Plus la valeur

résultante de l'indice est élevée, plus le budget sédimentaire est élevé. À des fins de classification et de cartographie, les résultats de l'indice ont été séparés en cinq classes : très faible, faible, modéré, élevé et très élevé. Les deux classes regroupant les valeurs extrêmes (très élevé et très faible) ont été divisées visuellement selon l'histogramme de fréquence afin d'isoler les valeurs extrêmes. La division des trois classes médianes (élevé, modéré, faible) a été centrée sur la moyenne. La limite des classes a été déterminée pour chacune des unités hydrosédimentaires. Une classification a aussi été réalisée en fonction de l'ensemble des valeurs de l'indice pour comparer sur une même base les deux secteurs d'étude (tableau 4).

Tableau 4. Classes de l'indice de budget sédimentaire des plages selon l'unité hydrosédimentaire

	Très faible	Faible	Modéré	Élevé	Très élevé
Baie de Plaisance	moins de 5	5-15	15-25	25-35	plus de 35
Pointe-aux-Loups	moins de 10	10-25	25-50	50-85	plus de 85
Zone d'étude totale	moins de 15	15-30	30-50	50-85	plus de 85

2.7 Évolution historique de la zone côtière par photo-interprétation

L'évolution historique de la zone côtière de 1963 à 2008 a été examinée. Cette étape est primordiale dans l'analyse des changements géomorphologiques de la côte et de la plage ainsi que pour évaluer les effets de l'artificialité sur la côte.

2.7.1 Le trait de côte et la ligne de rivage

Le trait utilisé pour établir l'évolution historique des systèmes côtiers dépend du type de côte (figure 7). Pour les côtes à falaise, le sommet du talus est utilisé (trait de côte au sens strict), alors que, pour les côtes sans falaise ou les côtes basses, la limite des hautes mers maximales est utilisée (ligne de rivage au sens strict). Cette dernière limite correspond généralement à la limite de végétation herbacée. En effet, celle-ci est assez constante et constitue généralement la meilleure limite à utiliser pour les côtes sans falaise (plage, dune, flèche littorale et tombolo) (Grenier et Dubois, 1992). Dans le cas où ces derniers types de côte sont artificialisés, la limite supérieure des ouvrages de protection est utilisée. L'évolution historique de la côte permet de quantifier le rythme de déplacement du trait de côte et de la ligne de rivage des différents types de systèmes côtiers. Les traits utilisés pour l'évolution historique ont été tracés à l'échelle de 1:1 500.

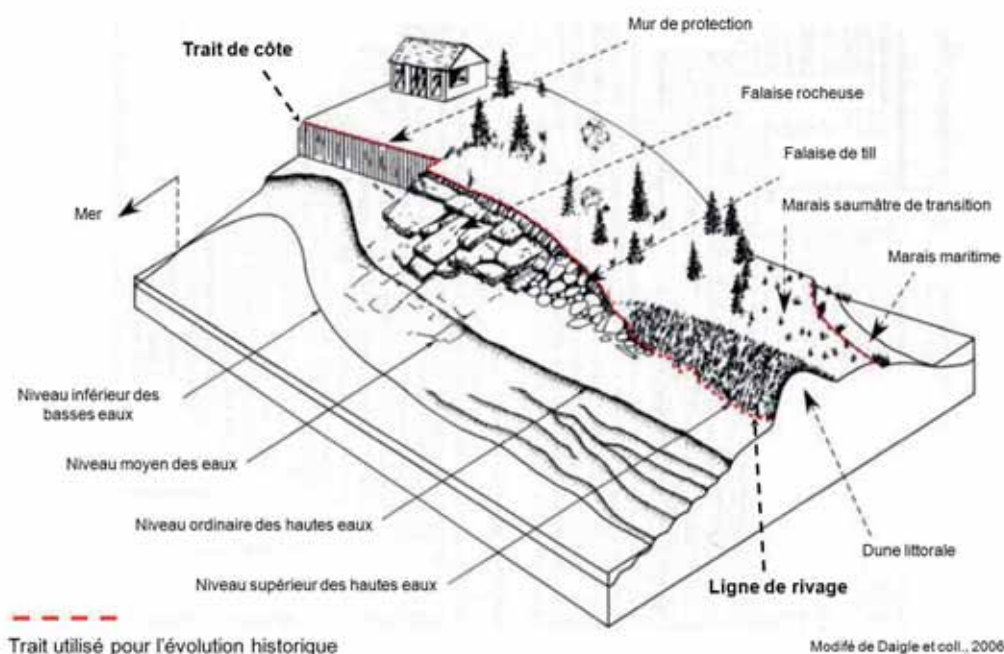


Figure 7. Trait utilisé pour l'évolution historique selon différentes configurations de côte

2.7.2 Intégration des photographies aériennes dans un SIG et calcul de l'évolution historique

Les photographies aériennes de 1963 (1:15 840), 1977 (1:10 000), 1983 (1:10 000) et 1992 (1:15 000) ainsi que les orthophotographies aériennes de 2001 (1:40 000) et les mosaïques orthorectifiées de septembre 2008 (résolution au sol de 15 cm) ont été utilisées dans le cadre de ce projet de recherche. Les photographies aériennes ont d'abord été numérisées à une résolution d'au moins 600 dpi, puis leur géoréférencement a été réalisé dans un SIG (ArcGIS 9.2) en se basant sur les mosaïques orthorectifiées de 2008, en utilisant un maximum de points d'ancrage présents sur les deux couvertures aériennes. Le traçage final et la cartographie des éléments ont été réalisés directement à l'écran dans un SIG à partir d'un pointeur numérique d'une largeur de 0,001 mm, permettant ainsi d'éliminer la marge d'erreur associée au « trait de crayon » que l'on trouve souvent dans les études traditionnelles (Bernatchez, 2003). La partie centrale des photographies aériennes a été privilégiée, car cela permet de réduire au minimum la distorsion radiale.

Le calcul de l'évolution historique a été réalisé à l'aide du logiciel Digital Shoreline Analysis System développé par la Commission géologique des États-Unis (USGS) (Thieler et coll., 2005). Ce logiciel a permis de générer automatiquement des transects tous les 50 m qui recoupent

perpendiculairement les traits de côte des différentes années. L'écart entre chacun des tracés est ensuite calculé et rapporté à une variation annuelle, ce qui génère une base de données sur l'évolution historique de la ligne de rivage ou du trait de côte.

2.8 Évolution récente du trait de côte (2005-2009)

2.8.1 Réseau de suivi de l'érosion côtière

Le Laboratoire de dynamique de gestion intégrée des zones côtières de l'UQAR possède un réseau de suivi de l'érosion côtière aux îles de la Madeleine qui compte 900 stations de suivi. Une analyse des données provenant des bornes localisées sur les tombolos de la baie de Plaisance et de Pointe-aux-Loups pour la période de 2005 à 2008 a été effectuée.

2.8.2 Relevés au DGPS du trait de côte

Dans les secteurs où la route 199 longe le littoral, des relevés au DGPS du trait de côte ont été réalisés en septembre 2009. D'une longueur de 400 m chacun, les deux tracés ont été levés avec un intervalle de 2 m ou moins lorsque le trait de côte était irrégulier (figures 8 et 9). Les points DGPS ont ensuite été intégrés dans un système d'information géographique (ArcGIS 9.2) et ont été transformés en élément linéaire à l'aide de l'extension Xtool Pro de Data East GIS Software Development. Ensuite, à partir des orthophotographies aériennes de septembre 2008, le trait de côte a été tracé. La comparaison des traits de côte de 2008 et de 2009 permettra de quantifier l'évolution annuelle de ces deux secteurs.

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.





Figure 9. Tracé du trait de côte (points GPS) du secteur de la baie de Plaisance (Boutin-Miller, 2010)

2.8.3 Caméras de suivi

Des caméras de suivi ont été installées sur les deux mêmes sites relevés au DGPS (figures 8 et 9). Sur chaque site, deux caméras sont montées sur un poteau de bois avec une visée dans le sens opposé (figure 10). Il s'agit de caméras numériques de modèle Reconyx PC85 — 3,1 Mpx. La fréquence de la prise de photographies est de 15 minutes. Les images analysées couvrent la période du 16 novembre 2008 au 31 août 2009, pour un total de plus de 50 000 photos. L'identification des événements de recul et des processus côtiers responsables de la variation du trait de côte découle du visionnement des photographies effectué à l'aide du logiciel VirtualDub version 1.9.7 (Virtual Dub, 2009). Ce logiciel de montage vidéo permet de manière conviviale la juxtaposition des photographies d'un secteur, une à la suite de l'autre, à la manière d'une vidéo continue permettant de visualiser les événements de recul et les diverses conditions météorologiques et océanographiques touchant le littoral.



Figure 10. Caméras de suivi dans le secteur de la baie de Plaisance

3. CARACTÉRISATION DES TYPES DE CÔTE

Ce chapitre présente les différents types de côte pour les deux secteurs à l'étude. Les processus d'érosion dominant pour chaque type y sont également identifiés. Les largeurs de plage ont aussi été caractérisées pour chacun des segments. La codification pour chaque type de largeur est indiquée sur la fiche de terrain et dans la légende de l'annexe 1. Le secteur de la baie de Plaisance est d'abord caractérisé, vient ensuite celui de Pointe-aux-Loups.

3.1 Caractérisation côtière de la baie de Plaisance

La figure 11 montre les types de côte de la baie de Plaisance. Les côtes à tombolo dominant avec plus de 72 % de la longueur totale de la côte de ce secteur. Les tombolos des îles de la Madeleine sont pour la plupart dunifiés. Dans la baie, un peu moins de 6 % de la côte à tombolo est artificialisée. Celle-ci correspond à la partie nord de la plage de La Martinique. Aux extrémités de la baie de Plaisance, la côte est surtout caractérisée par des falaises rocheuses de grès au nord et des falaises d'argilite au sud, à l'anse au Plâtre. Une petite partie du littoral de la baie est constitué d'une terrasse de plage (1,2 %). Près de la moitié du littoral connaissait une phase d'accumulation à l'été 2008 et environ le tiers subissait l'érosion.

Tableau 5. Types de côte, état de la côte et processus actifs côtiers dans l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance

Types de côte	Processus côtiers ¹	État de la côte	Longueur (m)	Proportion (%)
Falaise rocheuse	vg, gds, edd, edb, cry, dec, cb, eol, efdo, eb, efe	Actif	4 068,1	96,7
		Semi-végétalisé	63,4	1,5
		Stable	39,8	1,0
		Total	4 207,1	100
Falaise rocheuse à sommet meuble	gds, su, edb, rc, eol, efdo, vg, cry	Actif	1 789,8	94,1
		Semi-végétalisé	112,6	5,8
		Total	1 902,3	100
Terrasse de plage	vg, sub, eol, vtt	Actif	228,1	80,0
		Semi-végétalisé	46,6	19,96
		Total	274,73	100
Tombolo	eol, vg, sub, css, vtt, efdo	Accumulation	11 339,0	67,4
		Actif	1 442,9	8,7
		Artificiel	1 284,3	7,7
		Semi-végétalisé	1 440,9	8,7
		Stable	1 248,1	7,5
		Total	16 621,9	100

¹ Voir l'annexe 1B pour les différents codes des processus actifs.

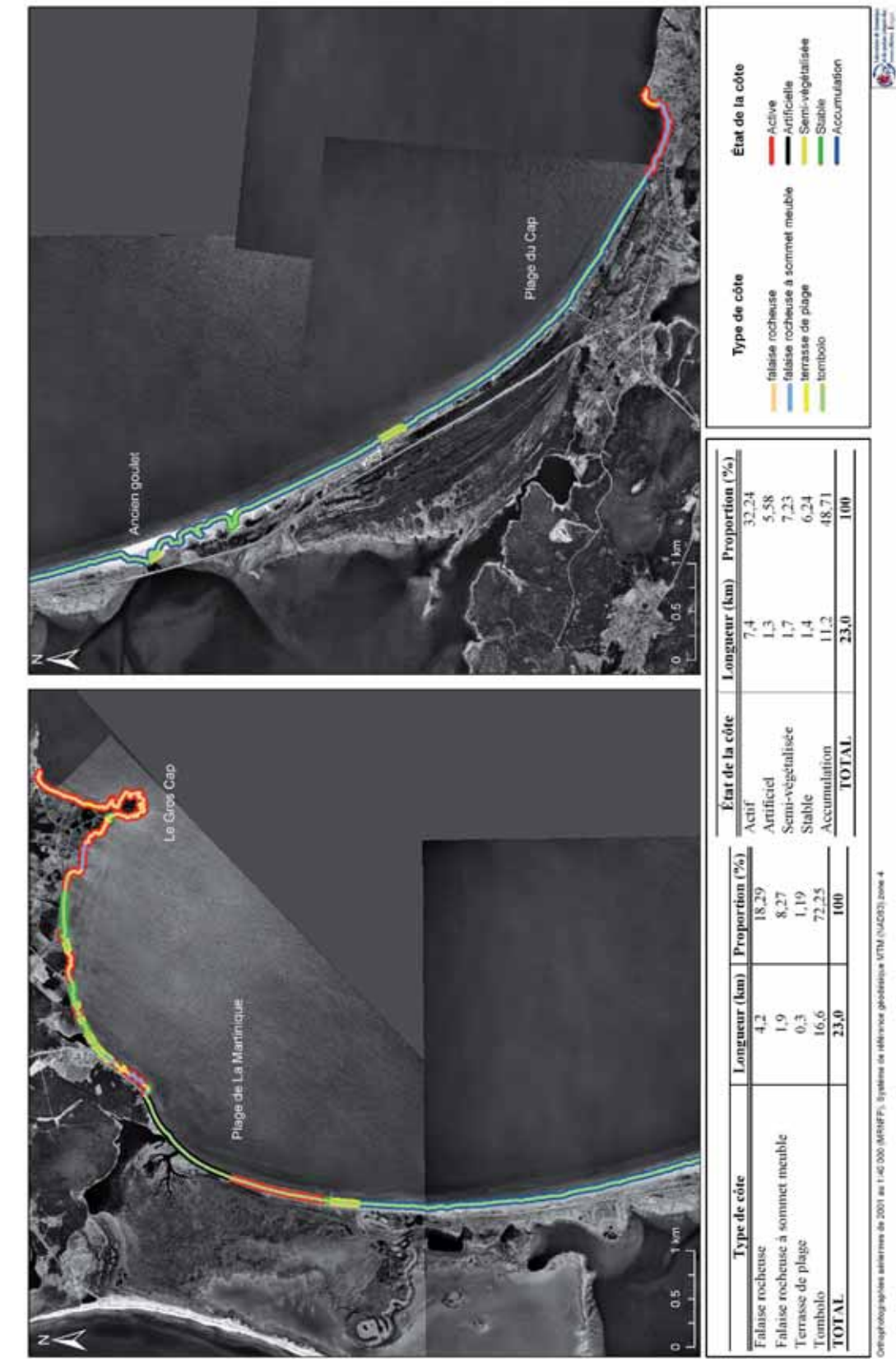


Figure 11. Type et état de la côte de l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance

3.1.1 Côte à falaise rocheuse de la baie de Plaisance

Les falaises rocheuses dans ce secteur forment 26,6 % de la longueur totale de la côte, dont 8,3 % sont des falaises rocheuses à sommet meuble. Elles sont en érosion à plus de 90 % de la longueur du littoral (tableau 5). La répartition des types de processus d'érosion dépend principalement de la lithostratigraphie des falaises. Pour les côtes composées de grès, l'action des vagues est le processus dominant. Les vagues provoquent des encoches à la base des falaises ainsi que dans le trait de côte et engendrent, avec le temps, des écroulements rocheux. La structure de la partie supérieure du grès est parfois feuilletée et fortement altérée. Celui-ci est alors très sensible à la gélifraction. Les falaises composées d'argilite sont, quant à elles, dominées par des mouvements de masse, dont les glissements superficiels et les effondrements de blocs et de dalles (figure 12). Les processus cryogéniques liés au gel et au dégel dominant entraînent l'affaiblissement de la paroi rocheuse. Ce processus conduit à un mode de recul graduel de la falaise. La suffosion est aussi un processus important qui survient surtout dans les falaises rocheuses d'argilite et à sommet meuble.

Les plages présentant une largeur classifiée dans la catégorie des plages quasi absentes (largeur < 5 m) sont principalement associées aux falaises rocheuses actives et semi-végétalisées. Les falaises stables présentent des plages un peu plus larges, soit de 5 à 10 m. Les plages au pied des falaises rocheuses à sommet meuble sont très étroites (5 à 10 m), dans le cas de celles actives, et elles sont de largeur moyenne (15 à 20 m) pour les falaises qui sont semi-végétalisées. Les falaises rocheuses provoquent la réflexion des vagues, ce qui entraîne une érosion des plages, d'où la largeur généralement étroite des plages situées au pied des falaises rocheuses.



Figure 12. Exemple de falaise rocheuse à sommet meuble de l'anse au Plâtre (baie de Plaisance)

3.1.2 Côte à terrasse de plage de la baie de Plaisance

Ce type de côte est présent sur moins de 2 km du littoral de la baie. On y trouve des processus côtiers comme la submersion côtière (figure 13). Le processus qui domine pour ce type de côte est l'érosion par les vagues de tempête. Les activités anthropiques, comme la promenade en véhicule tout-terrain (VTT), rendent aussi, de manière ponctuelle, les terrasses de plage sensibles à l'érosion côtière. Plus de 80 % des terrasses de plage de la baie sont actives (tableau 5).

La largeur des plages varie généralement de 5 à 20 m pour ce type de côte. Les côtes stables et semi-végétalisées ont des plages plutôt très étroites (5 à 10 m), alors que les côtes actives sont associées à des plages moyennes (15 à 20 m).



Figure 13. Exemple de terrasse de plage de la baie de Plaisance

3.1.3 Côte à tombolo de la baie de Plaisance

Ce dernier type de côte est le plus important en longueur dans le secteur. Le tombolo est d'une longueur de 16 km, dont plus de 1,3 km est artificialisé. Le tombolo est caractérisé par de l'accumulation sur un peu plus de 11 km, principalement dans la section sud de la baie. Dans ce secteur, il est possible d'observer plusieurs séries de dunes bordières, témoins de la progradation du littoral. La partie active du tombolo se trouve, quant à elle, en périphérie de l'artificialité dans le nord de la baie, soit dans le secteur de la plage de La Martinique (figure 14). Les processus qui affectent le tombolo sont principalement les vagues et les processus éoliens. La submersion par la mer

est aussi un phénomène ayant une influence sur ce type de côte. Durant les tempêtes provenant du nord-est et du sud-est, une grande partie de la plage du tombolo se retrouve sous l'eau. D'ailleurs, la partie artificialisée où la route passe à moins de 10 m de la côte est régulièrement submergée par le jet de rive des vagues durant les tempêtes. De plus, de petites coulées de sable sec sont également fréquentes et sont provoquées par la gravité, les effondrements de débord organiques et le vent. Les véhicules tout-terrain demeurent une cause d'érosion dans les milieux sableux. La destruction des végétaux par les VTT sur les dunes crée une intensification du processus éolien. C'est entre autres pour cette raison qu'il existe une loi municipale interdisant la circulation des VTT sur les plages pendant quatre mois de l'année (de juin à septembre).

Les plages sur la côte à tombolo dans la baie de Plaisance sont dans la plupart des cas toutes très larges (plus de 30 m).



Figure 14. Exemple de côte à tombolo active de La Martinique (baie de Plaisance).

3.2 Caractérisation côtière du secteur de Pointe-aux-Loups

Le secteur de Pointe-aux-Loups est beaucoup plus grand et est formé d'un plus grand nombre de types de côtes que le secteur précédent. Comme pour la baie de Plaisance, la côte à tombolo domine dans ce secteur avec près de 37 km de longueur (figure 15). Ensuite, les falaises rocheuses représentent à peu près 6 % de l'ensemble du littoral de la zone. Les côtes dunaires à base rocheuse, deltaïques à base rocheuse et les terrasses de plage représentent respectivement 0,8 %, 0,4 % et 0,3 % de la longueur totale de la côte. Un peu plus de 78 % du littoral était en érosion à l'été 2008.

**Tableau 6. Types de côte, état de la côte
et processus actifs côtiers dans le secteur de Pointe-aux-Loups**

Types de côte	Processus côtiers ²	État de la côte	Longueur (m)	Proportion (%)
9	gds, eb, rc, rav, cry, vg, edb, edd, efdo, css, gp	Actif	175,3	100
		Total	175,3	100
Dunaire à base rocheuse	eol, vg, efdo, cry, edb, dec, vtt, css	Actif	324,7	100
		Total	324,7	100
Falaise rocheuse à sommet meuble	vg, edd, edb, cry, dec, eol, efdo, eb, efe	Actif	1 258,2	97,6
		Artificiel	31,1	2,4
		Total	1 289,3	100
Falaise rocheuse	edb, rc, eol, efdo, vg, cry	Actif	783,6	73,2
		Stable	203,8	19,0
		Semi-végétalisé	83,5	7,8
		Total	1 070,9	100
Terrasse de plage	vg, sub, eol, vtt	Actif	88,8	63,7
		Artificiel	50,5	36,3
		Total	139,3	100
Tombolo	eol, vg, sub, css, vtt, efdo	Actif	27 579,2	75,2
		Semi-végétalisé	2 352,6	6,4
		Stable	2 159,9	5,9
		Accumulation	2 039,7	5,6
		Artificiel	1 324,7	3,6
		Artificiel-Actif	1 196,9	3,3
		Total	36 653,1	100

² Voir dans l'annexe 1B pour les différents codes des processus actifs.

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

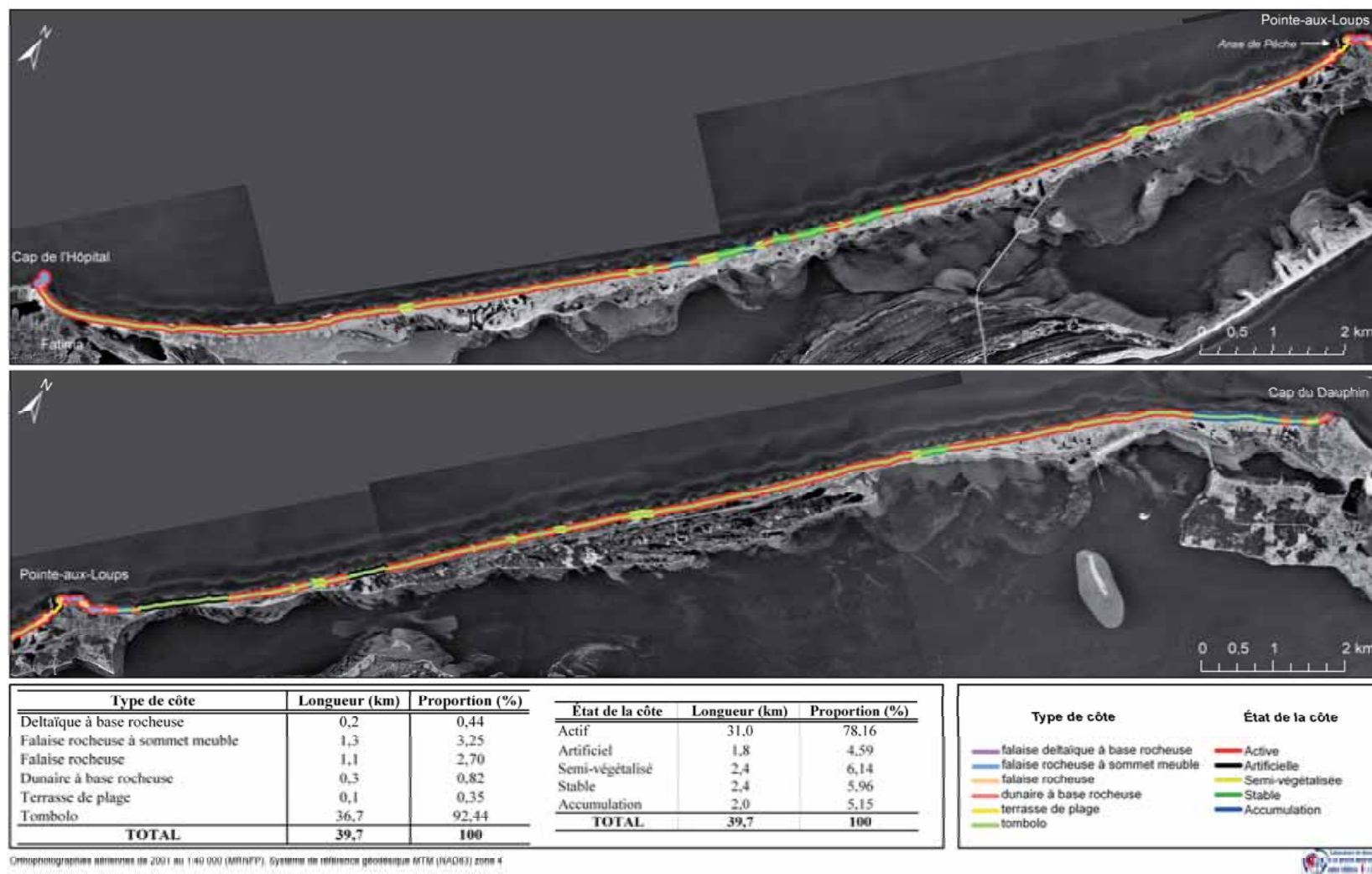


Figure 15. Type et état de la côte de l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

3.2.1 Côte deltaïque à base rocheuse du secteur de Pointe-aux-Loups

La côte deltaïque à base rocheuse est plutôt rare avec ses 175 m de longueur. Elle se trouve sur l'île de la Pointe aux Loups, au nord du quai. En fait, cette côte est composée d'une unité fluvio-glaciaire proximale avec de nombreux galets et blocs, unité qui repose directement sur le grès (figure 16). Cette unité est surmontée d'une séquence de sable fin stratifié prodeltaïque, elle-même surmontée d'un dépôt éolien. Cette côte est active sur toute sa longueur et présente plusieurs processus d'érosion associés à cette stratigraphie complexe (tableau 6). Les glissements superficiels sont nombreux dans les sédiments fins. Le ruissellement concentré occasionne aussi le recul du sommet de la falaise. Il se transforme parfois en ravinement. Le sapement à la base de la falaise par les vagues la rend instable et provoque parfois des éboulements et l'effondrement de blocs ainsi que des glissements en plan. Les phases de gel et de dégel agissent également sur le dépôt fin sableux.

La plage est très étroite sur toute la longueur du segment (de 5 à 10 m). Contrairement aux autres plages qui sont composées principalement de sable moyen, celle-ci est composée de galets et de blocs à prédominance cristalline (figure 16).



Figure 16. Exemple de côte deltaïque à base rocheuse de l'île de la Pointe aux Loups

3.2.2 Côte dunaire à base rocheuse du secteur de Pointe-aux-Loups

Ce type de côte représente la transition entre les falaises rocheuses et les dunes du tombolo (figure 17). La côte dunaire à base rocheuse totalise une longueur de 325 m dans l'ensemble du secteur et elle est active. Les processus éoliens dominant dans le dépôt de sable au sommet de la falaise, alors que les processus hydrodynamiques et d'effondrements en blocs se concentrent plutôt dans la partie rocheuse située à la base de la falaise (tableau 6). Le recul de la falaise entraîne l'effondrement de débords organiques. Les processus cryogéniques, la dessiccation, les VTT et les coulées de sable sec provoquent l'instabilité de la falaise et, par le fait même, son recul.

La largeur des plages pour la côte dunaire à base rocheuse est caractérisée par deux modes, soit des plages très larges (> 30 m) et des plages très étroites (de 5 à 10 m).



Figure 17. Exemple de côte dunaire à base rocheuse (Grosse-Île)

3.2.3 Côte à falaise rocheuse du secteur de Pointe-aux-Loups

Un peu plus de 2 km de la zone sont caractérisés par une falaise rocheuse (figure 18). Les falaises rocheuses de grès sont en érosion à 97 % et celles ayant un sommet meuble le sont à 73 %. Le processus qui distingue les deux types est surtout le ruissellement concentré qui affecte d'une façon plus importante les falaises rocheuses à sommet meuble. En général, les vagues, les effondrements, les processus cryogéniques, la dessiccation, la déflation

éolienne et les éboulements sont les processus qui affectent ce type de côte (tableau 6). Les effondrements sont liés au sapement basal par les vagues et se produisent surtout dans les falaises de grès.

Les plages situées au pied des falaises rocheuses présentent généralement une largeur inférieure à 5 m. Les falaises sont très réfléchives, ce qui ne permet pas aux sédiments de s'accumuler à leur pied.



Figure 18. Exemple de côte à falaise rocheuse à Pointe-aux-Loups

3.2.4 Côte à terrasse de plage du secteur de Pointe-aux-Loups

Ce type de côte constitue une faible partie du trait de côte avec environ 140 m de longueur (figure 19). La terrasse de plage est localisée dans l'anse de Pêche de l'île de la Pointe aux Loups, entre deux jetées en enrochement (figure 15). Elle est soit active ou artificialisée en raison d'un dépôt de dragage (tableau 6). Les processus dominants sont les vagues, la submersion, la déflation éolienne et la dégradation occasionnée par les VTT.

La largeur de plage pour ce type de côte est large, tant pour les secteurs actifs qu'artificialisés.



Figure 19. Vue aérienne d'un exemple de côte à terrasse de plage avec le dépôt de sable de dragage (secteur de Pointe-aux-Loups)

3.2.5 Côte à tombolo du secteur de Pointe-aux-Loups

La côte à tombolo représente la plus grande partie du secteur à l'étude (figure 20). Elle est dunifiée comme celle de la baie de Plaisance. Toutefois, en plus des dunes bordières, on y trouve aussi des dunes paraboliques et de nombreuses caoudeyres. Contrairement au tombolo de la baie, celui-ci est en érosion sur 75 % de sa longueur et artificialisé sur 7 %. L'artificialité se concentre au nord de l'île de la Pointe aux Loups. Les processus côtiers qui touchent la côte sont la déflation éolienne, les vagues, la submersion, les coulées de sable sec, la dégradation occasionnée par les VTT et les effondrements de débords organiques (tableau 6). Les principaux phénomènes qui provoquent le recul des dunes sont les grandes tempêtes soufflant de l'ouest et du nord.

La côte à tombolo présente généralement des plages classées de large à très large, soit plus de 30 m de large. Cependant, la largeur moyenne des plages devant les tronçons artificiels varie plutôt de 15 à 20 m, selon la caractérisation réalisée à l'été 2008. La variabilité de la largeur des plages est aussi plus grande devant la côte artificielle, puisque la largeur peut varier de quasi absente (moins de 5 m) à très large (plus de 30 m). Le type d'artificialité est un facteur explicatif dans la variabilité de la largeur, les épis rocheux favorisant la sédimentation en amont, selon la dérive littorale.



Figure 20. Exemple de côte à tombolo (secteur de Pointe-aux-Loups)

4. CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE DE LA ZONE CÔTIÈRE

4.1 Délimitation des unités et des cellules hydrosédimentaires

L'analyse et l'interprétation des résultats des caractéristiques sédimentologiques et géomorphologiques des deux secteurs à l'étude ont été réalisées en fonction des unités hydrosédimentaires : unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance et unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups (figures 21 et 22, respectivement).

L'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance comporte trois cellules hydrosédimentaires délimitées par des dérives littorales divergentes. La principale cellule correspond à la majeure partie de la baie de Plaisance qui présente une dérive littorale convergente. Aux extrémités de la cellule hydrosédimentaire de la baie de Plaisance, on trouve la cellule de l'anse aux Étangs qui va jusqu'au Gros Cap, au nord, et la cellule du Sandy Hook, au sud, qui ferme l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance. Pour notre analyse, il sera principalement question de la cellule hydrosédimentaire de la baie de Plaisance que nous avons divisé en deux secteurs pour la présentation des résultats, soit le secteur de La Martinique, au nord, et celui du Cap, au sud. La séparation se situe à l'ancien goulet soit au kilomètre 12,5 (voir figures 49 et 50).

Quant à l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups, la dérive littorale principale s'effectue sur l'ensemble de la zone, du sud vers le nord. Toutefois, nous avons cru bon diviser l'unité en deux cellules hydrosédimentaires de part et d'autre de l'île de la Pointe aux Loups, soit la cellule de Fatima, au sud, et celle de Pointe-aux-Loups, au nord. L'île de la Pointe aux Loups fait office d'obstacle naturel au transit sédimentaire, obstacle aussi amplifié par les jetées. De plus, directement en face de la pointe rocheuse de Pointe-aux-Loups, les relevés bathymétriques indiquent un haut fond qui correspond à un complexe de dépôts glaciaires et fluvio-glaciaires comportant de nombreux blocs rocheux. Ce contexte géomorphologique de la zone pré-littorale peut aussi constituer un obstacle au transit sédimentaire provenant du sud. Ce dépôt constitue toutefois une source sédimentaire sous-marine alimentant la cellule de Pointe-aux-Loups au nord.

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

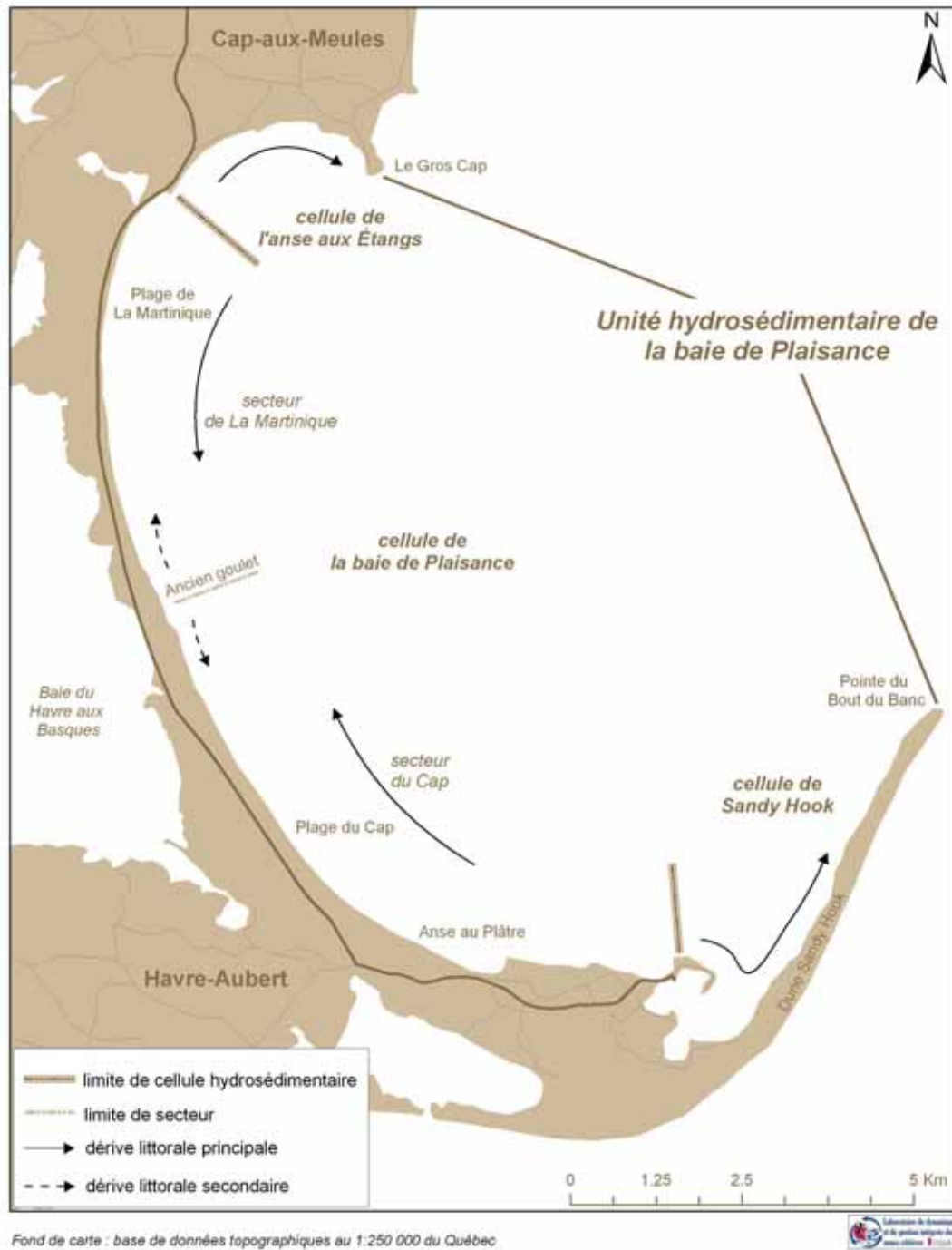
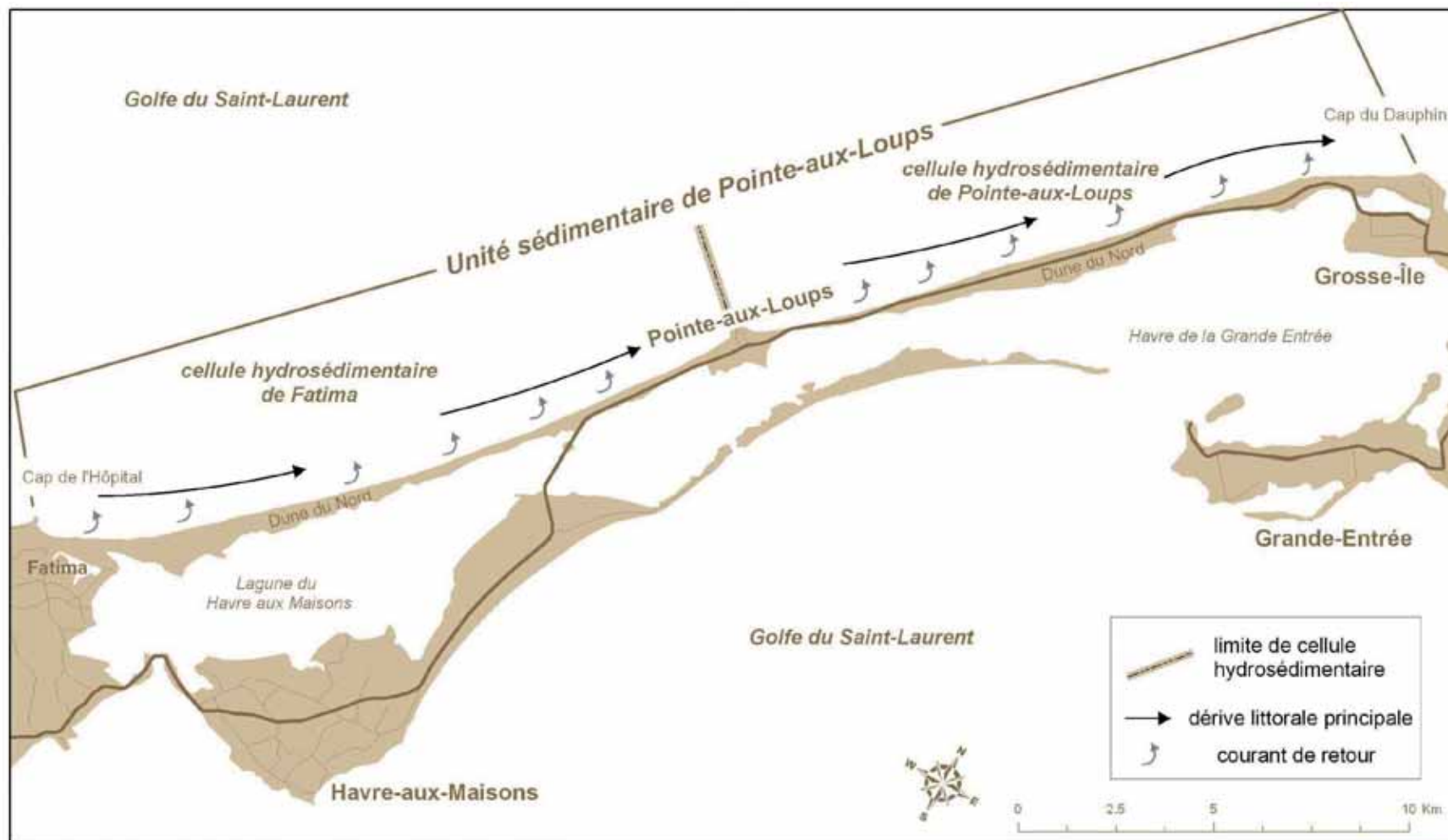


Figure 21. Cellules hydrosédimentaires de l'unité de la baie de Plaisance



Fond de carte : base de données topographiques au 1:250 000 du Québec

Figure 22. Cellules hydrosédimentaires de l'unité de Pointe-aux-Loups

4.2 Analyses sédimentologiques (2008-2009)

La composition granulométrique des sédiments de plage prélevés durant les deux années d'étude (2008 et 2009) dans les deux unités hydrosédimentaires de la baie de Plaisance et de Pointe-aux-Loups semble révéler des singularités sédimentaires pour chacune d'elles. La caractérisation sédimentologique des deux unités se fera séparément. Il est à noter que seule la fraction granulométrique inférieure à 2 mm est décrite ci-dessous. Aussi, vu l'infime proportion des fractions fines; l'argile, la vase très fine, la vase fine, la vase moyenne, la vase grossière et la vase très grossière ont été regroupées sous la dénomination « vases ».

4.2.1 Unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance

4.2.1.1 Caractérisation sédimentologique des plages

L'examen de la composition granulométrique des sédiments de plage de la baie de Plaisance révèle une large prédominance de sédiments sableux et la présence, dans des proportions beaucoup plus faibles, de vases et d'argiles. Une caractérisation plus étendue révèle des fractions granulométriques variant des sédiments argileux aux sables très grossiers. Sauf devant le profil MAR20, la taille moyenne du sédiment est celle de sable fin à moyen, aussi bien sur le haut estran (209 à 356 μm) que sur le bas estran (145 à 383 μm) (figure 26 et 27). À quelques rares exceptions, les sédiments analysés présentent une distribution unimodale et sont bien classés à modérément bien classés de part et d'autre de la médiane.

Le sédiment prélevé devant le profil MAR 20 est sensiblement différent du reste des sédiments de la baie. D'une part, à cause de la taille moyenne des sédiments et, d'autre part, de la composition des différentes classes de taille. En effet, la taille moyenne des sédiments mesurée en juin 2009 dépasse les 900 μm (sable grossier) (figure 27). Par ailleurs, on y trouve une proportion non négligeable de sable grossier sur le haut estran (15,4 % en moyenne) et des sables très grossiers sur le bas estran (13,5 % en moyenne) (figure 25). Cette différence s'explique par la localisation du profil MAR20 à proximité de la falaise rocheuse. Celle-ci alimente la plage en débris grossiers (figure 13), de sorte qu'il est normal d'y trouver un granoclassement variant de sédiments plus grossiers à des sédiments plus fins lorsqu'on s'éloigne de la falaise. Comme la dérive littorale s'effectue vers le nord, les vagues réduisent les matériaux grossiers au fil du transport sédimentaire.

Le sable constitue en moyenne pas moins de 97,1 % des sédiments de plage prélevés dans la baie de Plaisance (figures 23 à 25). Les sédiments du haut estran sont le plus souvent exclusivement constitués de sable. Les sédiments vaseux, quand il y en a, n'excèdent pas 1,8 %. Sur le bas estran, la proportion des vases est à peine plus élevée, mais ne dépasse pas 2,9 %.

Une analyse plus minutieuse de la fraction sableuse révèle des sables très fins à très grossiers, avec une large prédominance des sables fins à moyens. Ces deux derniers constituent en moyenne pas moins de 75 % du sédiment des plages.

Le sable grossier, quand il est représenté, constitue en moyenne 1,8 à 8,6 % du sédiment devant les profils MAR2 à MAR18. Il est à noter que, dans un même point d'échantillonnage, les proportions de cette fraction sédimentaire n'évoluent pas beaucoup dans le temps. L'analyse montre donc que les variabilités temporelles interannuelle et saisonnière sont très faibles.

En fonction du principal type de sable, la baie de Plaisance peut être partagée en deux parties sédimentologiques distinctes.

La première partie de la baie de Plaisance concerne le secteur septentrional de la baie et regroupe le secteur s'étendant entre les profils MAR1 et MAR8. C'est la partie principalement artificialisée (MAR1 à MAR6) de la baie. Les sédiments de la partie supérieure de l'estran y sont essentiellement composés de sable fin (48 à 60 %, en moyenne) et, dans une moindre mesure, de sable moyen (30 à 49 %, en moyenne) (figure 23). MAR8 semble marquer la transition, puisque pas moins de 65 % de sable moyen compose un des échantillons du haut estran (figure 24). Cette différence dans la taille granulométrique vient du fait que, devant l'enrochement, la plage au sens strict, et donc le haut estran, a pratiquement disparu, de sorte que la texture des sédiments se rapproche davantage de la texture trouvée sur le bas estran. L'évolution temporelle des différentes classes granulométriques sur la partie supérieure de l'estran de ce secteur révèle une diminution graduelle du sable moyen et une augmentation du sable fin en 2008. Les résultats obtenus pour le profil MAR6 illustrent bien cette évolution. Les taux de sable moyen passent de près de 50 % en juin à moins de 34 % en octobre. Simultanément, la proportion de sable fin passe de 40,8 % à 53,4 %. En 2009, le phénomène inverse se produit, mais dans des proportions plus faibles.

La deuxième partie concerne le reste de la baie et comprend le secteur compris entre les profils MAR9 et MAR20. Le sable moyen est la classe granulométrique la plus représentée sur le haut estran (49 à 67 %, en moyenne). Le sable fin est également bien représenté, puisqu'il compose de 16 à 46 % des sédiments de ce secteur. Il est à noter que les sédiments prélevés à MAR18 ressemblent davantage aux sédiments prélevés dans la partie nord de la baie.

La composition granulométrique des sédiments du bas estran ne suit pas cette compartimentation. Sauf de rares exceptions, les sables fins représentent la classe granulométrique la plus courante.

La taille granulométrique des sédiments trouvés sur la plage de la baie de Plaisance est très propice au transport éolien. Il est fréquent d'observer la formation de cordons et de dunes embryonnaires sur la plage entre chaque

marée, notamment lorsque le vent souffle de l'ouest. Ces sédiments, lorsque déposés sur la partie médiane et inférieure du haut estran, sont ensuite remobilisés par la dérive littorale, ce qui a pour effet d'augmenter la fréquence de la taille granulométrique des grains dans la classe des sédiments fins à moyens.

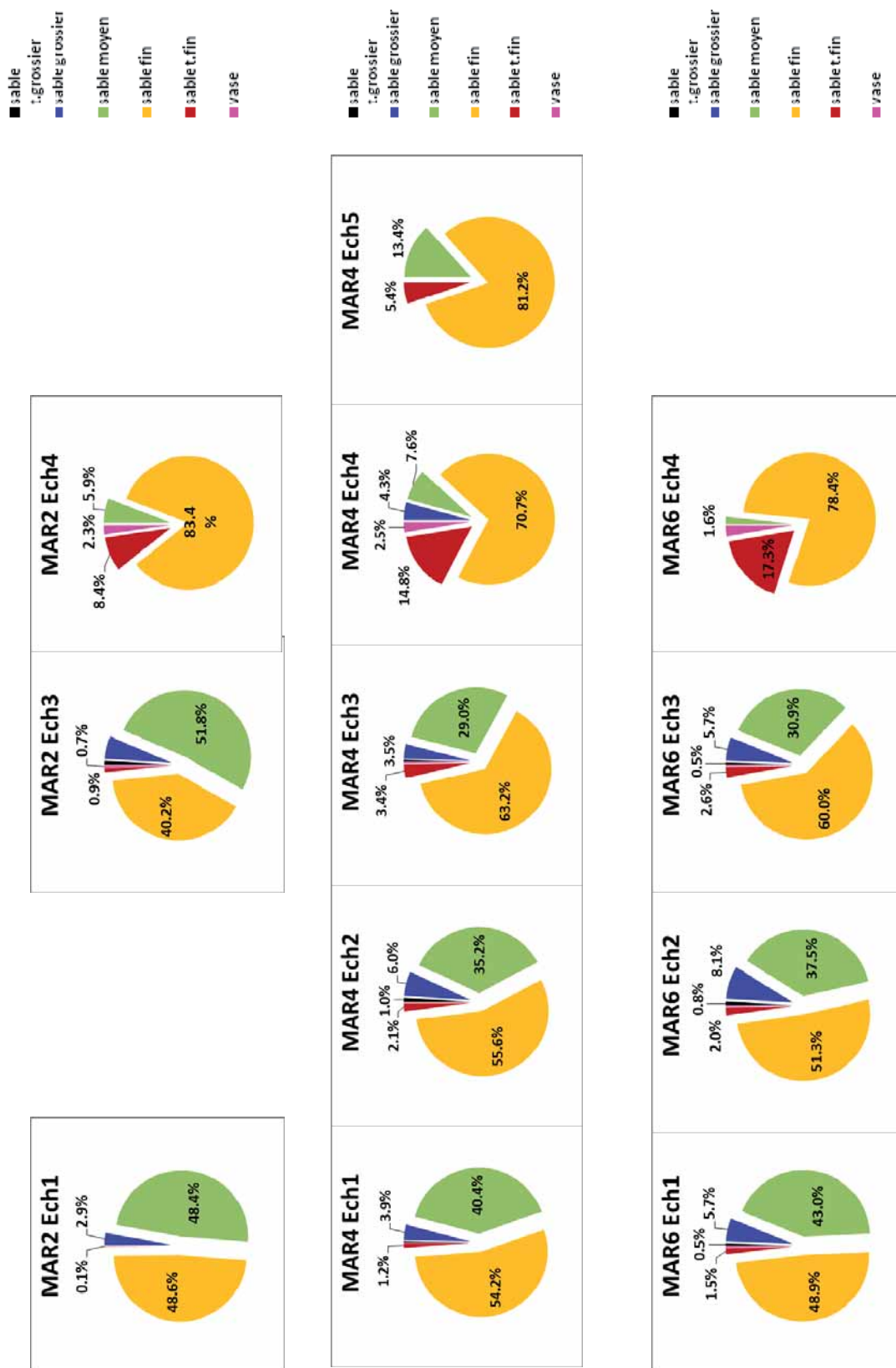


Figure 23. Composition granulométrique moyenne des sédiments de la baie de Plaisance

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELINE.

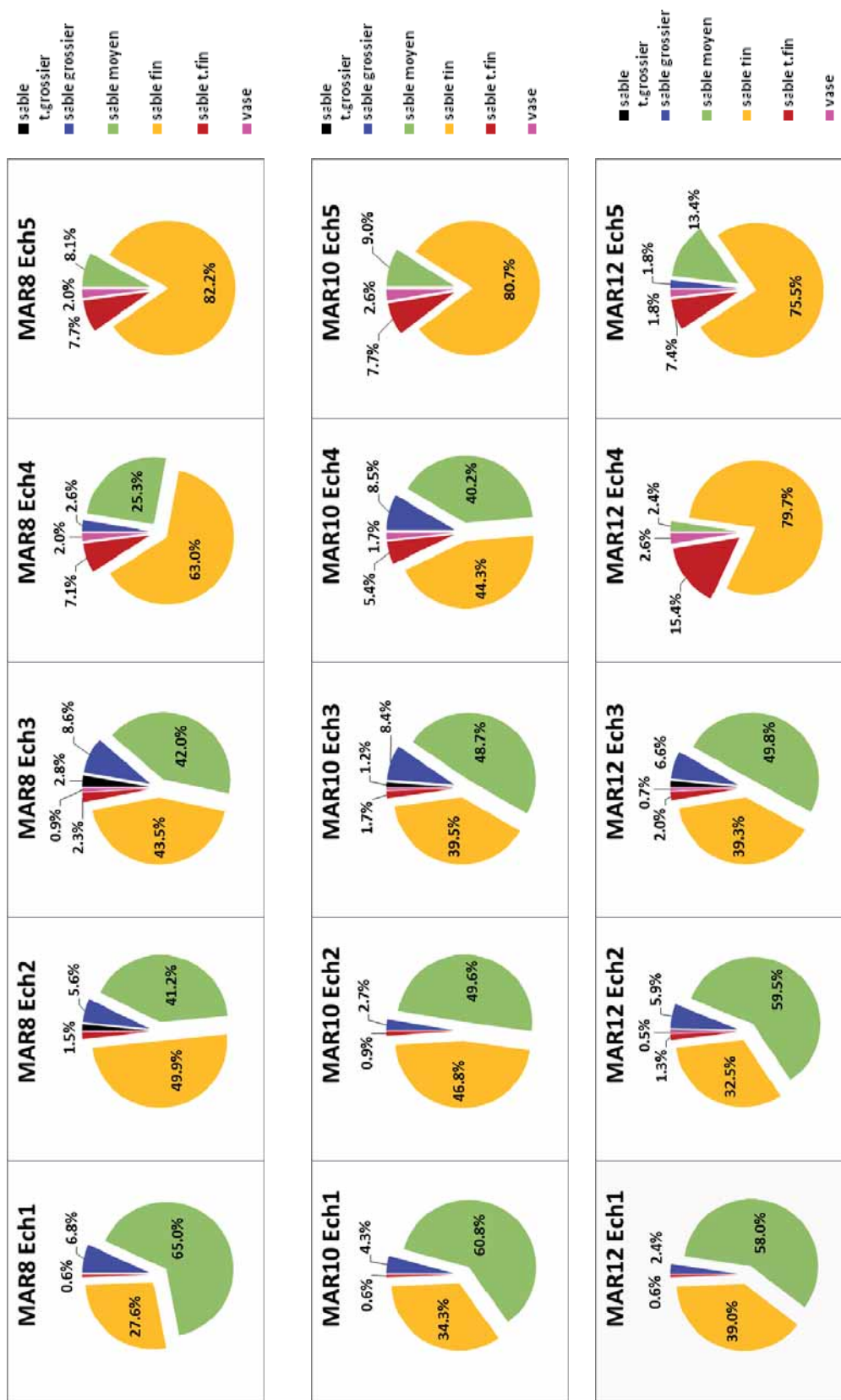


Figure 24 Composition granulométrique moyenne de la baie de Plaisance

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

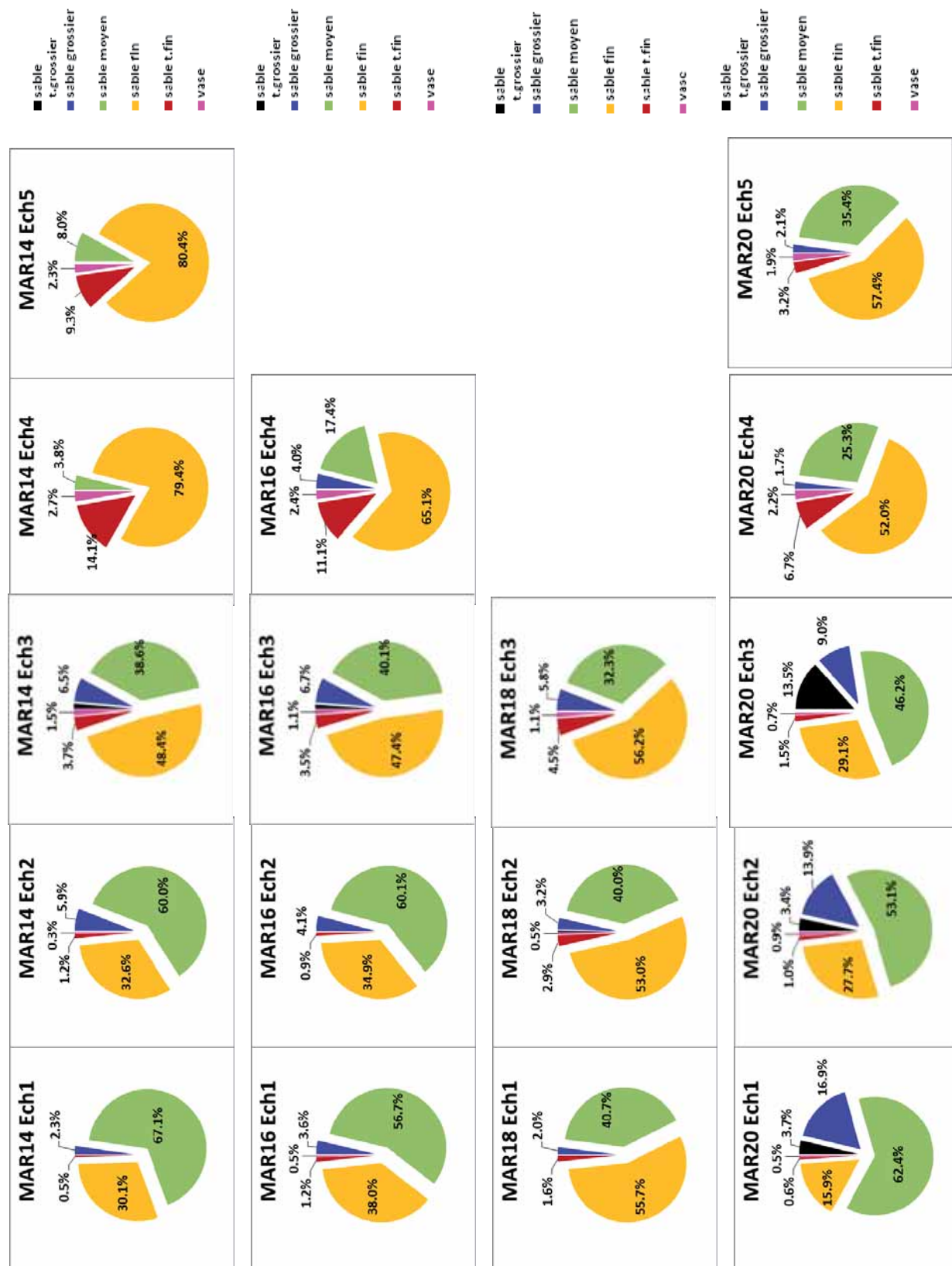


Figure 25. Composition granulométrique moyenne des sédiments de la baie de Plaisance

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

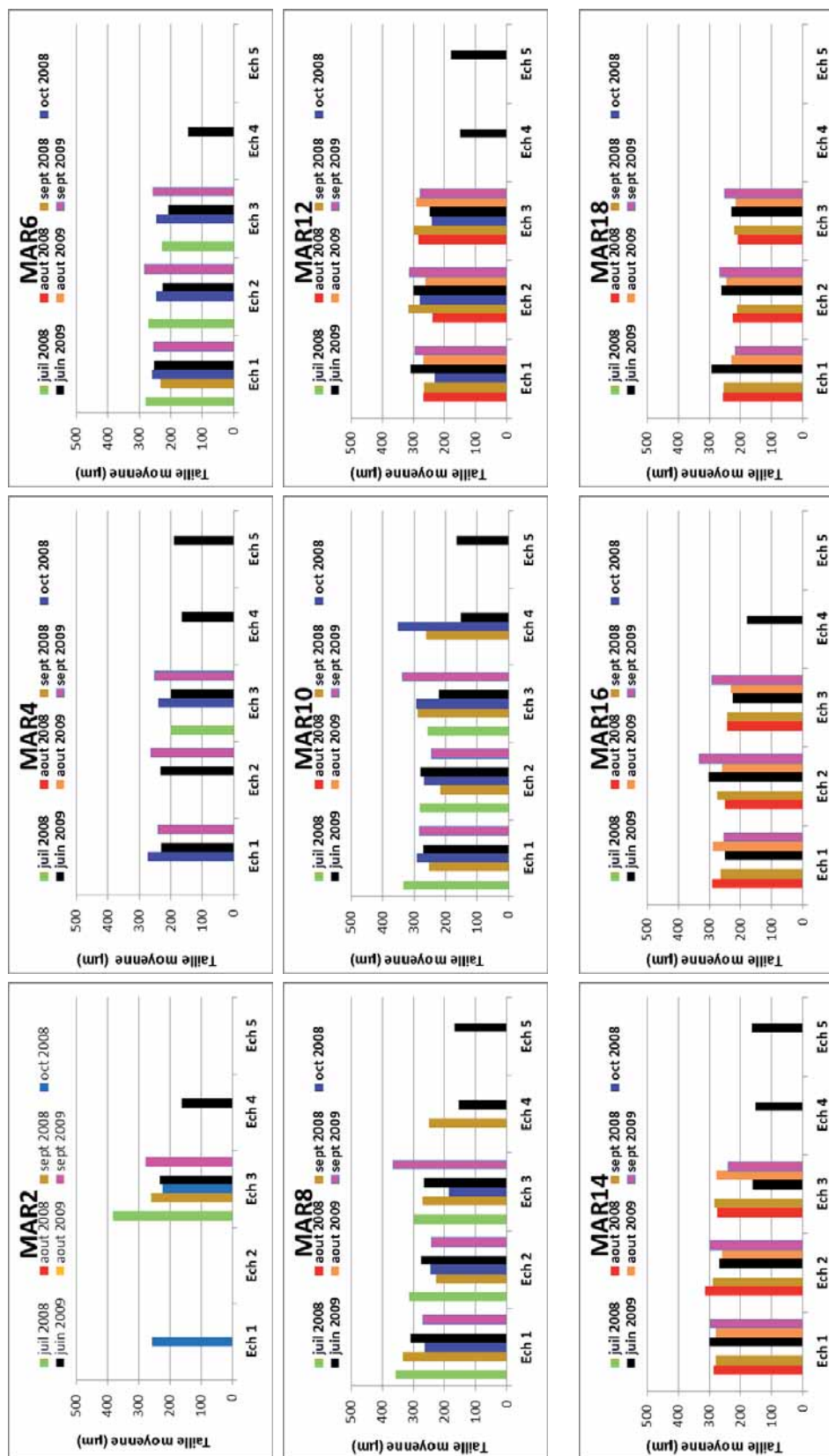


Figure 26. Évolution temporelle de la taille moyenne des sédiments de la plage de la baie de Plaisance

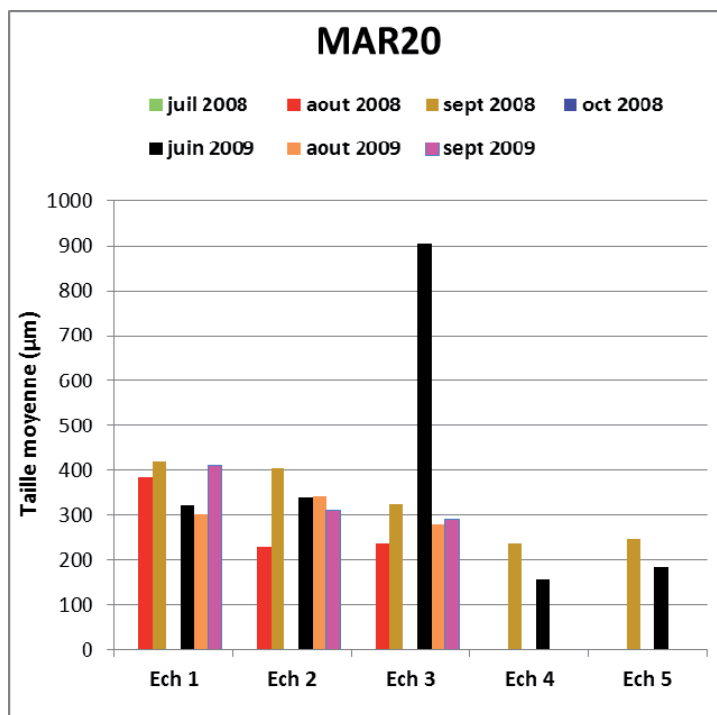


Figure 27. Évolution temporelle de la taille moyenne des sédiments de plage de la baie de Plaisance

4.2.1.2. Caractérisation sédimentologique de la zone pré littorale

Les échantillons marins prélevés en août 2009 dans la baie de Plaisance (figure 5) sont constitués de sédiments dont la taille varie de 93,9 à 493,9 μm (168,9 μm , en moyenne : sable fin) (figure 31) et sont essentiellement composés de sable. En effet, à l'exception d'un échantillon (M-MAR8 Ech3), pas moins de 92 % des sédiments sont constitués de sables très fins à très grossiers. Les sables fins (125 à 250 μm), dont le pourcentage peut atteindre 75,5 %, représentent généralement la fraction granulométrique majoritaire (figures 28 à 30). Certains échantillons du secteur de Gros Cap (M-MAR1 à M-MAR4) révèlent une grande proportion de sables très fins pouvant aller jusqu'à 59,8 %. Cette proportion est d'autant plus grande dans les échantillons 4 à 6, prélevés de 5 à 10 m de profondeur (figures 28 et 29).

À l'autre extrémité de la baie, les échantillons prélevés à faible profondeur (échantillons 1 à 3) des radiales 8 et 9 présentent des pourcentages en sable moyen relativement élevés (47,4 à 78,7 %).

La radiale 9 traverse La Passe située entre la dune Sandy Hook et l'île d'Entrée (figure 5). Les échantillons 1 à 3 ont été prélevés au sud de La Passe, tandis que les échantillons 4 à 6 ont été prélevés au nord de celle-ci. Des proportions élevées en sable moyen ont été trouvées dans les échantillons 3 et 4, prélevés à 2 m de profondeur, de part et d'autre du prolongement sous-marin de la flèche littorale Sandy Hook. Ces fortes valeurs en sable moyen semblent diminuer au profit du sable fin qui augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne du prolongement de la flèche. La composition granulométrique des échantillons 4 à 6 ressemble à celle trouvée dans la radiale 8. En effet, ces échantillons révèlent une diminution de la proportion de sable moyen, qui passe de 78,7 % (Ech 4) à 18,1 % (Ech 6), et une augmentation de sable fin, respectivement, 14 % à 71 % pour les échantillons 4 à 6.

Les sédiments vaseux, quand il y en a, représentent des proportions non négligeables pouvant atteindre 9,5 % et, exceptionnellement, 25,4 % dans le cas de l'échantillon (M-MAR8 Ech3), prélevé à 9 m de profondeur, près du Sandy Hook (figure 30). La proportion de sable de cet échantillon est de 74,6 %.

Il importe de noter les proportions élevées de sable grossier (57,8 %) et de sables très grossiers (9,9 %) de l'échantillon (M-MAR7 Ech1) prélevé à 2 m de profondeur au sud de la baie, près de l'anse au Plâtre.

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELINE.

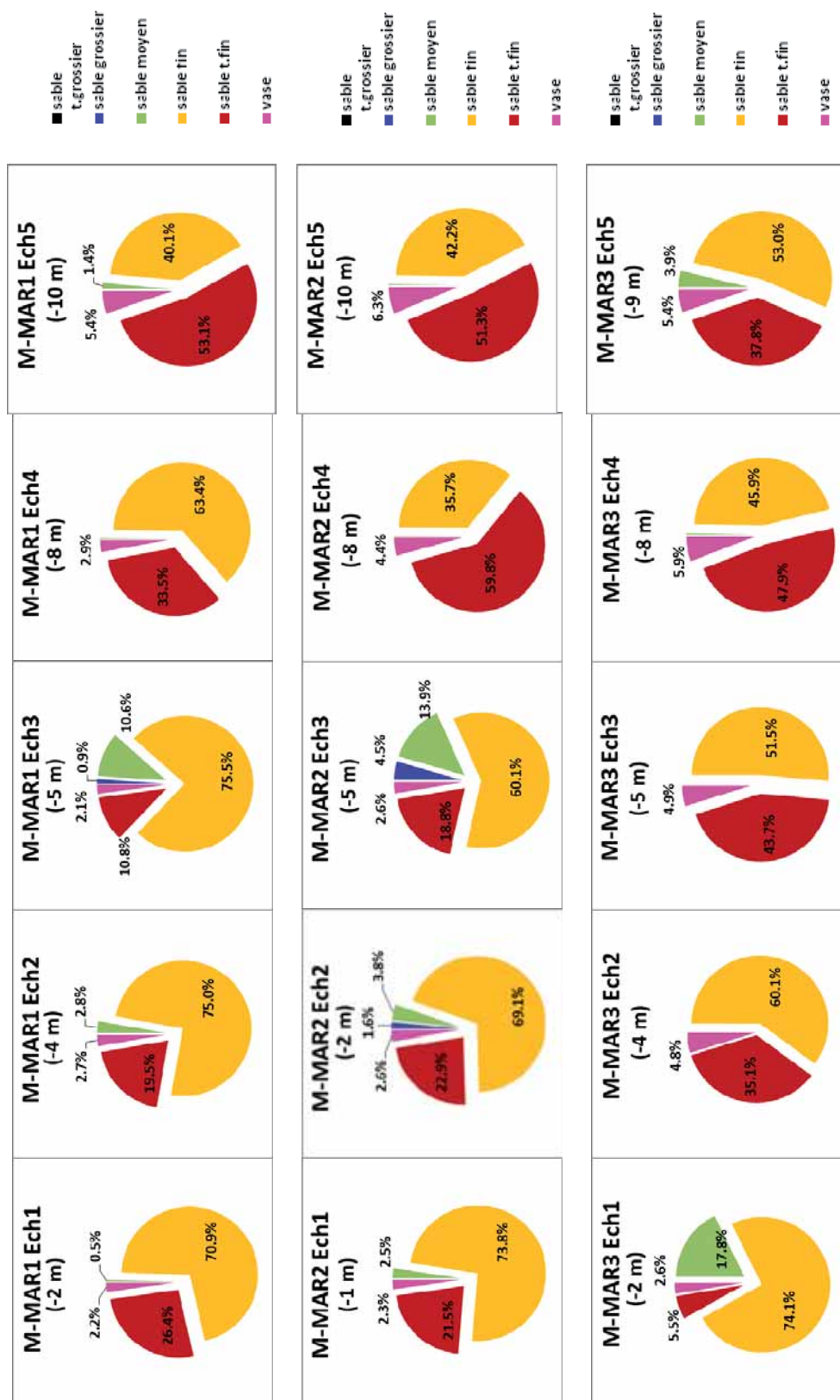


Figure 28. Composition granulométrique des sédiments marins de la baie de Plaisance

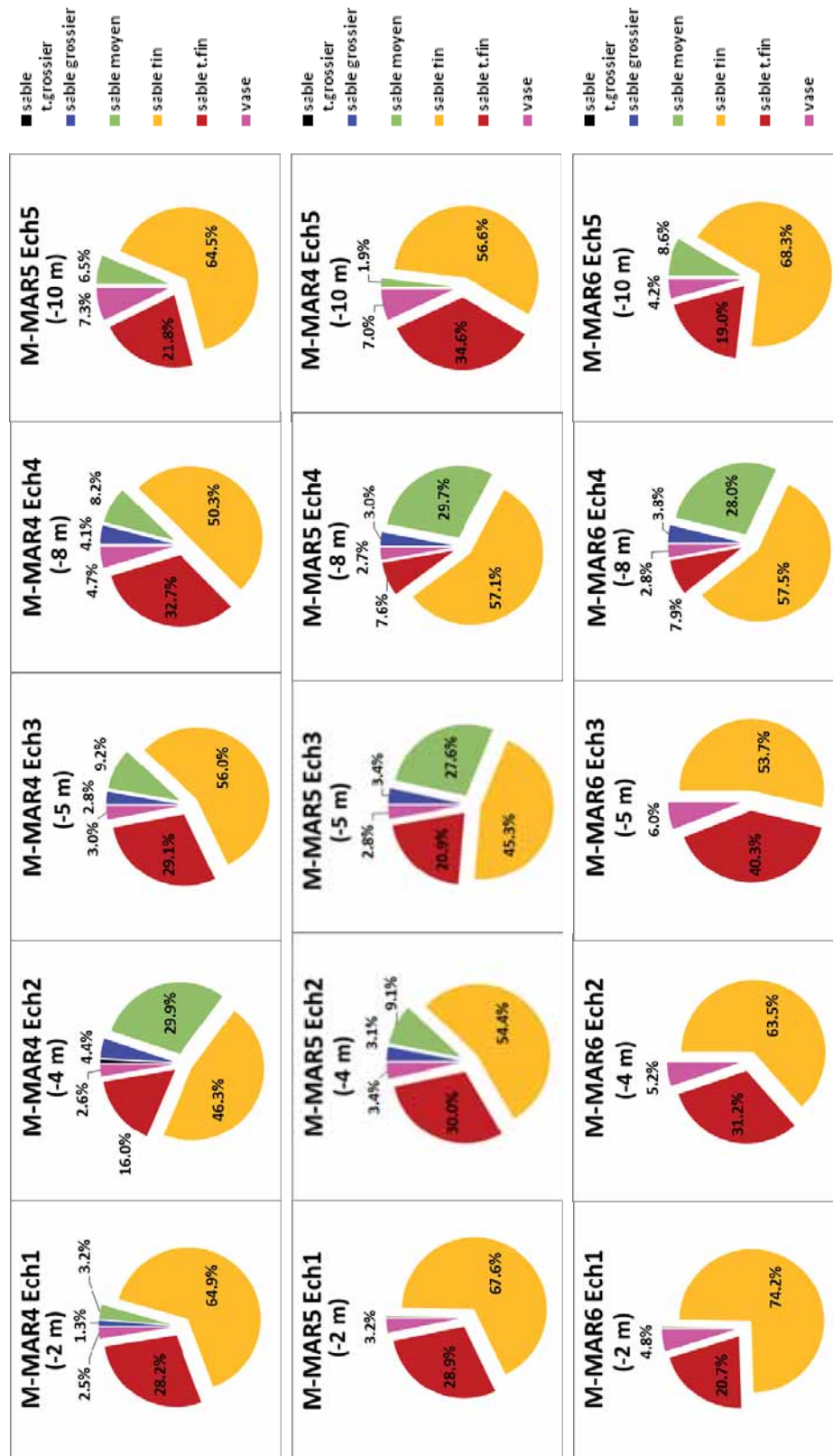


Figure 29. Composition granulométrique des sédiments marins de la baie de Plaisance

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDOSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

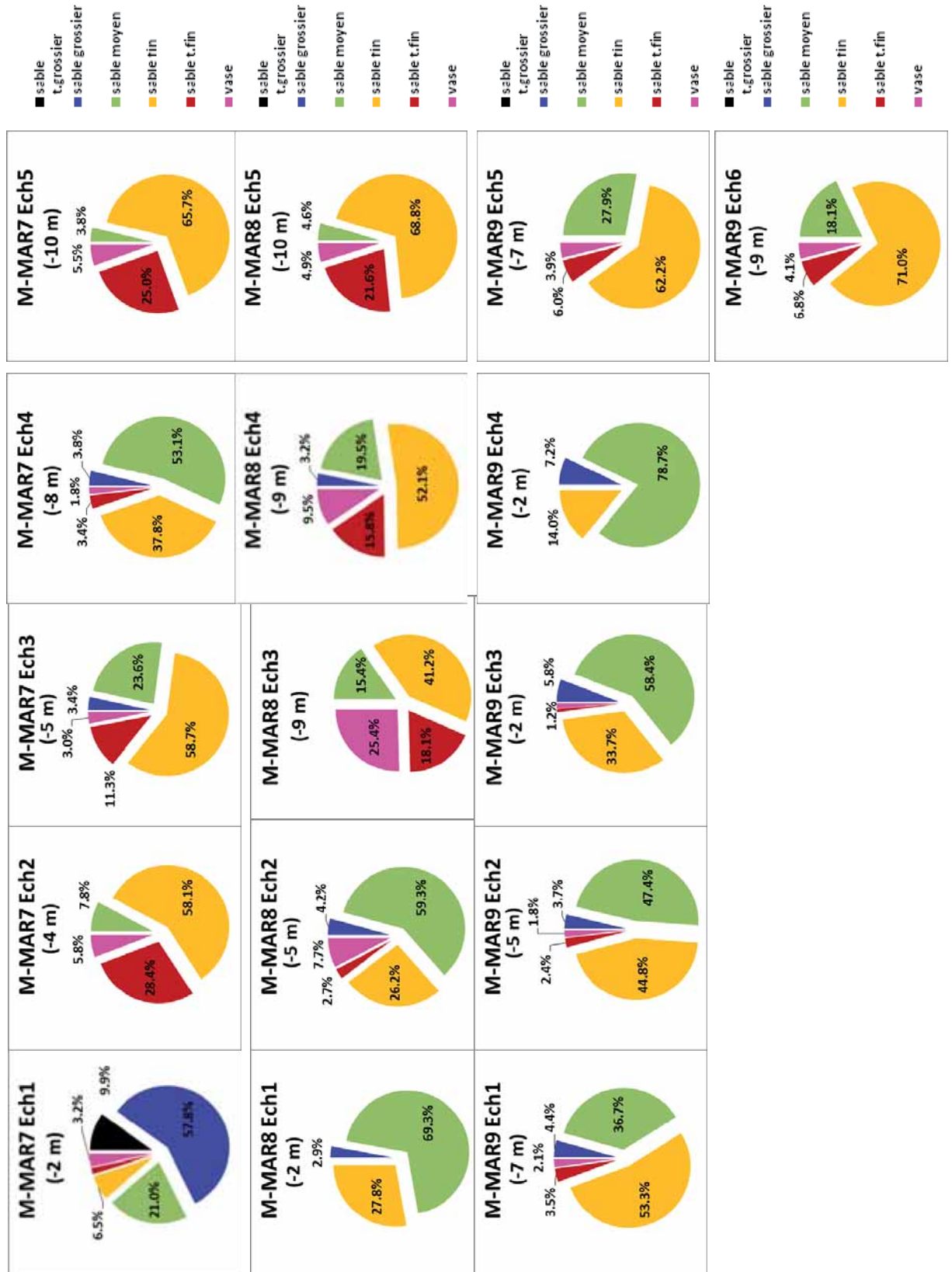


Figure 30. Composition granulométrique des sédiments marins de la baie de Plaisance

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

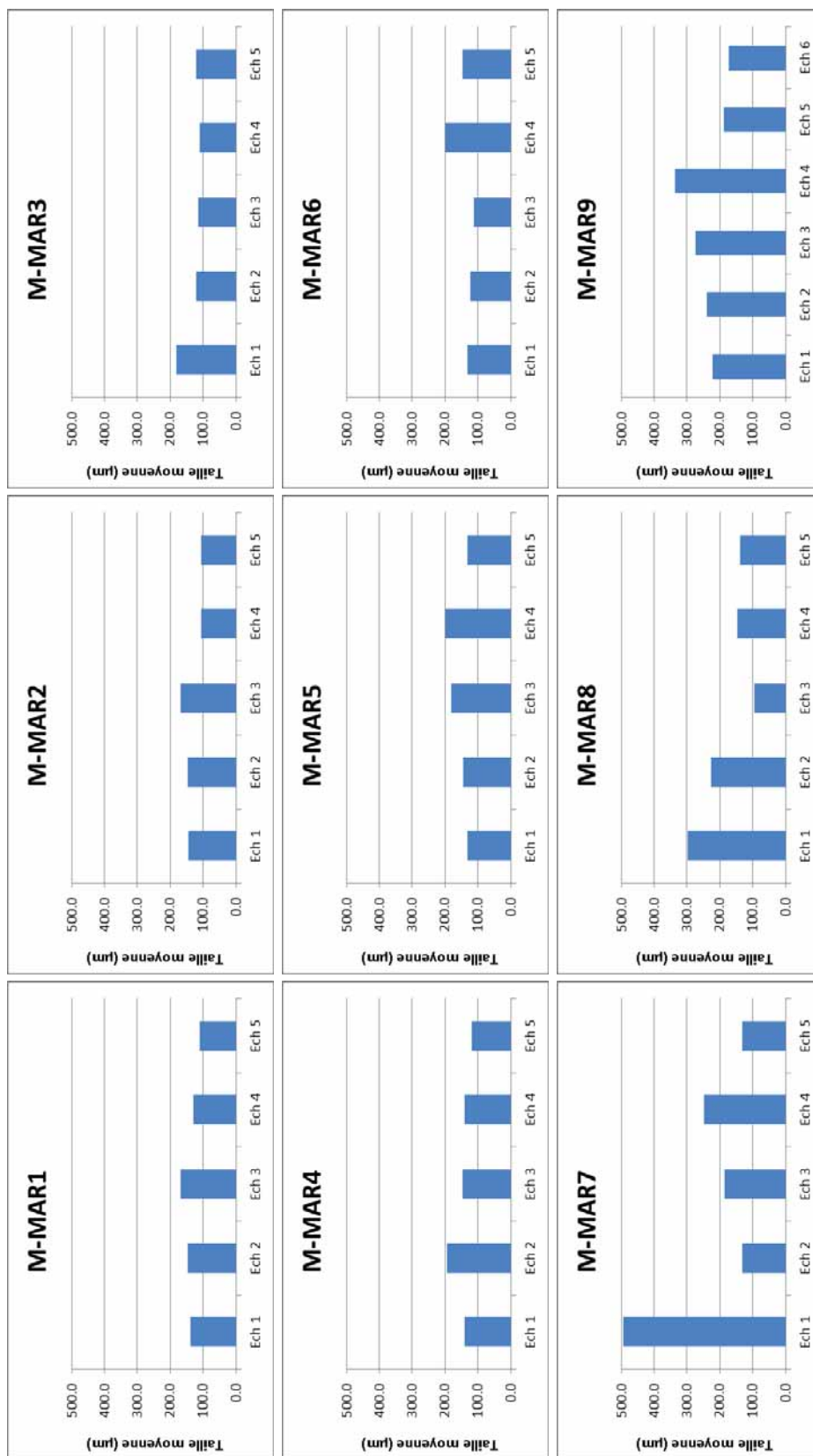


Figure 31. Taille moyenne des sédiments marins de la baie de Plaisance

4.2.2 Unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

4.2.2.1 Cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

4.2.2.1.1 Caractérisation sédimentologique des plages

Les sédiments de la plage de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups sont globalement composés de sables fins à grossiers, avec une large prédominance de sables moyens. Ils présentent une distribution unimodale et sont bien classés à très bien classés autour de la médiane [indice de dispersion moyen (indice de Task) : 1,27]. La taille des grains de sédiments est assez similaire d'un profil à l'autre et varie de 352 à 522 μm (sable moyen à grossier) sur le haut estran et de 274 à 531 μm (sable moyen à grossier) sur le bas estran (figures 32 à 35). À l'inverse des sédiments de la baie de Plaisance, il n'a pas été noté de grande différence de taille de sédiment entre le haut et le bas estran. La présence de nombreux cordons sableux de bas estran et l'indice de triage montrent qu'il s'agit d'un milieu hydrodynamique de forte énergie, ce qui peut aussi expliquer le peu de différence dans la distribution granulométrique entre le haut et le bas estran.

Les sédiments de Pointe-aux-Loups sont presque exclusivement constitués de sable. Seul un échantillon (juin 2009 : PLOU1 Ech 2) a révélé de la vase dans des proportions relativement faibles (0,9 %). Trois classes granulométriques sont représentées : les sables fins, moyens et grossiers.

Contrairement aux sédiments de la baie de Plaisance, ce ne sont pas les sables fins, mais les sables grossiers qui constituent, avec les sables moyens, la plus grande proportion des sédiments. En effet, les sables moyens à grossiers constituent pas moins de 97 % des sédiments (figure 35).

La composition des différentes classes de taille est assez uniforme tout le long de la cellule hydrosédimentaire. Presque les trois quarts des sédiments sont constitués de sable moyen, suivi de sable grossier qui représente pas moins de 23 %, en moyenne. Avec une moyenne de 2,7 %, les sables fins sont faiblement représentés (figure 35). De plus, les variabilités interannuelle et saisonnière de la taille granulométrique des plages sont faibles.

Contrairement au secteur de la baie de Plaisance, les vents dominants qui soufflent de l'ouest contribuent moins à alimenter en sable fin la plage, mais plus à alimenter le système dunaire de l'arrière-plage.

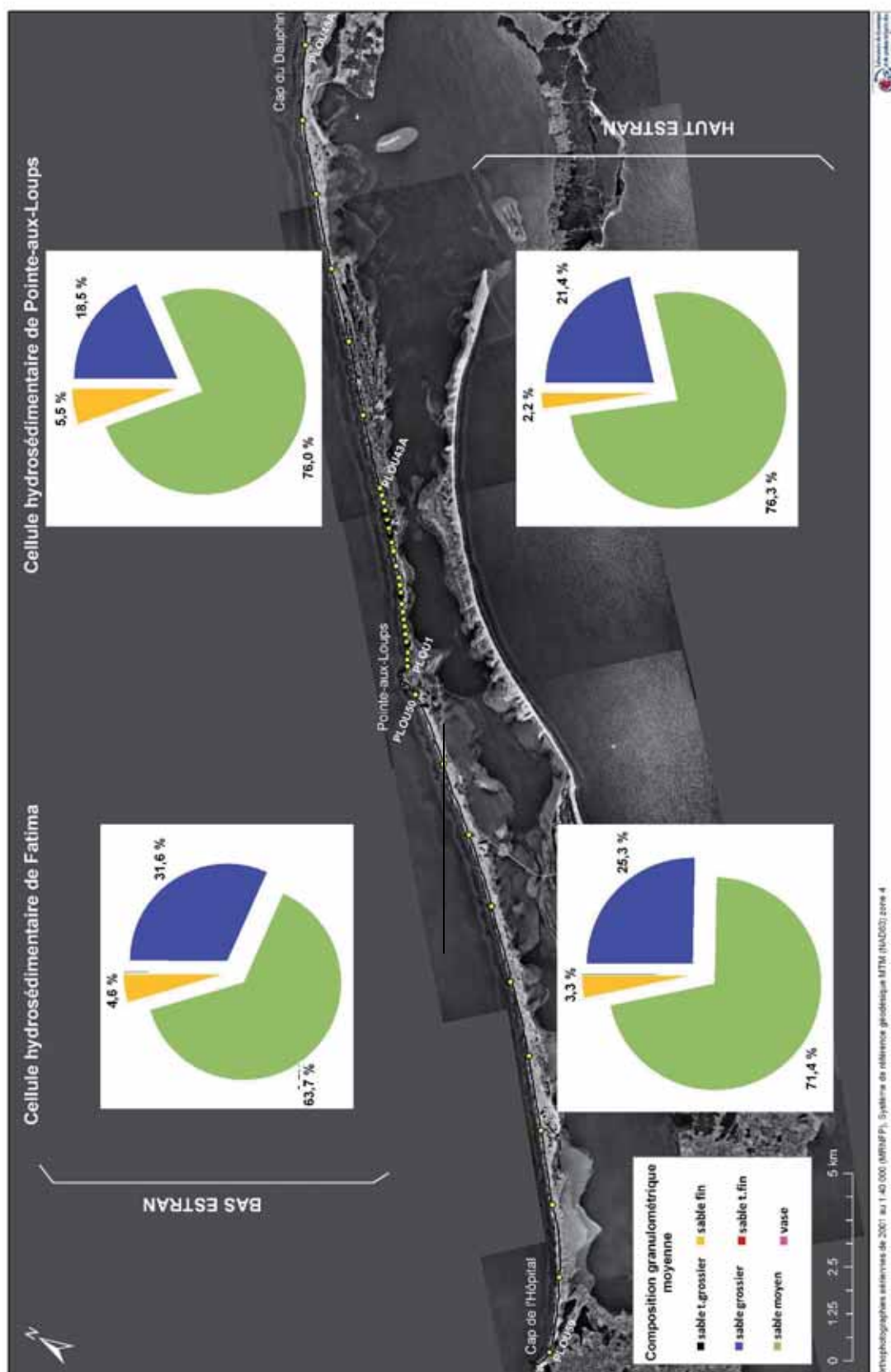


Figure 32. Composition granulométrique moyenne des sédiments des deux cellules hydrosédimentaires du secteur de Pointe-aux-Loups

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

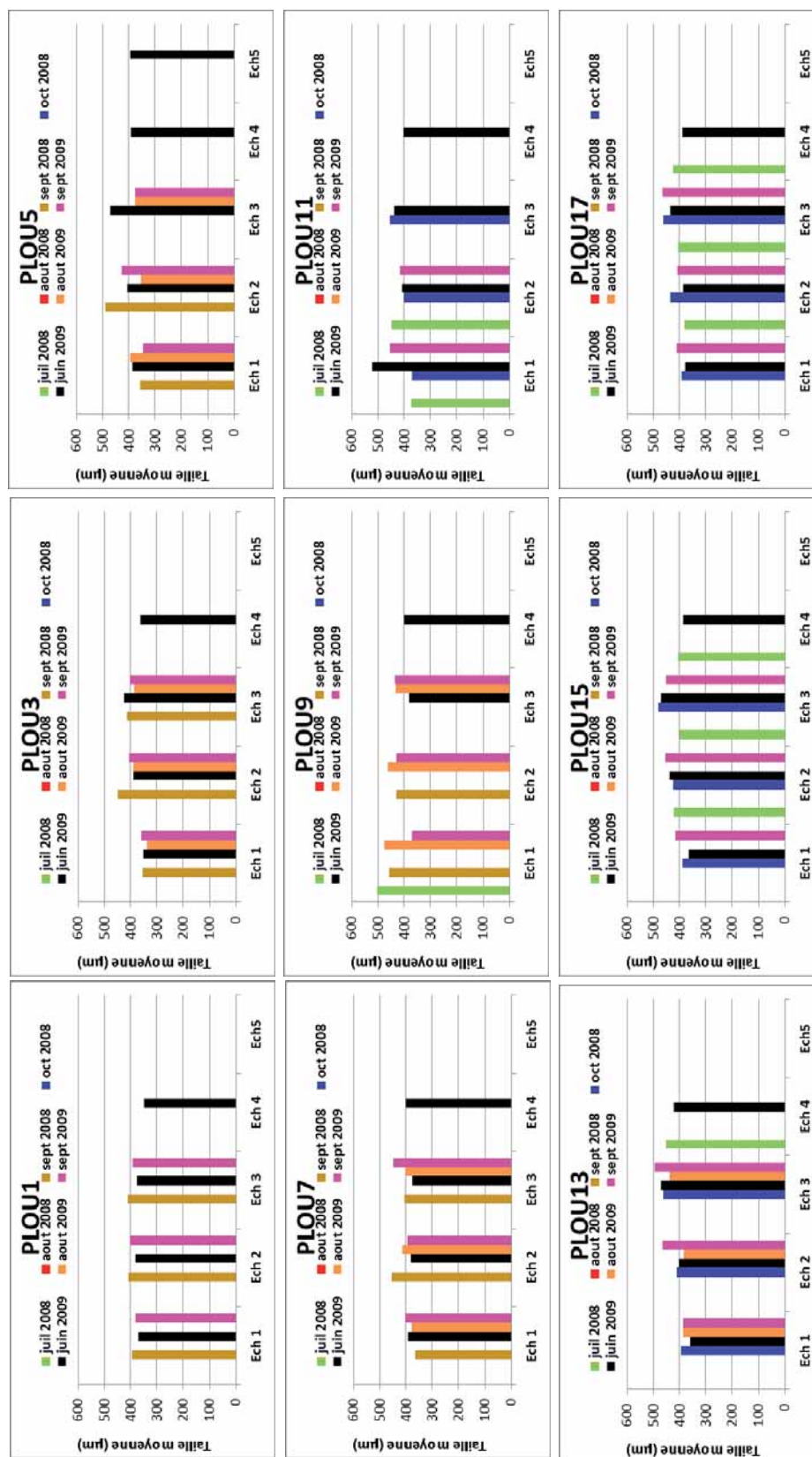


Figure 33. Évolution temporelle de la taille moyenne des sédiments de plage de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELINE.

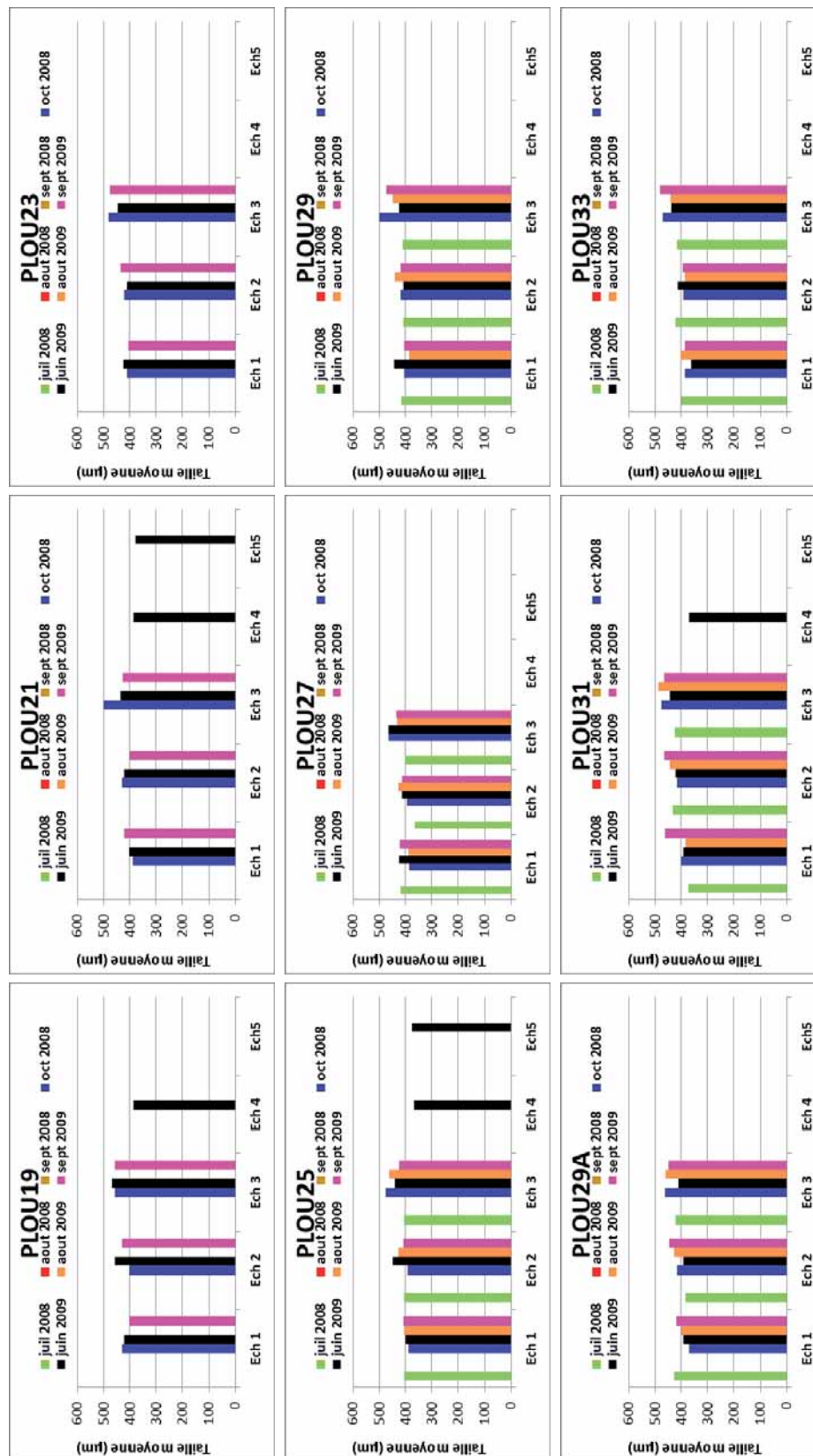


Figure 34. Évolution temporelle de la taille moyenne des sédiments de plage de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

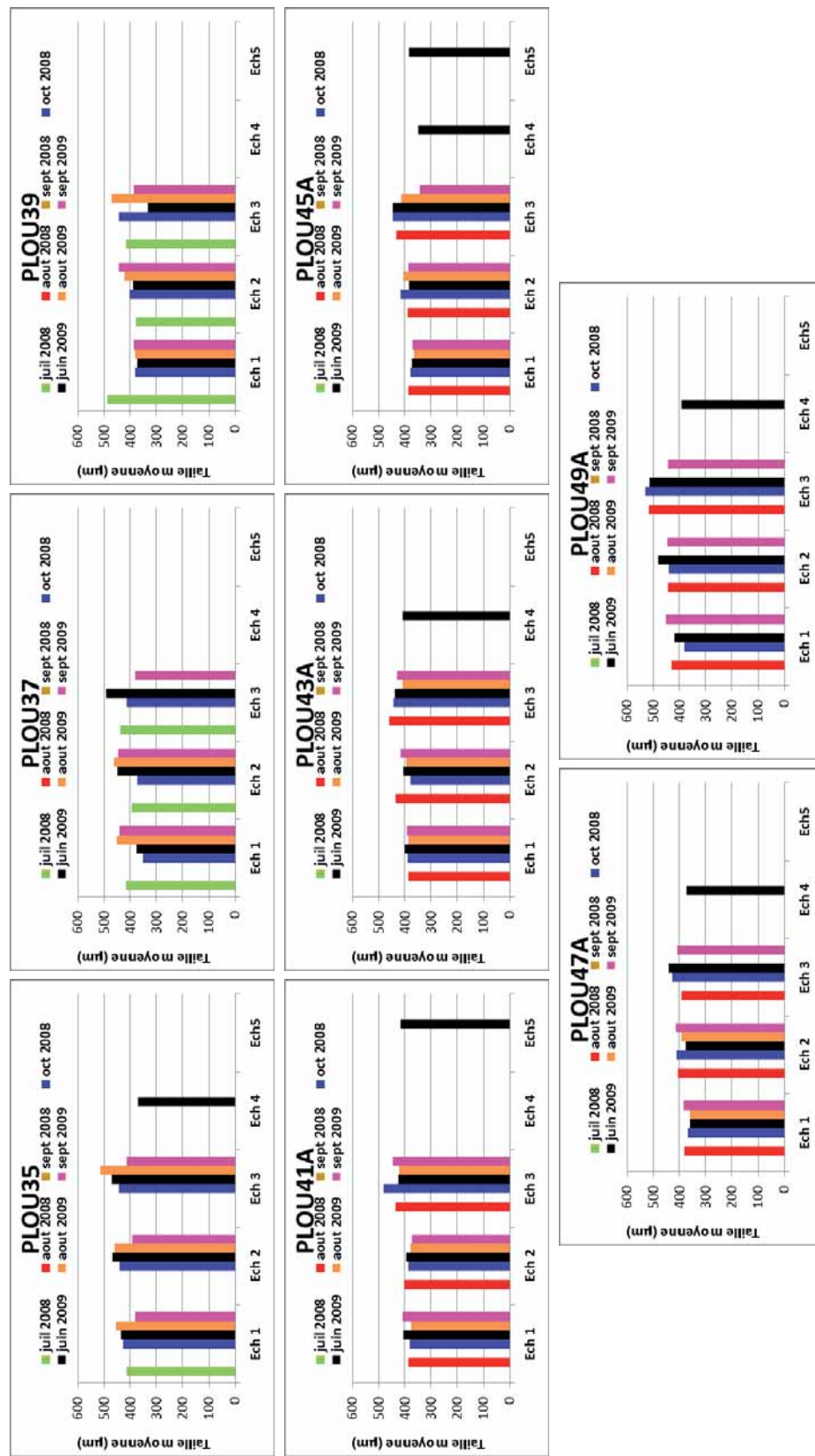


Figure 35. Évolution temporelle de la taille moyenne des sédiments de plage de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

4.2.2.1.2 Caractérisation sédimentologique de la zone pré littorale

La taille moyenne des sédiments marins de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups varie de 183,6 à 414,19 μm (302,2 μm , en moyenne : sable moyen) (figure 40). Ce sont essentiellement des sables (96,6 à 100 %) (figures 6 à 49). Il n'y a généralement pas de sédiments vaseux. Certains échantillons seulement en contiennent dans des proportions relativement faibles, ne dépassant pas 3,4 %.

Les sables fins à moyens constituent l'essentiel des sédiments prélevés (88,6 % en moyenne). Mis à part l'échantillon M-PLOU3 Ech3, les sables moyens, avec des pourcentages pouvant atteindre 79,2 % de l'échantillon, représentent la fraction granulométrique prédominante des échantillons prélevés de 2 à 5 m de profondeur (échantillons 1 à 3). La plupart de ceux prélevés au-delà de 5 m de profondeur (échantillons 4 à 6) révèlent des taux plus élevés de sable fin (jusqu'à 73,8 %).

Les sables grossiers sont moyennement représentés, puisqu'ils constituent en moyenne 9,1 % des sédiments. Il a été cependant enregistré une forte proportion de cette classe granulométrique dans les échantillons prélevés sur la radiale M-PLOU2. En effet, des pourcentages de sable grossier variant de 4,8 et 39,9 % ont été obtenus à cet endroit.

L'échantillon 2 de la radiale 10 (M-PLOU10 Ech2), située en face de la Pointe-aux-Loups, ne comprenait pas de sédiments de taille inférieure à 2 mm (figure 39). La caractérisation *in situ*, par plongée sous-marine, a révélé des sédiments variant du gravier (4 à 64 mm) aux blocs (plus de 128 mm) parsemés sur de la roche. Les autres échantillons de cette radiale ont été prélevés au niveau des fractures formées dans la roche. Ces sédiments grossiers proviennent de l'unité sédimentaire glaciaire et fluvioglaciaire trouvée dans ce secteur.

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

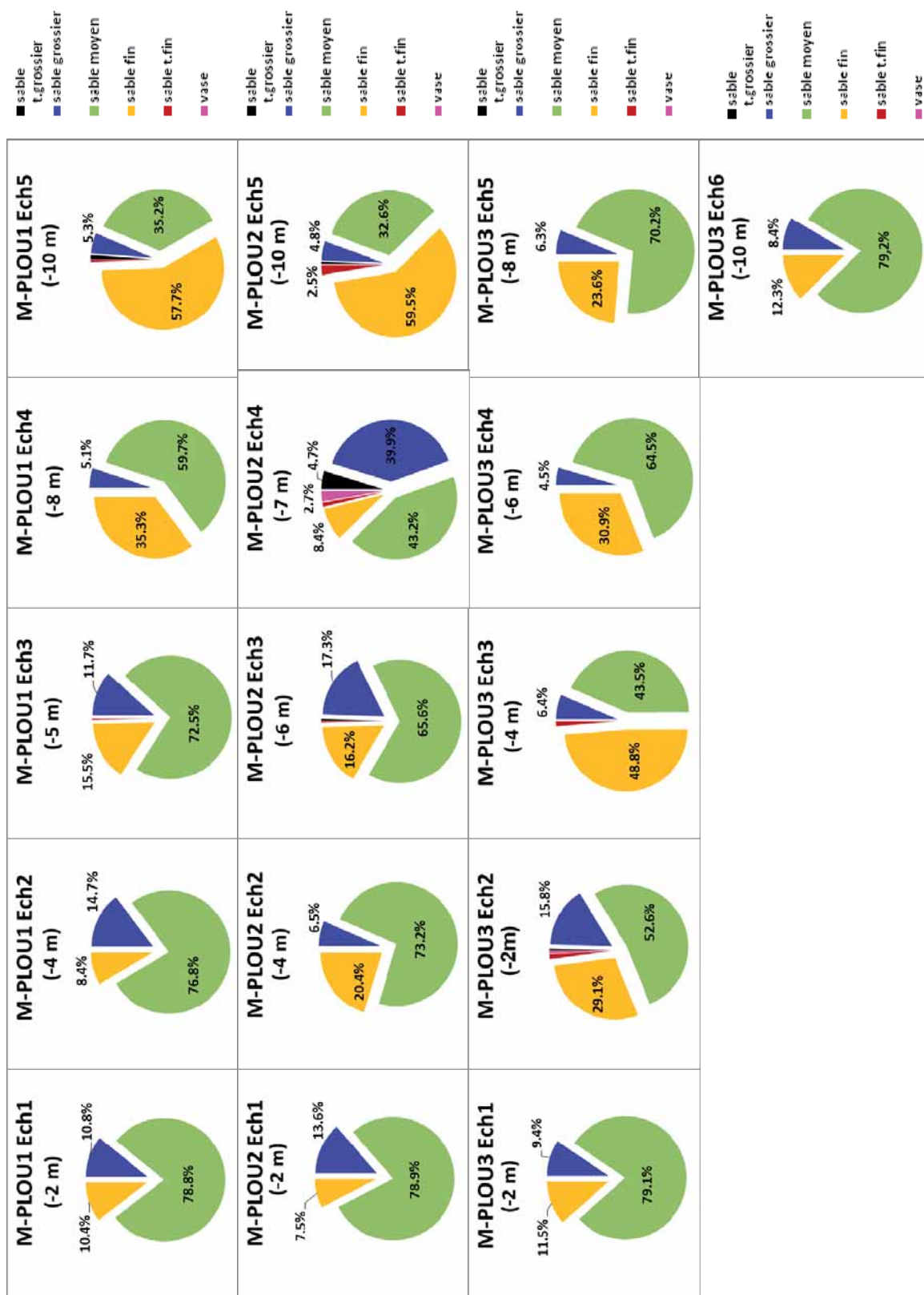


Figure 36. Composition granulométrique des sédiments marins de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

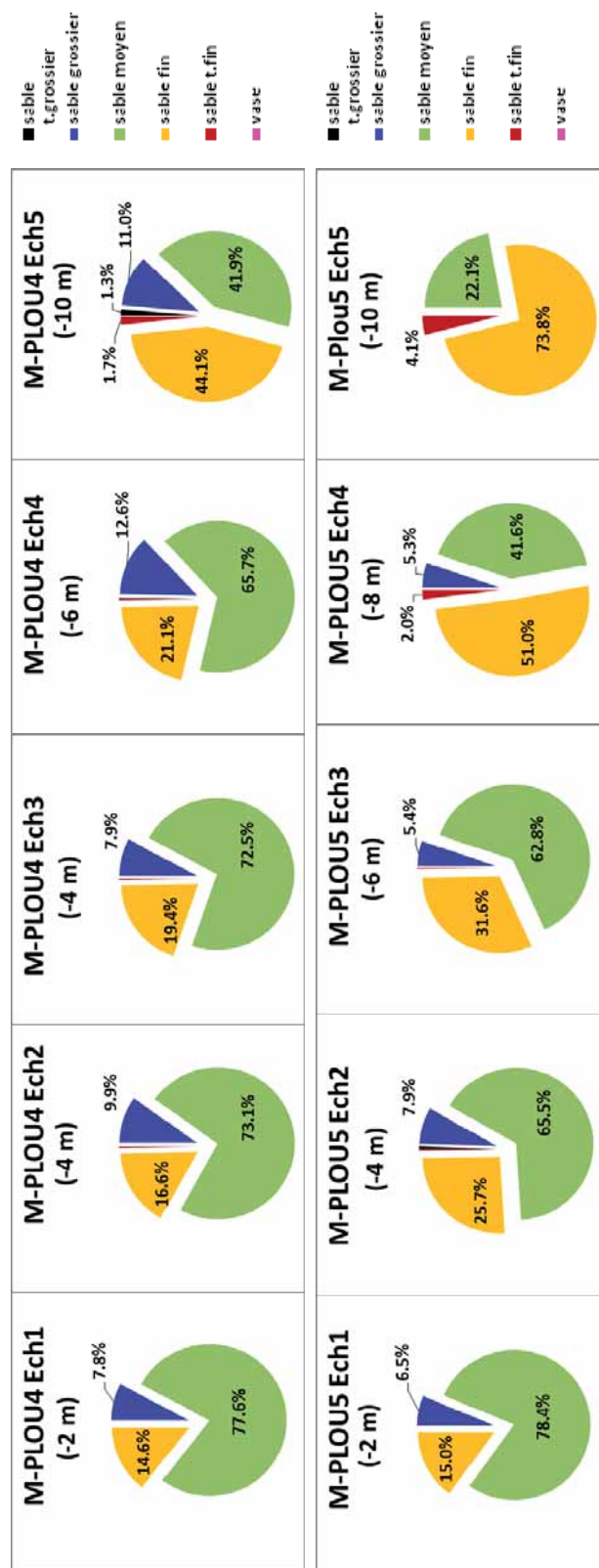


Figure 37. Composition granulométrique des sédiments marins de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

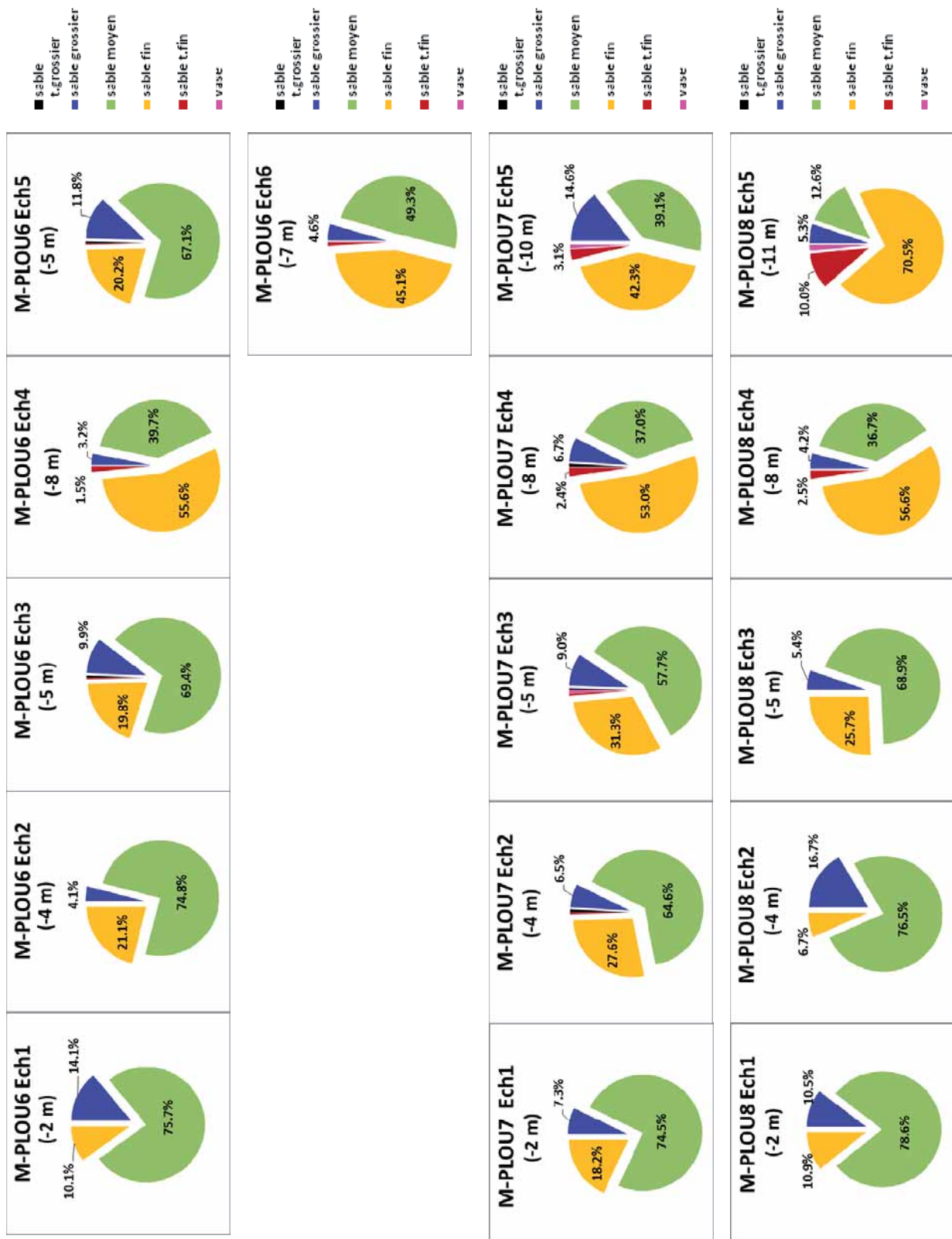


Figure 38. Composition granulométrique des sédiments marins de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

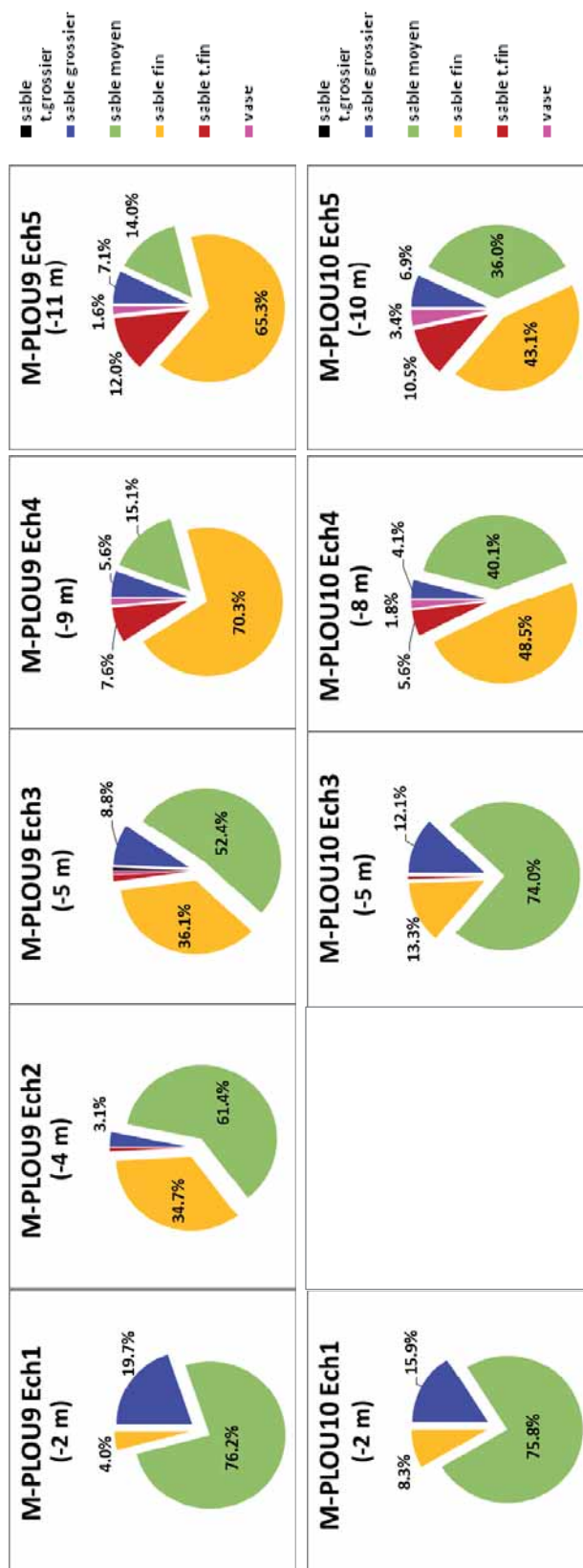


Figure 39. Composition granulométrique des sédiments marins de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

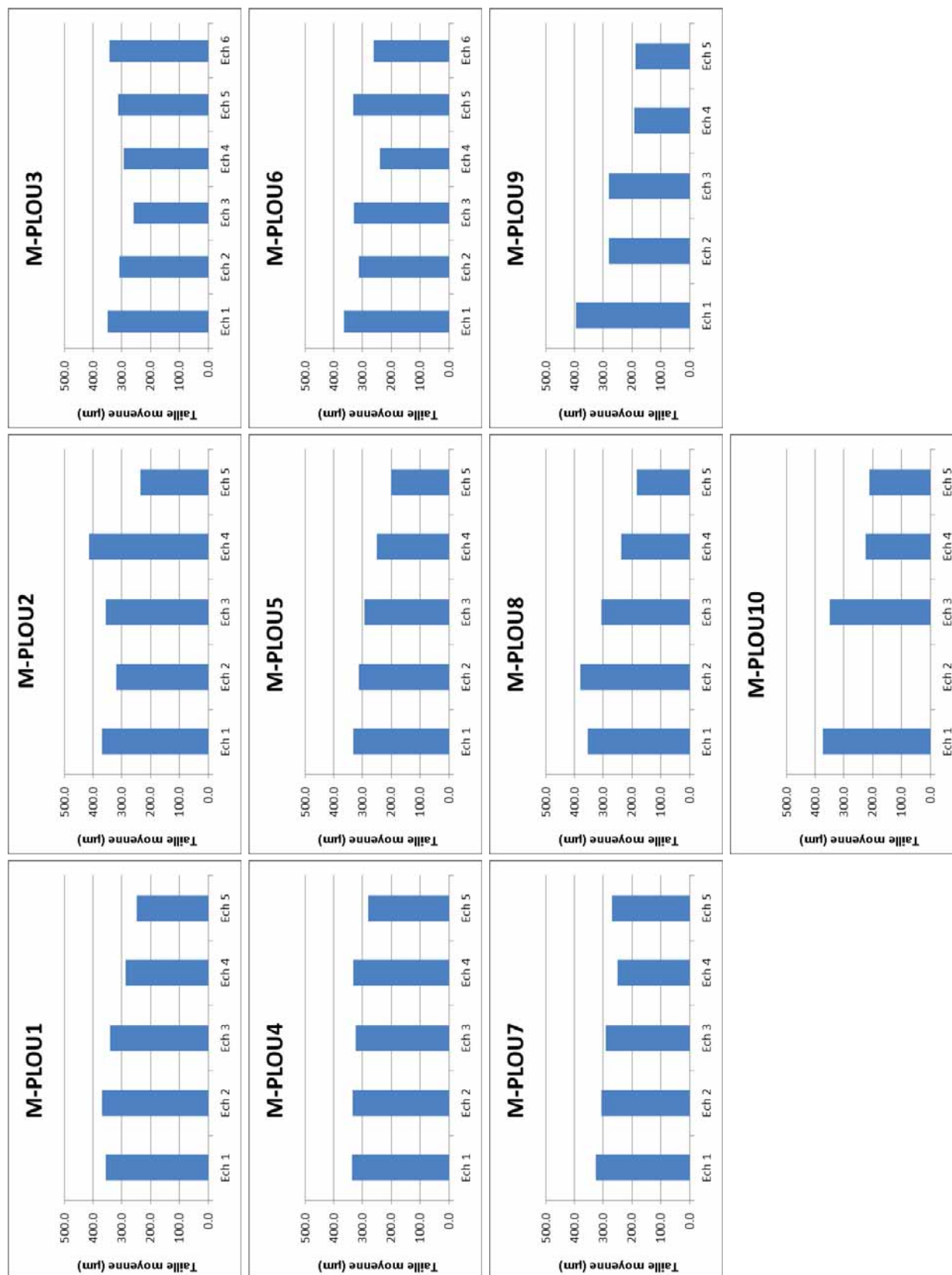


Figure 40. Taille moyenne des sédiments marins de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

4.2.2.2 Cellule hydrosédimentaire de Fatima

4.2.2.2.1 Caractérisation sédimentologique des plages

Les sédiments de cette partie de l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups (figure 6) sont constitués de sables fins à grossiers. Aucune autre classe granulométrique n'est représentée. La répartition des tailles de sédiments autour de la médiane est uniforme, ce qui se reflète par des indices de dispersion représentatifs de sédiments bien classés à très bien classés (indice de Task moyen : 1,27).

Les sédiments de Fatima renferment une proportion plus importante de sable grossier, surtout dans la partie nord, près de la Pointe-aux-Loups où ils peuvent représenter presque la moitié de l'échantillon du bas estran. Dans ce sens, la taille moyenne des sédiments est plus importante que dans la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups. Elle varie de 274 à 463 μm (sable moyen) sur le haut estran et de 297 à 514 μm (sable moyen à grossier) sur le bas estran (figure 43). Les sédiments de plage de Fatima contiennent presque exclusivement du sable moyen. Cette classe granulométrique représente de 68,3 à 82 % du sédiment du haut estran et de 52,1 à 71,1 % du bas estran (figures 41 et 42).

La proportion des sables grossiers diminue en se dirigeant vers le sud-ouest de la cellule, alors que celle des sables fins augmente près du cap de l'Hôpital. En effet, les sables grossiers passent de 31,5 à 4,7 % sur le haut estran et de 47,9 à 8,5 % sur le bas estran. À l'inverse, il n'y a presque pas de sables fins près de la Pointe-aux-Loups et leur volume augmente à l'extrême sud-ouest de la cellule hydrosédimentaire pour atteindre 20 %, en moyenne, près du cap (figures 41 et 42). Il est possible que le sable fin à proximité du cap de l'Hôpital soit le produit de l'érosion de la falaise qui comporte à son sommet une unité de sable très fin (Pierre et Bernatchez, 2009). Le même scénario est envisageable pour expliquer la forte proportion de sable grossier à proximité de Pointe-aux-Loups, puisque l'on trouve au sommet de la falaise dans ce secteur une unité de sédiments grossiers. Un apport de la zone sous-marine en raison de dépôts grossiers dans la zone pré littorale dans le secteur de Pointe-aux-Loups est aussi envisageable.

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

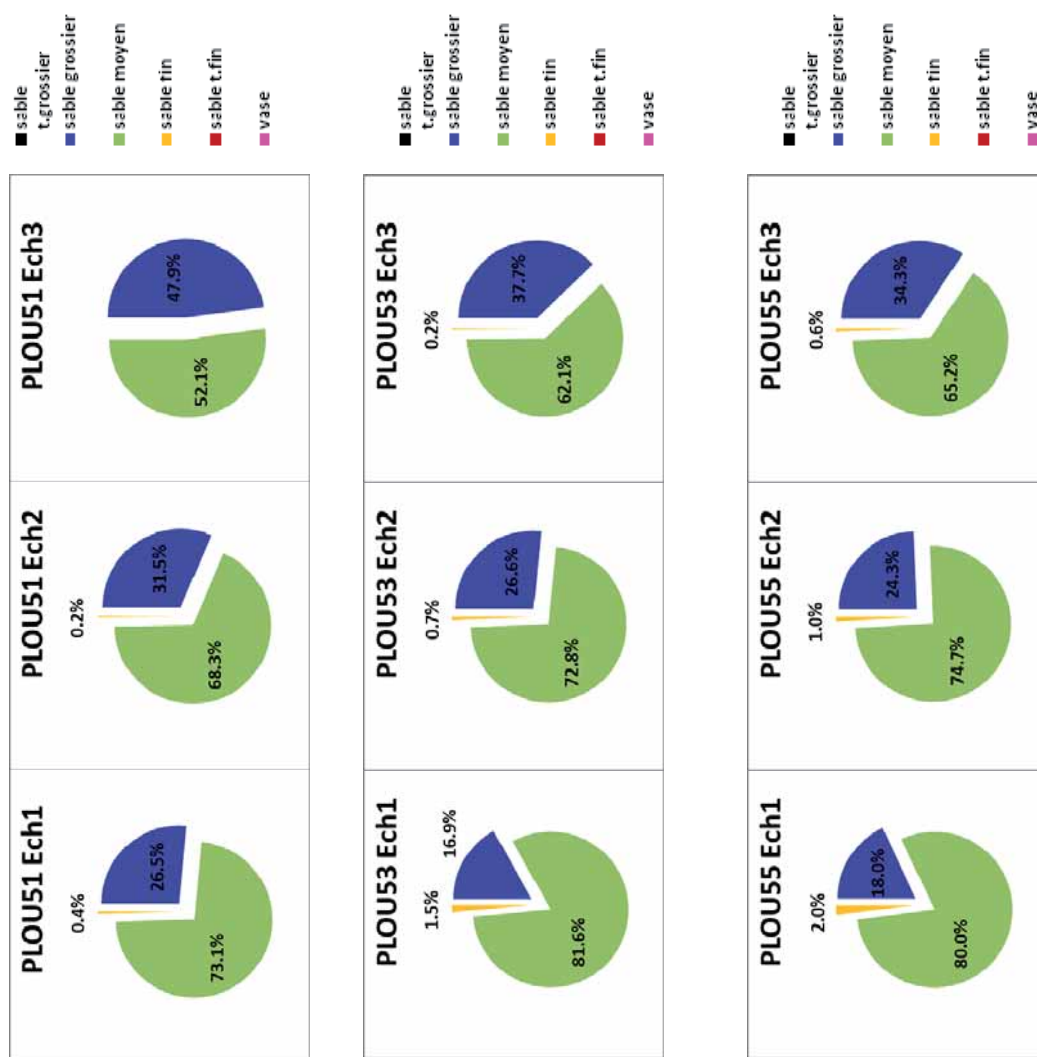


Figure 41. Composition granulométrique moyenne des sédiments de la cellule hydrosédimentaire de Fatima

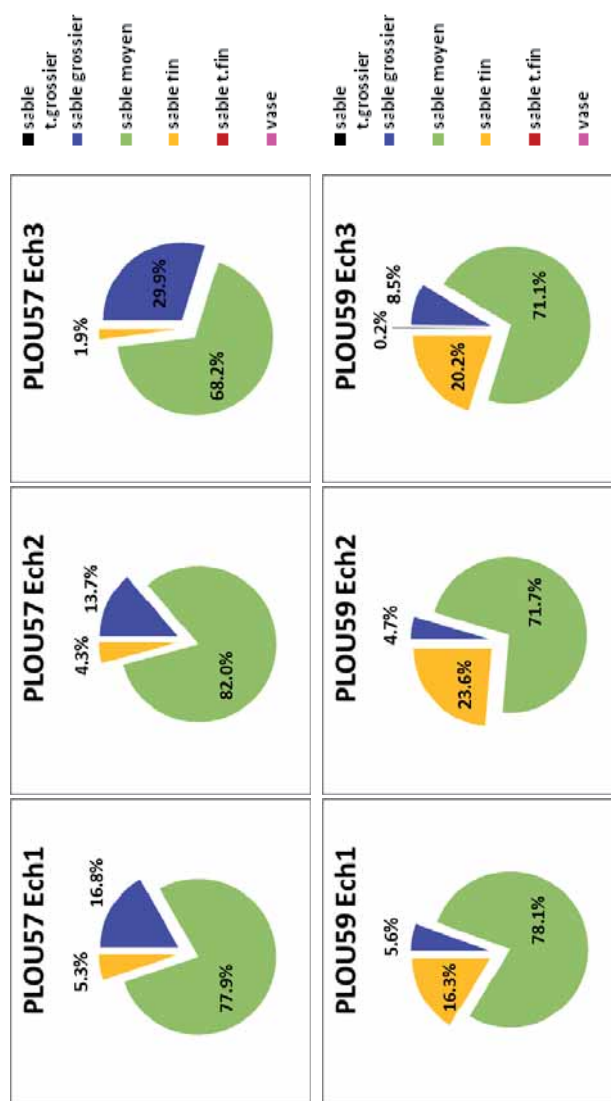


Figure 42. Composition granulométrique moyenne des sédiments de la cellule hydrosédimentaire de Fatima

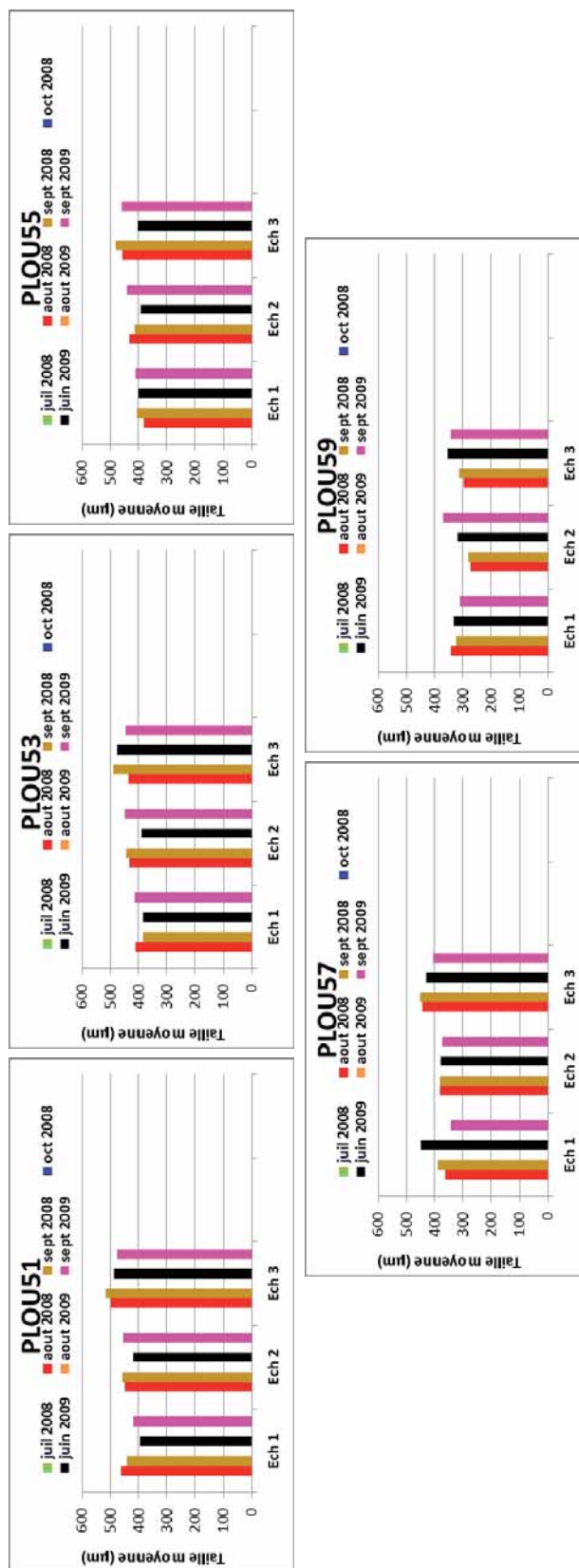


Figure 43. Évolution temporelle de la taille moyenne des sédiments de plage de la cellule hydrosédimentaire de Fatima

4.2.2.2 Caractérisation sédimentologique de la zone pré littorale

Les sédiments marins de la cellule hydrosédimentaire de Fatima mesurent en moyenne de 110,7 à 483,3 μm (283,8 μm , en moyenne : sable moyen) (figure 47) et sont constitués à plus de 83 % de sable (figures 44 à 46). Il est à noter que plus de la moitié des échantillons de cette cellule (56,8 %) sont exclusivement constitués de sable. En effet, la vase ne représente que 1,4 % en moyenne, mais peut exceptionnellement représenter de plus grandes proportions (16,4 % des sédiments de l'échantillon 5 provenant de la radiale M-PLOU20) (figure 44 à 46).

Globalement, les échantillons prélevés dans cette cellule ont une composition granulométrique semblable à celle trouvée dans la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups, avec une prédominance de sable moyen (59,8 à 81,8 %) jusqu'à 5 m de profondeur (échantillons 1 à 3) et une nette augmentation du pourcentage de sable fin pouvant atteindre jusqu'à 80,2 % au-delà de 5 m de profondeur (échantillons 4 à 6). Ce granoclassement vers le sable plus grossier à partir de 5 m de profondeur en direction de la côte s'explique par le fait que, à partir de cette profondeur, l'effet de la houle sur le fond marin se fait grandement sentir.

Les échantillons prélevés aux extrémités de la cellule (radiales M-PLOU11, 19 et 20) ne présentent pas la même distribution granulométrique. Dans la radiale M-PLOU11, située à l'extrémité nord de la cellule, les sables moyens prédominent largement (62,9 à 77,8 %). Seul l'échantillon 6 présente une prédominance de sable fin (47,6 %). L'augmentation rapide de la profondeur n'a pas permis d'échantillonner les sédiments plus au large, ce qui pourrait expliquer les fortes proportions de sable moyen, même au-delà de 5 m de profondeur (échantillons 4 et 5).

Au contraire, dans la radiale M-PLOU19 située au sud de la cellule, le sable fin représente la plus grande proportion sédimentaire des échantillons 2 à 6 (51,7 à 69,9 %). Seul l'échantillon 1 montre une prédominance de sable moyen (65,8 %). Il importe également de noter le pourcentage élevé de sable très fin (33,6 %) contenu dans l'échantillon 6.

Dans la radiale M-PLOU20, située près du cap de l'Hôpital, les échantillons 4 et 5, prélevés à 8 et 11 m de profondeur, présentent une grande variabilité de la taille granulométrique. En effet, les différentes classes granulométriques affichent des pourcentages faibles à moyens variant de 1,1 à 35,2 %.

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

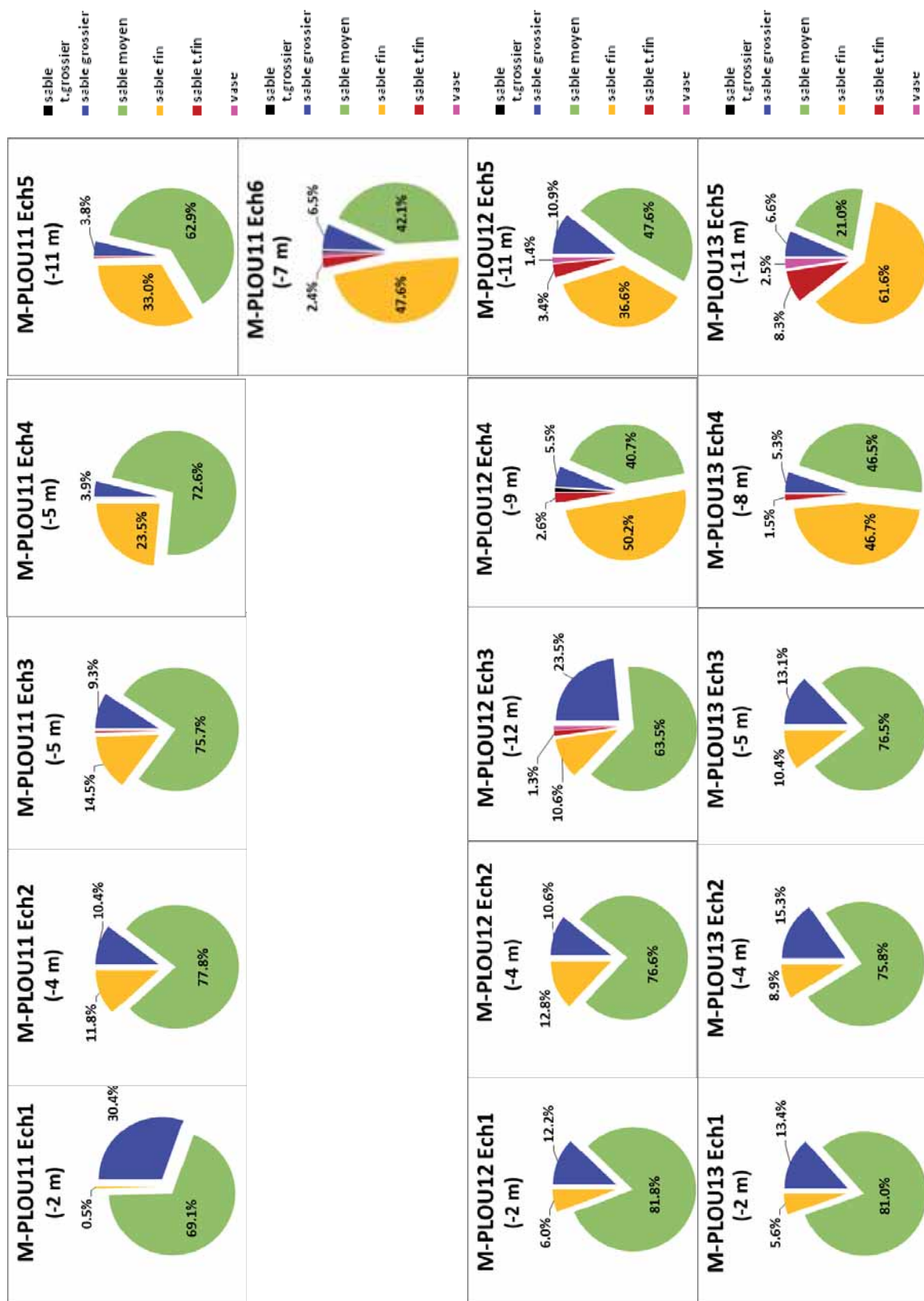


Figure 44 : Composition granulométrique des sédiments marins de la cellule hydrosédimentaire de Fatima

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.



Figure 45. Composition granulométrique des sédiments marins de la cellule hydrosédimentaire de Fatima

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 100 ÎLES-DE-LA-MADELEINE

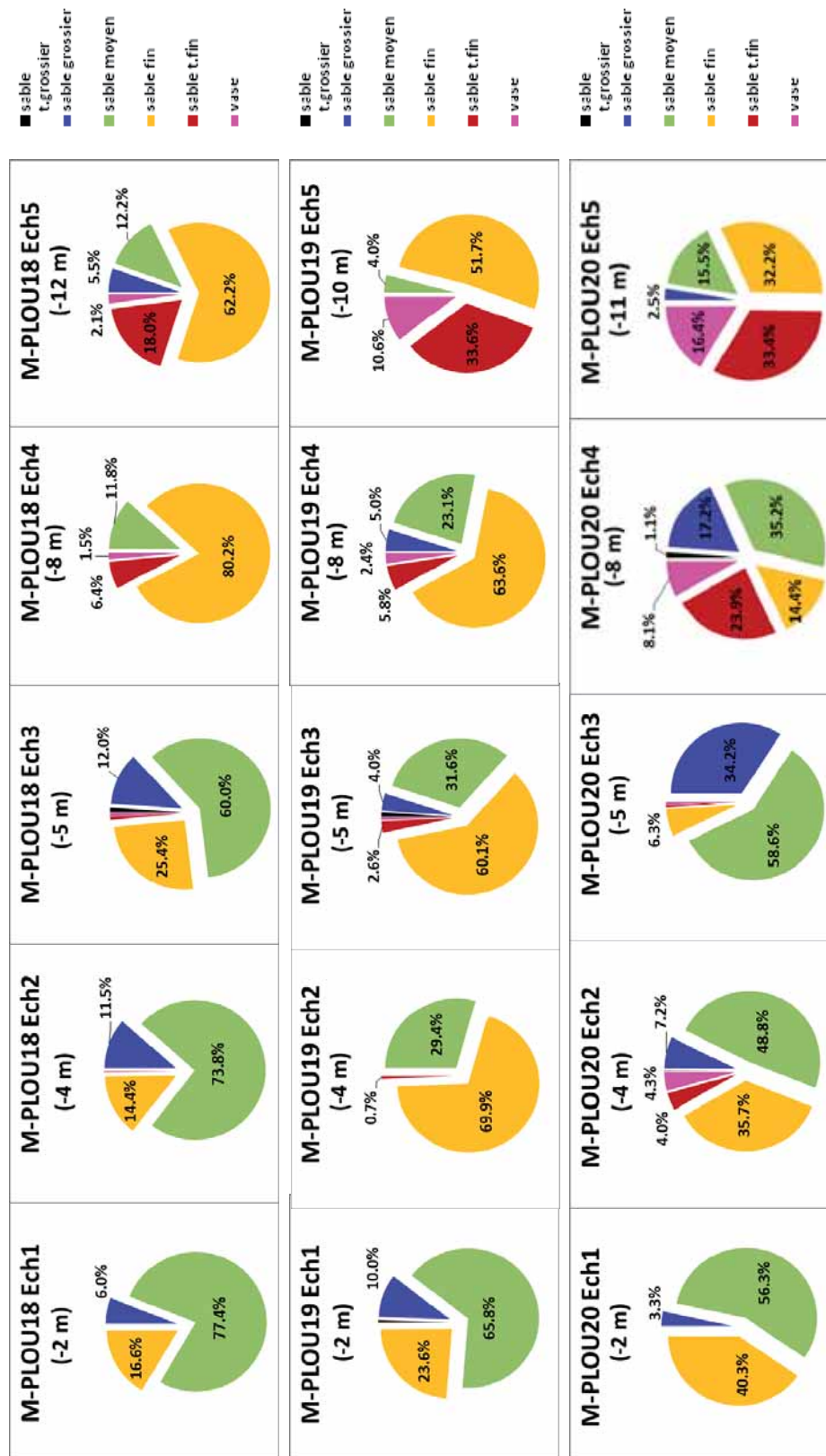


Figure 46. Composition granulométrique des sédiments marins de la cellule hydrosédimentaire de Fatima

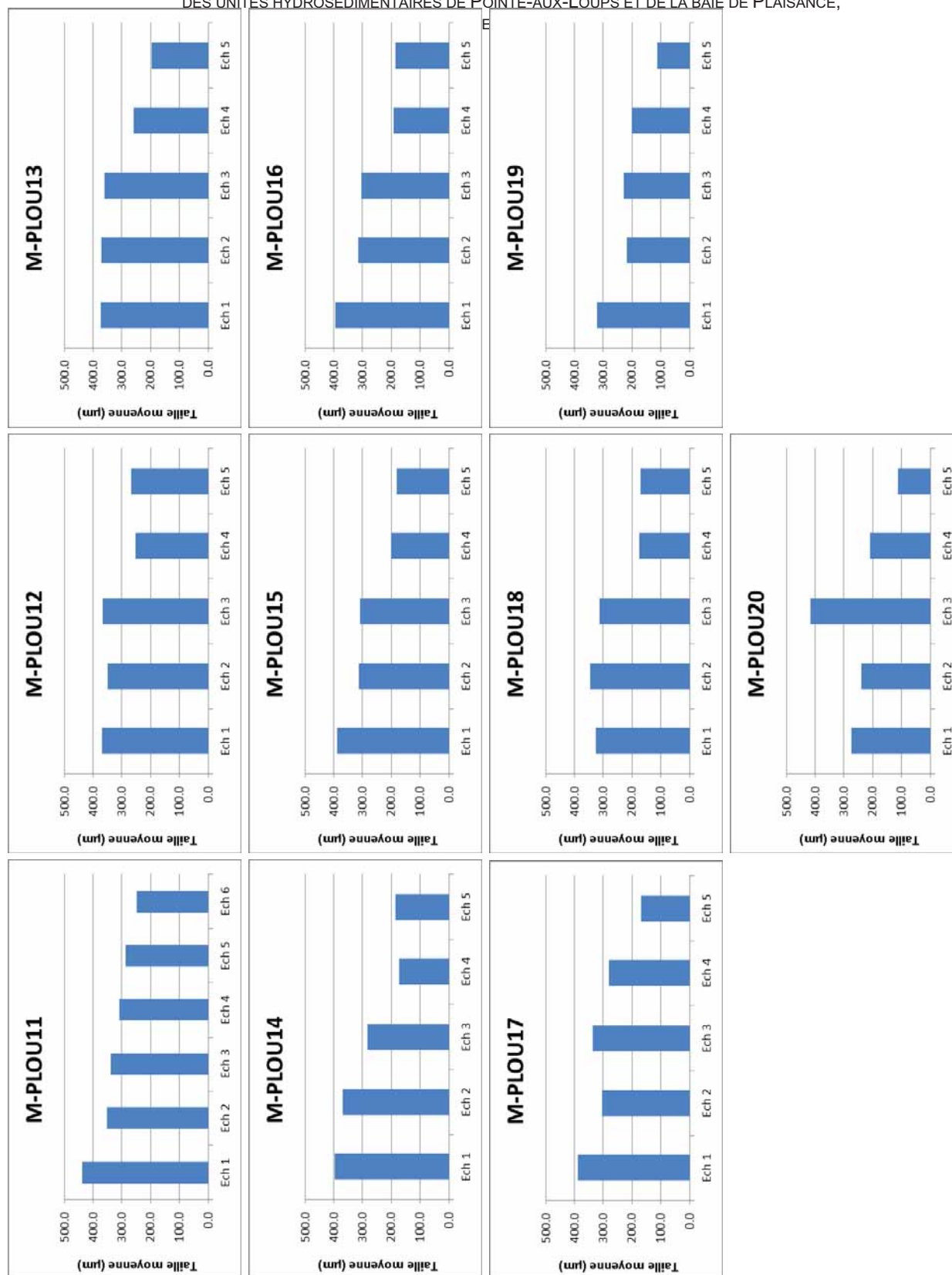


Figure 47. Taille moyenne des sédiments marins de la cellule hydrosédimentaire de Fatima

5. Évolution historique et récente de la côte (1963-2009)

5.1 Évolution historique (1963-2008)

La compréhension de l'évolution historique de la côte est une étape importante dans la connaissance de celle-ci et permet ainsi de déceler différents paramètres qui influencent sa dynamique. Ce type d'analyse permet aussi de mieux quantifier les effets des processus à long terme, dont les perturbations anthropiques.

5.1.1 Évolution côtière de l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance

Le bilan global de l'évolution côtière pour l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance est positif, avec une accumulation moyenne de 0,57 m/an. Tous les intervalles étudiés ont un taux global positif variant de 0,44 à 1,02 m/an. Cependant, les taux de migration changent le long de la côte et varient d'une accrétion locale de 6,00 m/an dans le secteur de l'ancien goulet à une érosion qui peut atteindre plus de 4 m à plusieurs endroits le long du tombolo, avec une valeur maximale de -4,39 m/an (figure 48, 49 et 50).

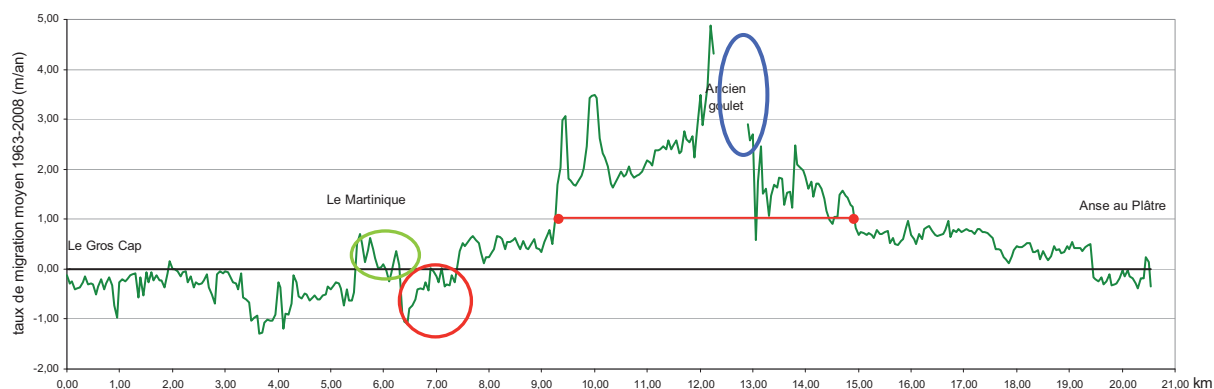


Figure 48. Taux de migration de la ligne de rivage (1963-2008) pour l'unité de la baie de Plaisance

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDOSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

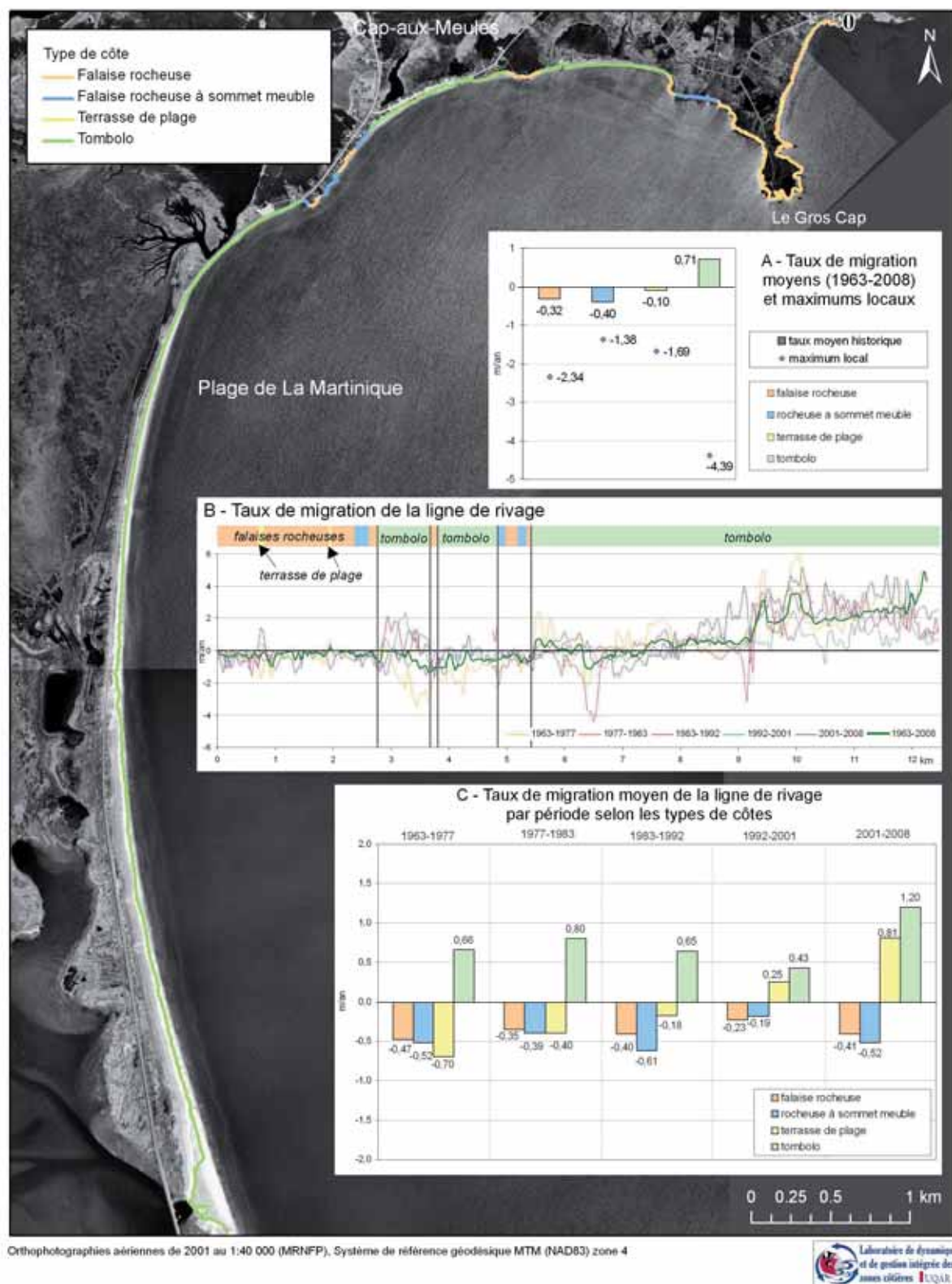


Figure 49. Évolution côtière historique du secteur de La Martinique

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

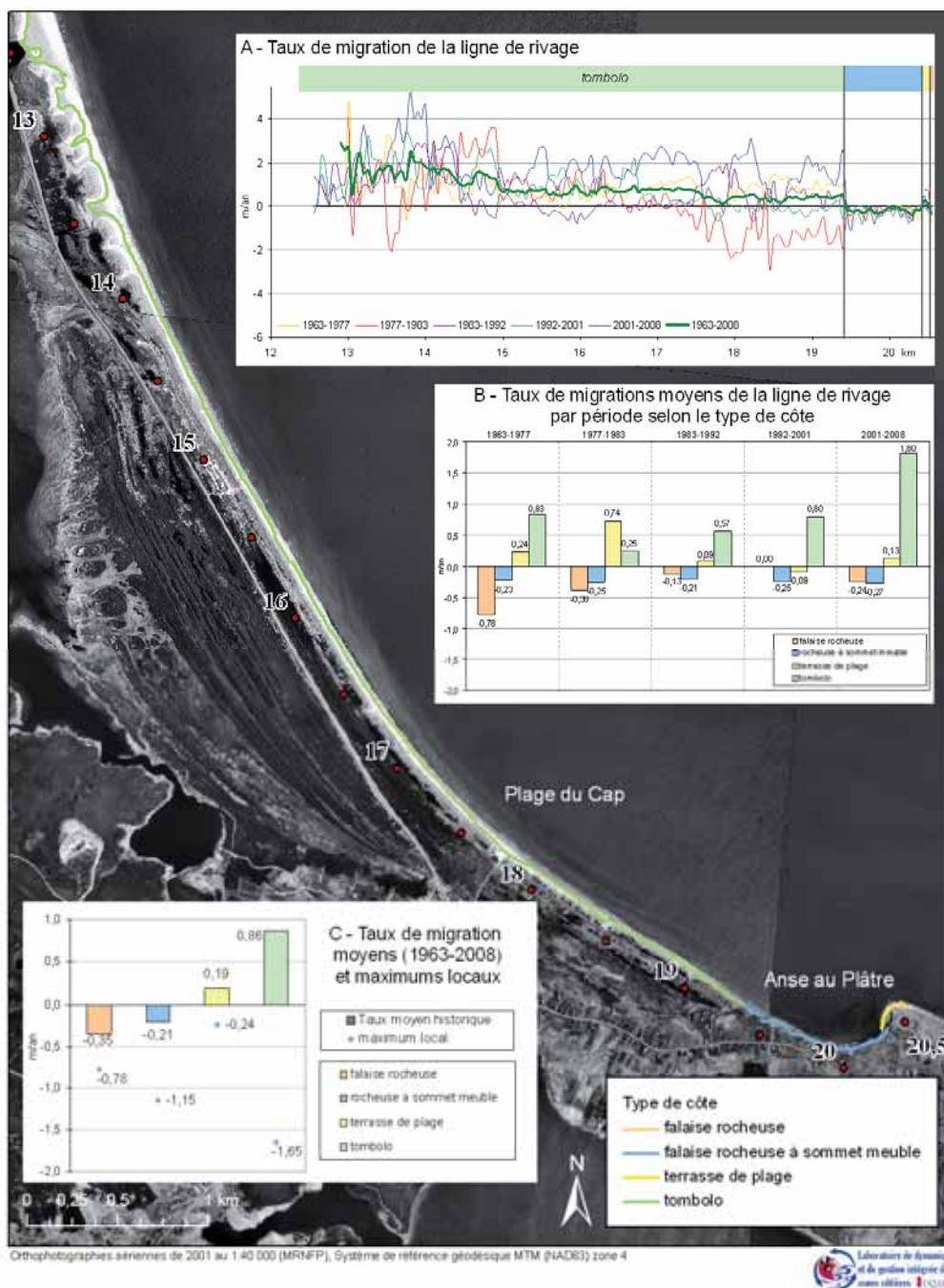


Figure 50. Évolution côtière historique du secteur du Cap La dynamique d'évolution du littoral est différente selon les types de côtes (tableau 7 et figure 51)

Tableau 7. Taux de migration de la ligne de rivage par période et par type de côte (m/an)

Type de côte	1963-2008	1963-1977	1977-1983	1983-1992	1992-2001	2001-2008
falaise rocheuse	-0,32	-0,48	-0,35	-0,40	-0,22	-0,40
rocheuse à sommet meuble	-0,28	-0,33	-0,29	-0,36	-0,22	-0,36
terrasse de plage	0,02	-0,32	0,06	-0,07	0,12	0,54
tombolo	0,84	0,77	0,57	0,68	0,60	1,42
TOTAL	0,57	0,50	0,39	0,44	0,44	1,02

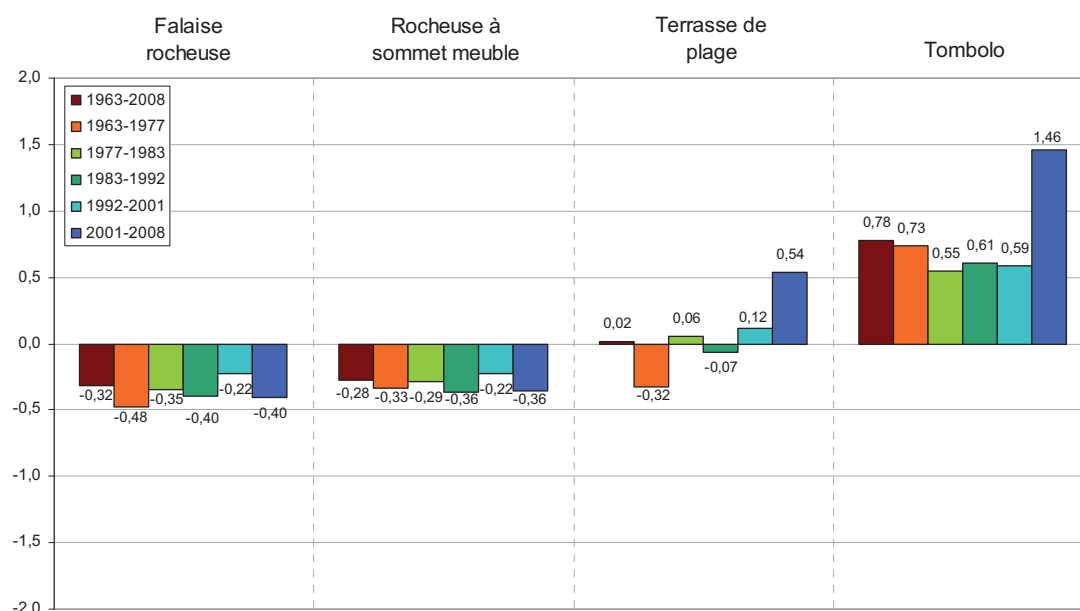


Figure 51. Taux de migration par type de côte selon les périodes

5.1.1.1 Côtes à falaises rocheuses à sommet meuble

Dans les falaises rocheuses à sommet meuble, le taux moyen d'érosion de la ligne de rivage de 1963 à 2008 est de $-0,28$ m/an. Les taux d'érosion des falaises rocheuses à sommet meuble varient de minimums locaux de $0,00$ (avec plusieurs $-0,01$), indiquant une stabilité de la falaise, à un maximum local de $-1,38$ m/an (de 1963 à 1977). On constate des taux locaux similaires (> 1 m/an) pour plusieurs autres périodes (1983 à 1992 et 2001 à 2008). Les périodes d'érosion les plus intenses sont celles de 1983 à 1992 et de 2001 à 2008, avec une valeur moyenne de $-0,36$ m/an. La période d'érosion la moins intense est celle de 1992 à 2001, avec une valeur moyenne de $-0,22$ m/an.

5.1.1.2 Côtes à falaises rocheuses

Pour les falaises rocheuses, le taux moyen d'évolution de 1963 à 2008 est de $-0,35$ m/an (tableau 7), avec des minimums locaux de 0 (plusieurs périodes

comportant de nombreuses mesures de $-0,01$) et un recul local maximum de $-2,34$ m/an (de 1963 à 1977). La période qui a connu l'érosion la plus intense est celle de 1963 à 1977, avec une moyenne de $-0,48$ m/an, suivi de près par les périodes de 1983 à 1992 et de 2001 à 2008, avec une valeur moyenne de $-0,40$ m/an. La période qui a connu l'érosion la moins intense est encore celle de 1992 à 2001, avec une moyenne de $-0,22$ m/an.

5.1.1.3 Côtes à terrasse de plage

Sur les côtes à terrasse de plage, le taux de migration moyen est relativement faible avec un bilan montrant une légère accumulation de $0,02$ m/an de 1963 à 2008 (tableau 7). Les valeurs varient entre une érosion locale maximum de $-1,69$ m/an (1963 à 1977) et une accumulation locale de $1,36$ m/an (2001 à 2008). La période d'érosion la plus intense est celle de 1963 à 1977, avec une moyenne de $-0,32$ m/an, et la période la moins intense est 2001-2008, avec une accumulation moyenne de $0,54$ m/an.

5.1.1.4 Côtes à tombolo

Les côtes à tombolo sont les plus importantes pour ce secteur d'étude ($77,2$ % des côtes). Elles connaissent globalement une accumulation de $0,84$ m/an de 1963 à 2008, mais les valeurs varient de $-4,39$ m/an (érosion locale, de 1977 à 1983) à $6,0$ m/an (accrétion locale, de 1963 à 1977). Les taux d'accumulation importants se trouvent à la confluence des deux dérives littorales convergentes. Ce secteur comprend également l'ancien goulet qui était alors en phase de comblement, d'où cette accumulation massive. La période qui a connu la migration la plus faible est celle de 1977 à 1983, avec une accumulation moyenne de seulement $0,56$ m/an. Durant cette période, la dynamique du secteur de La Martinique et celle du Cap ont été différentes, car, alors que le secteur du Cap connaissait une accrétion faible de $0,25$ m/an, celui de La Martinique connaissait une accumulation moyenne de $0,80$ m/an. La période de 2001 à 2008 a connu une accumulation moyenne de $1,42$ m/an, importante dans les deux secteurs.

De 1963 à 2008, le tombolo de la baie de Plaisance a été en érosion sur seulement $19,9$ % de sa longueur (tableau 8). Selon les périodes, cette proportion varie de $19,3$ % à $35,5$ %. Les périodes ayant une forte proportion de côtes en érosion correspondent à celles où les taux de migration moyens sont les plus faibles (1977 à 1983 et 1992 à 2001) (tableau 7).

Tableau 8. Proportion de côtes à tombolo en érosion ou en accumulation (en %)

État de la côte	1963-2008	1963-1977	1977-1983	1983-1992	1992-2001	2001-2008
érosion	19,9	20,3	35,5	27,9	30,5	19,3
accumulation	80,1	79,7	64,5	72,1	69,5	80,7

Tableau 9. Taux d'érosion et d'accumulation par période (m/an)

Taux de migration moyen	1963-2008	1963-1977	1977-1983	1983-1992	1992-2001	2001-2008
érosion	-0,50	-1,16	-0,97	-0,52	-0,27	-0,47
accumulation	1,17	1,26	1,46	1,15	0,99	1,89

5.1.2 Évolution côtière de l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

Le secteur de Pointe-aux-Loups est constitué d'une unité hydrosédimentaire qui peut être subdivisée en deux cellules, soit celle de Fatima, au sud de l'île de la Pointe aux Loups, et celle de Pointe-aux-Loups, au nord (figure 22).

Les taux de migration globaux de ce secteur de côte sont négatifs (érosion) pour toutes les périodes de mesures et varient de -0,44 m/an à -1,36 m/an, avec une moyenne pour l'ensemble des périodes s'établissant à -0,71 m/an. De plus, les taux d'érosion moyens sont négatifs pour presque tous les types de côtes, sauf pour les terrasses de plages et les côtes dunaires à base rocheuse (pour certaines périodes). La presque totalité de la côte a subi l'érosion à long terme (94 % de 1963 à 2008). Cette tendance globale d'évolution négative est visible dans les figures 52, 53 et 54.

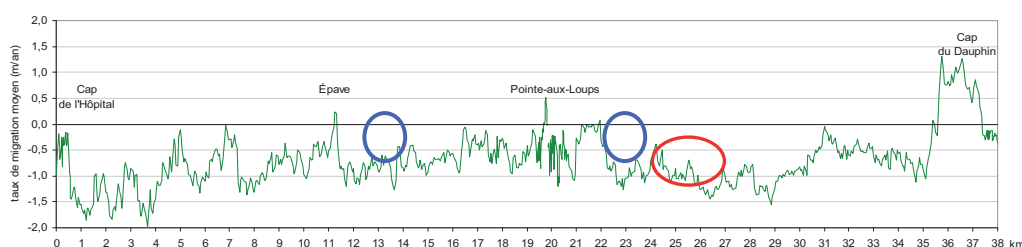


Figure 52. Taux de migration de la ligne de rivage (1963-2008) pour l'unité de Pointe-aux-Loups

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

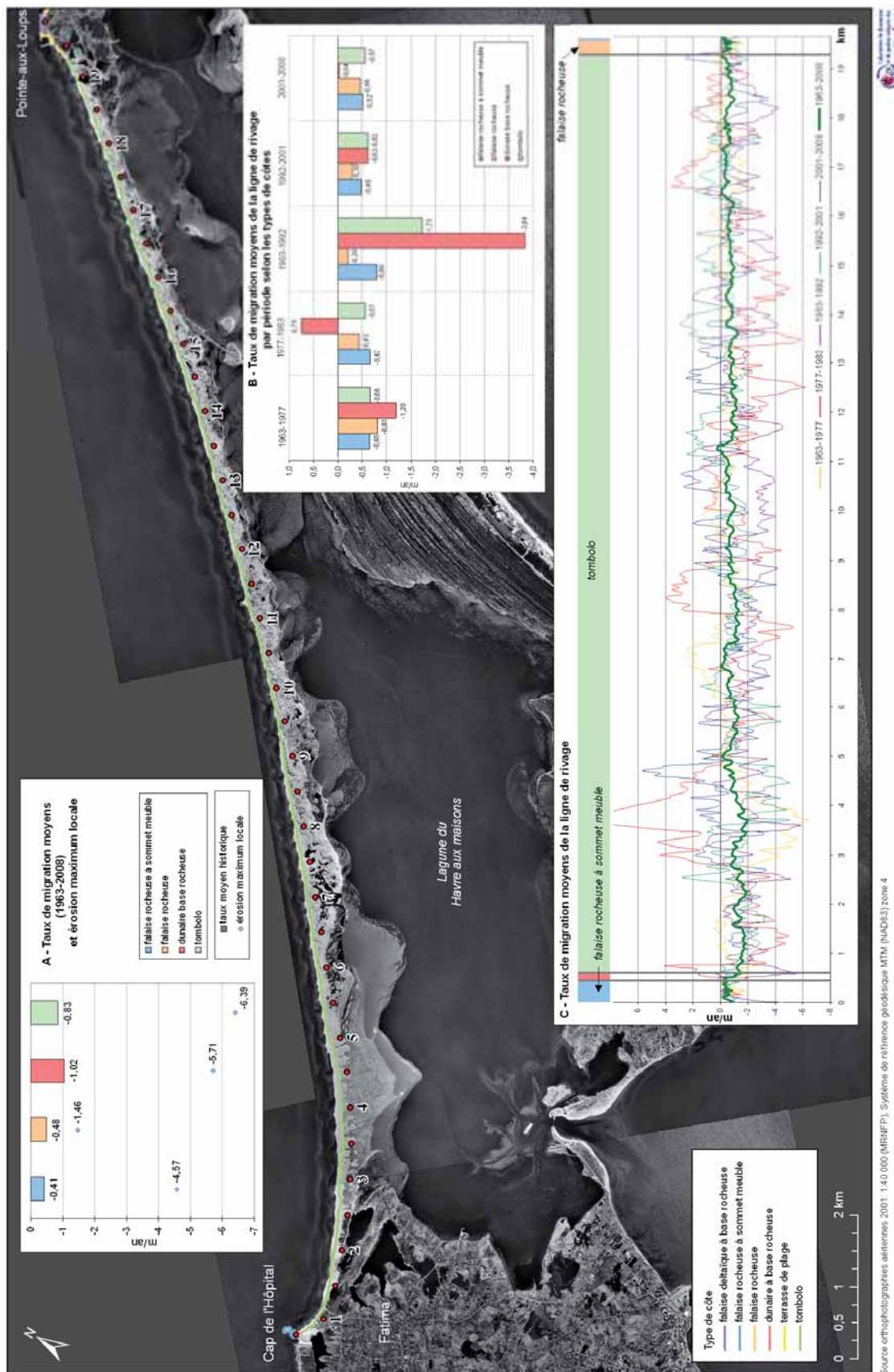


Figure 53. Évolution côtière historique de la cellule hydrosédimentaire de Fatima

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

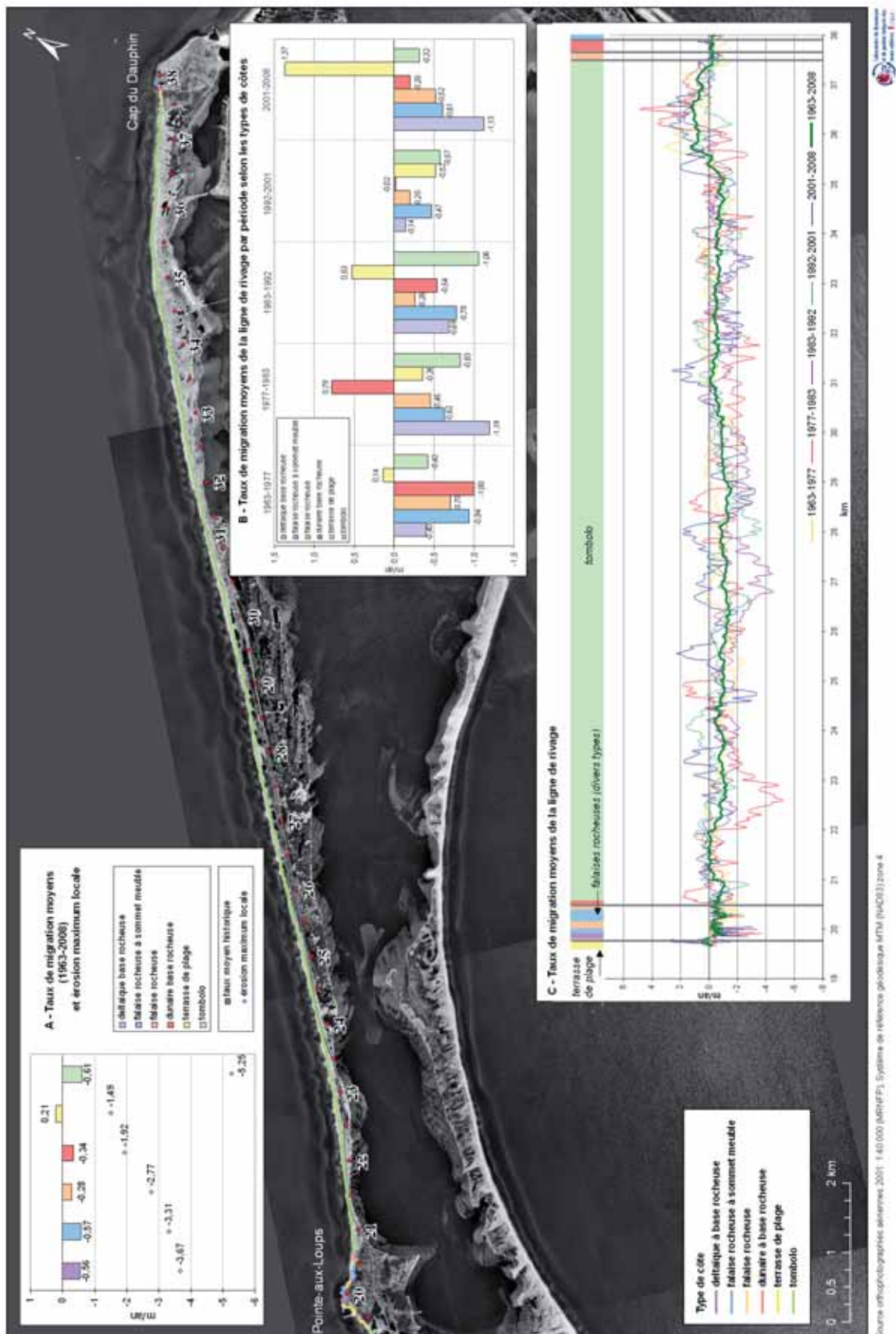


Figure 54. Évolution côtière historique de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

La dynamique d'évolution de la côte est différente selon les types de côtes (tableau 10 et figure 55), car les processus impliqués sont, notamment, dépendants de la hauteur des côtes et du type de lithologie.

Tableau 10. Taux de migration de la côte par période et par type de côte (m/an)

Type de côte	1963-2008	1963-1977	1977-1983	1983-1992	1992-2001	2001-2008
deltaïque base rocheuse	-0,56	-0,40	-1,19	-0,69	-0,14	-1,13
rocheuse sommet meuble	-0,49	-0,81	-0,64	-0,79	-0,48	-0,56
falaise roche	-0,35	-0,74	-0,44	-0,23	-0,24	-0,50
dunaire base rocheuse	-0,55	-1,06	0,77	-1,41	-0,20	-0,15
terrasse de plage	0,21	0,14	-0,36	0,53	-0,52	1,37
tombolo	-0,73	-0,54	-0,69	-1,41	-0,60	-0,45
TOTAL	-0,71	-0,56	-0,67	-1,36	-0,58	-0,44

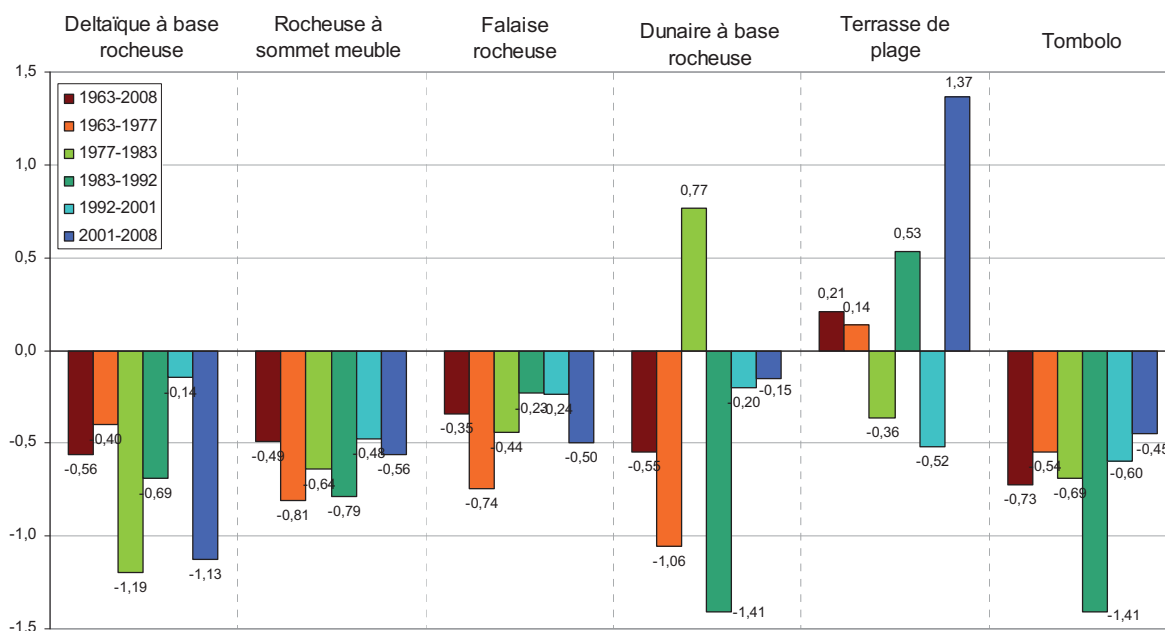


Figure 55. Taux de migration par type de côte selon les périodes

5.1.2.1 Côtes deltaïques à base rocheuse

Dans ces falaises, le taux d'érosion moyen est de 0,56 m/an et varie d'un minimum local de -0,06 à un maximum local de -3,67. Ce dernier taux est dû à un glissement de terrain dans la partie supérieure meuble de la falaise, ce qui a créé une encoche (figure 56). La période d'érosion la plus intense est celle de 1977 à 1983, avec un taux moyen de -1,19 m/an, et le taux maximum se situe dans cette période. Cette dernière est suivie de très près par celle

de 2001 à 2008, avec un recul moyen de $-1,13$. La période d'érosion la moins intense est celle de 1992 à 2001, avec un taux moyen de $-0,14$ m/an.

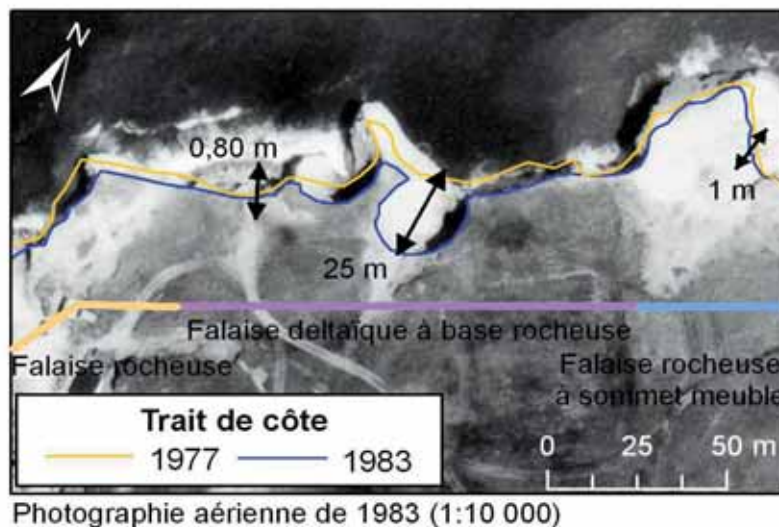


Figure 56. Secteur du taux d'érosion maximum de la pointe aux Loups

5.1.2.2 Côtes à falaises rocheuses à sommet meuble

Le taux d'érosion moyen des falaises rocheuses à sommet meuble est de $-0,49$ m/an et varie d'un minimum local de $0,00$ (avec plusieurs mesures locales à $-0,01$) à un maximum local de $-4,57$ m/an (de 1983 à 1992). Ce maximum local d'érosion est dû au creusement d'un chenal d'accès du côté ouest du cap de l'Hôpital, qui a provoqué une très forte érosion des falaises environnantes. Des taux d'érosion similaires (de -2 à $-3,3$ m/an) sont observés dans des secteurs non affectés par les modifications anthropiques à la suite d'une érosion soudaine et intense de la partie superficielle meuble des falaises, comme cela peut se produire pour les falaises deltaïques à base rocheuse. Les périodes d'érosion les plus intenses sont de 1963 à 1977 et de 1983 à 1992, avec des taux moyens respectifs de $-0,81$ et $-0,79$ m/an. La période d'érosion la moins intense est celle de 1992 à 2001, avec un taux d'érosion moyen de $-0,46$ m/an.

5.1.2.3 Côtes à falaises rocheuses

Dans les falaises rocheuses, le taux d'érosion moyen est de $-0,35$ m/an, avec un minimum local de 0 (avec plusieurs mesures locales à $-0,01$ m/an) et un maximum local de $-2,77$ m/an, mesuré de 2001 à 2008. La période d'érosion la plus intense est celle de 1963 à 1977, avec un taux moyen de $-0,74$ m/an, suivie de près par la période de 2001 à 2008 ($-0,50$ m/an), alors que la période la moins intense est celle de 1992 à 2001, avec un taux moyen

de $-0,22$ m/an. Dans les falaises rocheuses, le sapement basal provoque des encoches profondes formant des surplombs qui finissent par s'effondrer soudainement. Les mouvements de masse dans la partie superficielle meuble des falaises ou dans les falaises d'argilite peuvent aussi créer un recul « instantané » très important, alors que les secteurs environnants n'ont évolué que de quelques centimètres à peine par année. Dans ces secteurs, il n'y a aucune accumulation, mais l'érosion se produit par à-coups dans le temps et dans l'espace (figure 57).

5.1.2.4 Côtes dunaires à base rocheuse

Les côtes dunaires à base rocheuse ont un taux de migration moyen sur 45 ans de $-0,55$ m/an, avec un minimum local de $-5,71$ m/an de 1983 à 1992 et un maximum local de $1,71$ m/an de 1977 à 1983. Leur dynamique suit celle d'un système de côtes meubles (malgré une base rocheuse) et peut donc connaître une accrétion. La période d'érosion la plus intense est d'ailleurs celle de 1983 à 1992, avec une moyenne de $-1,41$ m/an, alors que la période précédente (1977 à 1983) est la moins intense avec une accrétion moyenne de $0,77$ m/an. Ces deux taux opposés sont principalement dus à un cycle d'accumulation suivi d'une érosion importante dans le secteur du cap de l'Hôpital.

5.1.2.5 Côtes à terrasse de plage

Dans les côtes à terrasse de plage, le taux moyen de migration est de $0,21$ m/an, avec un taux local minimum de $-1,49$ m/an (1992 à 2001) et un taux local maximum de $2,7$ m/an (2001 à 2008). La période d'érosion la plus intense est celle de 1992 à 2001, avec une moyenne de $-0,52$ m/an. À l'inverse, la période d'accumulation la plus intense est celle de 2001 à 2008, avec $1,37$ m/an. Il faut cependant noter que le segment de terrasse de plage de Pointe-aux-Loups est un secteur dont les données doivent être examinées avec attention étant donné qu'il est situé entre les deux jetées du port de Pointe-aux-Loups (la jetée est a été construite avant 1963 et la jetée ouest en 1984) : la dynamique sédimentaire naturelle en est donc modifiée. De plus, depuis quelques années, les sédiments dragués au quai sont temporairement déposés sur cette plage, ce qui peut favoriser son accrétion et la progradation de la terrasse de plage. Enfin, la longueur de ce segment de terrasse de plage est seulement de 139 m (moins de $0,6$ %).

5.1.2.6 Côtes à tombolo

Les côtes à tombolo sont les côtes les plus courantes dans ce secteur ($92,5$ % de la longueur totale de côte). Le taux moyen de migration y est de $-0,73$ m/an, avec un taux maximum de recul local de $-6,39$ m/an

(1963 à 1977) et un taux d'accrétion maximum local de 9,34 m/an (1977 à 1983). Ces extrêmes peuvent s'expliquer par le fait que des brèches de tempêtes peuvent survenir rapidement à la suite d'un seul événement érosif, d'où la constatation d'une érosion locale importante. Par la suite, lors de la reconstruction des dunes, une accrétion très importante a lieu, faisant avancer vers la mer la ligne de rivage. La période d'érosion la plus intense est celle de 1983 à 1992, avec un taux moyen de $-1,41$ m/an : 88,1 % de la longueur de la côte était alors en érosion. La période d'érosion la moins intense est celle de 2001 à 2008, avec un taux de migration moyen de $-0,45$ m/an et 33,1 % des côtes affichant une accumulation. Comme en témoignent les moyennes globales de 1963 à 2008, le bilan est négatif et 94 % des côtes à tombolo ont subi, à long terme, de l'érosion (tableau 11), ce qui reflète une dynamique globale de déficit sédimentaire. De plus, les taux d'érosion moyens des tombolos sont plus importants ($-0,82$ m/an) que les taux d'accrétion (0,68 m/an) (tableau 12). Cette différence est constatée également pour toutes les périodes, sauf pour celle de 1977 à 1983 au cours de laquelle les taux sont presque équivalents. Pour toutes les périodes, la proportion de longueurs de côte à tombolo qui affiche une accrétion varie de 11,9 à 33,1 %. Pour chacune des périodes de mesure (sauf de 1983 à 1992), ces proportions sont relativement similaires à ce qui est constaté mondialement pour les plages, avec 70 % d'érosion en moyenne (Bird, 1985). Cependant, à long terme, l'érosion touche 94 % des côtes, ce qui est bien supérieur à la moyenne mondiale.

**Tableau 11. Proportion de côtes
à tombolo sujettes à l'érosion et à l'accrétion (%)**

État de la côte	1963-2008	1963-1977	1977-1983	1983-1992	1992-2001	2001-2008
accumulation	6,0	28,2	29,9	11,9	27,8	33,1
érosion	94,0	71,8	70,1	88,1	72,2	66,9

Tableau 12. Taux d'érosion et d'accumulation pour les tombolos (m/an)

Taux de migration moyen	1963-2008	1963-1977	1977-1983	1983-1992	1992-2001	2001-2008
accumulation	0,68	0,57	1,77	0,64	0,81	1,09
érosion	$-0,82$	$-0,98$	$-1,74$	$-1,69$	$-1,14$	$-1,21$

5.1.3 Synthèse de l'évolution historique

Les deux unités hydrosédimentaires ont connu une évolution historique de leur côte très différente. Alors que l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance a connu une accrétion globale de 0,57 m/an, celle de Pointe-aux-Loups a subi une érosion de $-0,71$ m/an durant la même période (de 1963 à 2008).

Pour ce qui est des falaises rocheuses, les taux moyens sont relativement identiques entre la baie de Plaisance et la Pointe-aux-Loups (respectivement de $-0,32$ m/an et $-0,35$ m/an). Par contre, pour les côtes à tombolo, les taux sont très différents et varient d'une accrétion de $0,78$ m/an dans l'unité de la baie de Plaisance à une érosion de $-0,73$ m/an dans celle de Pointe-aux-Loups. Cette différence provient surtout du fait que l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups est exposée à une fréquence plus élevée de vagues de forte énergie, alors que la baie de Plaisance est davantage protégée. Quant aux falaises, comme elles évoluent en fonction des processus cryogéniques et hydrogéologiques, ces conditions sont globalement similaires pour les deux unités, d'où les valeurs semblables.

L'analyse du rythme d'évolution du littoral permet de faire ressortir non seulement de manière globale, mais aussi à l'échelle locale, des patrons d'évolution de type continu et graduel, en dents de scie ou cycliques. Ces patrons sont conditionnés par des processus naturels, des conditions géomorphologiques particulières ou encore par des perturbations anthropiques. Les causes de ces patrons d'évolution seront traitées au chapitre 7.

5.2 Évolution récente du littoral (2005-2008)

5.2.1 Évolution de la ligne de rivage

Les données sur l'évolution de la ligne de rivage à partir du réseau de suivi de l'érosion (2005 à 2008) indiquent, tout comme pour l'évolution historique (1963 à 2008), une nette différence entre les deux unités hydrosédimentaires. En effet, le taux de recul moyen (2005 à 2008) a été respectivement de $-0,23$ m/an et de $-1,31$ m/an pour les tombolos de l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance et celle de Pointe-aux-Loups. Plus précisément, pour la cellule de Pointe-aux-Loups et celle de Fatima, les valeurs de recul moyennes ont été respectivement de $-1,35$ et de $-1,28$ m/an. La valeur tout de même négative de l'évolution de 2005 à 2008 pour la baie de Plaisance par rapport au bilan positif de l'évolution historique vient surtout du fait que les bornes de la baie de Plaisance sont localisées principalement près des infrastructures où l'érosion est plus élevée (figure 57). Par ailleurs, l'analyse des données de bornes localisées du côté de la lagune de la Grande Entrée a révélé de très fortes valeurs de recul pour un milieu passablement abrité, pouvant atteindre 2 m pour une année (figure 58). Les fortes valeurs ont été enregistrées au nord de l'île de la Pointe aux Loups où le cordon est plutôt étroit et la route 199 longe le littoral marin et la lagune. Même si le milieu est en apparence assez protégé, l'étendue du plan d'eau de la lagune, surtout dans les axes nord-est et sud-ouest, est suffisamment importante pour générer des vagues susceptibles d'éroder la microfalaise sableuse de la lagune.

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

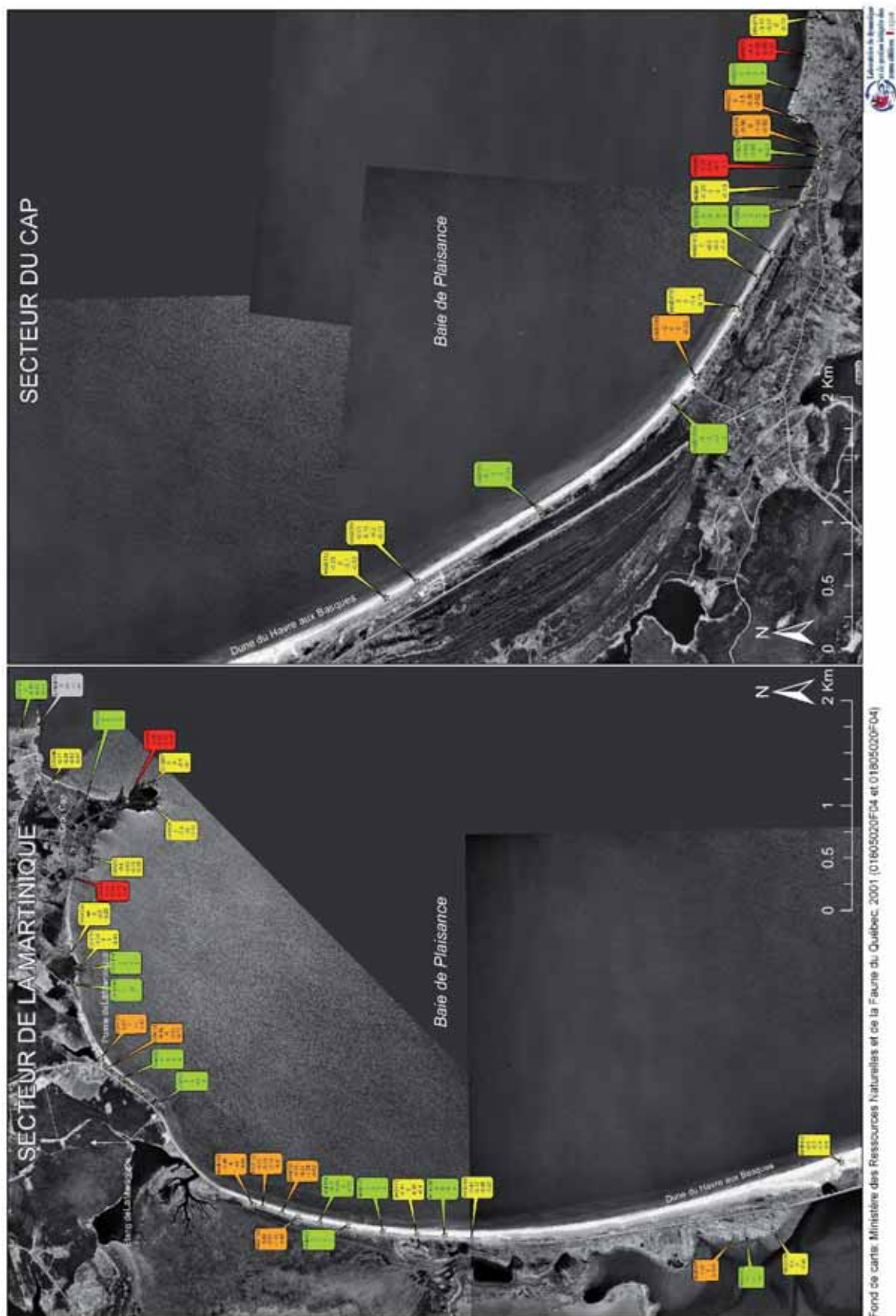


Figure 57. Localisation et mesures de migration du réseau de suivi (2005-2008) de la baie de Plaisance

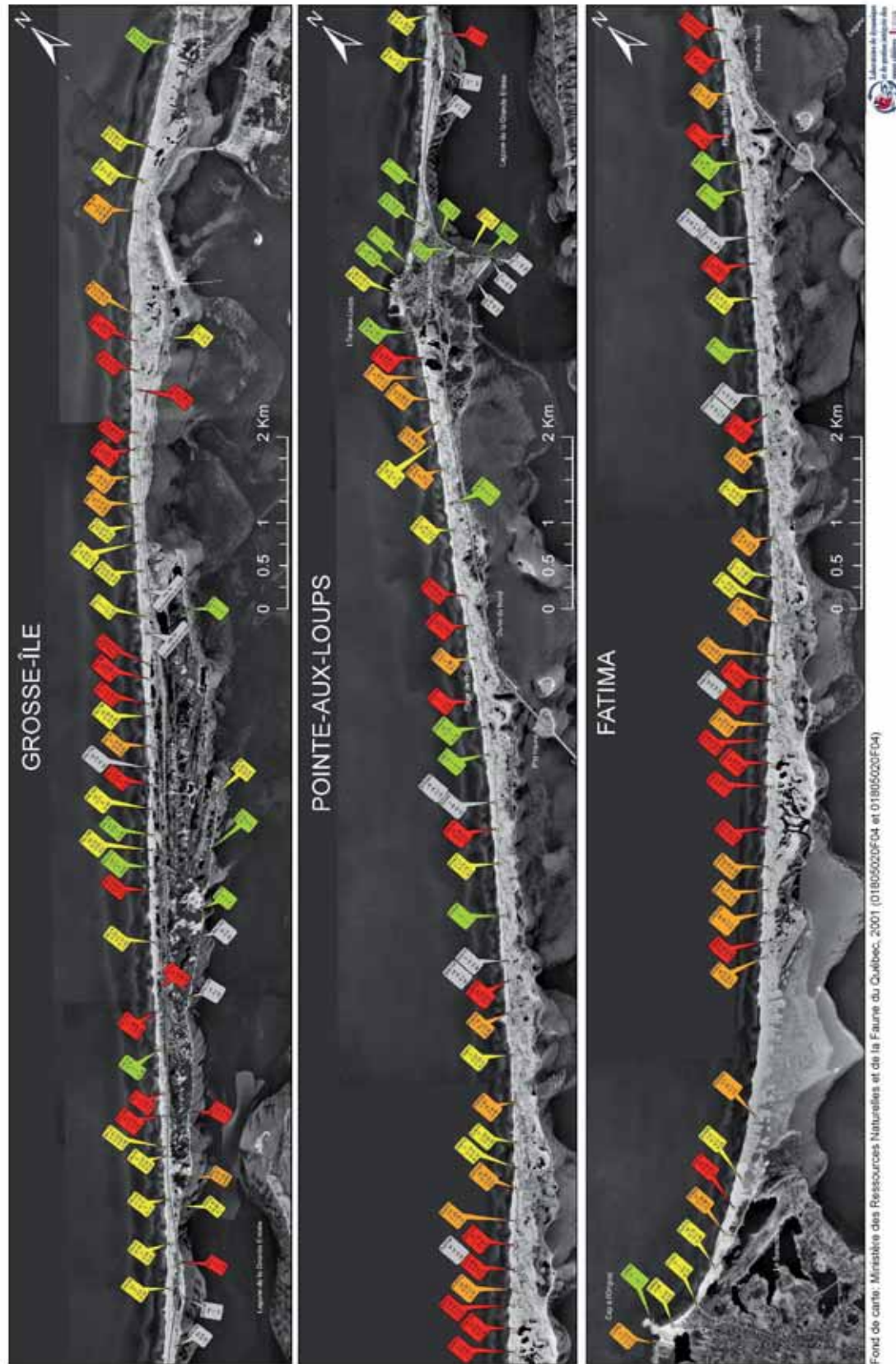


Figure 58. Localisation et mesures du réseau de suivi (2005-2008) de l'unité de Pointe-aux-Loups

L'évolution du trait de côte analysée de 2008 à 2009 en bordure de la route 199, tant au nord de Pointe-aux-Loups qu'au sud de l'enrochement de la baie de Plaisance (tableau 13), est assez conforme à la tendance mesurée à l'échelle historique. Pour la baie de Plaisance, on note une augmentation des valeurs de recul en se rapprochant du secteur enroché, alors que, vers le sud, la tendance s'inverse et présente plutôt des valeurs d'accumulation. Le point d'inversion de la tendance de migration est situé à 402 m de l'enrochement. Dans la figure 59, les traits de côte sont superposés sur l'orthophotographie aérienne de 2001, ce qui nous permet de constater qu'au sud le trait de côte a été plutôt stable, alors qu'au nord le recul a été assez important depuis 2001. Pour le secteur de Pointe-aux-Loups, le recul du littoral de 2008 à 2009 a été particulièrement sévère aux extrémités de la zone analysée (figure 60). Dans la partie sud, le recul a été de 5 à 8 m au droit du remblai protégeant la route 199. L'orthophotographie de 2001 permet de voir que le recul a été particulièrement marqué au nord de la pointe enrochée. Un effet de bout est aussi perceptible immédiatement en aval de cette pointe.

Tableau 13. Évolution du trait de côte des îles de la Madeleine (2008-2009).

Site	Valeur de déplacement du trait de côte (m)	
Baie de Plaisance	Minimum	1,87
	Moyenne	-0,11
	Maximum	-2,51
Pointe-aux-Loups	Minimum	0,09
	Moyenne	-2,73
	Maximum	-8,33
Les deux secteurs	Moyenne	-1,44

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

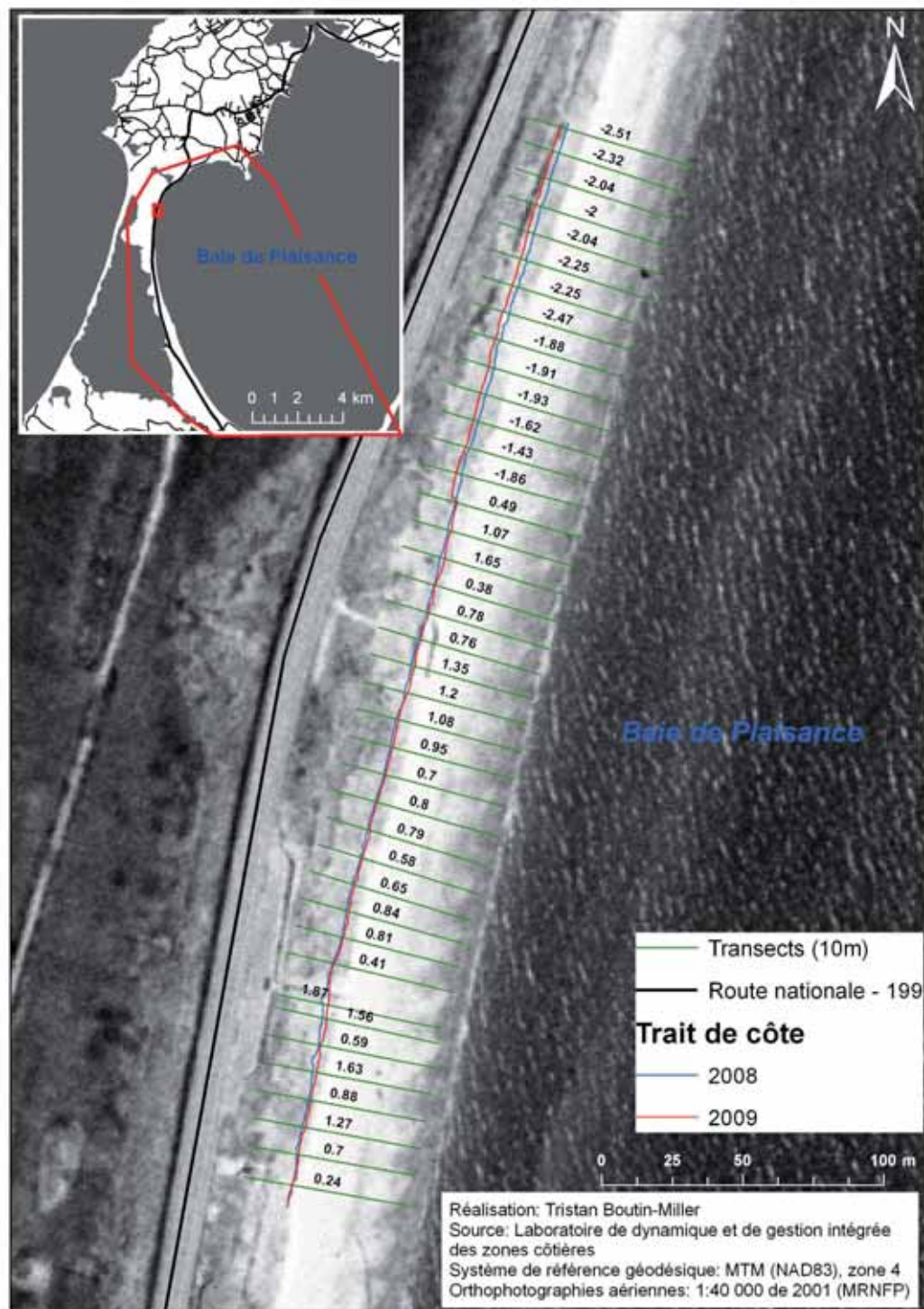


Figure 59. Évolution du trait de côte (2008-2009) d'un secteur de la baie de Plaisance (Boutin-Miller, 2010)

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

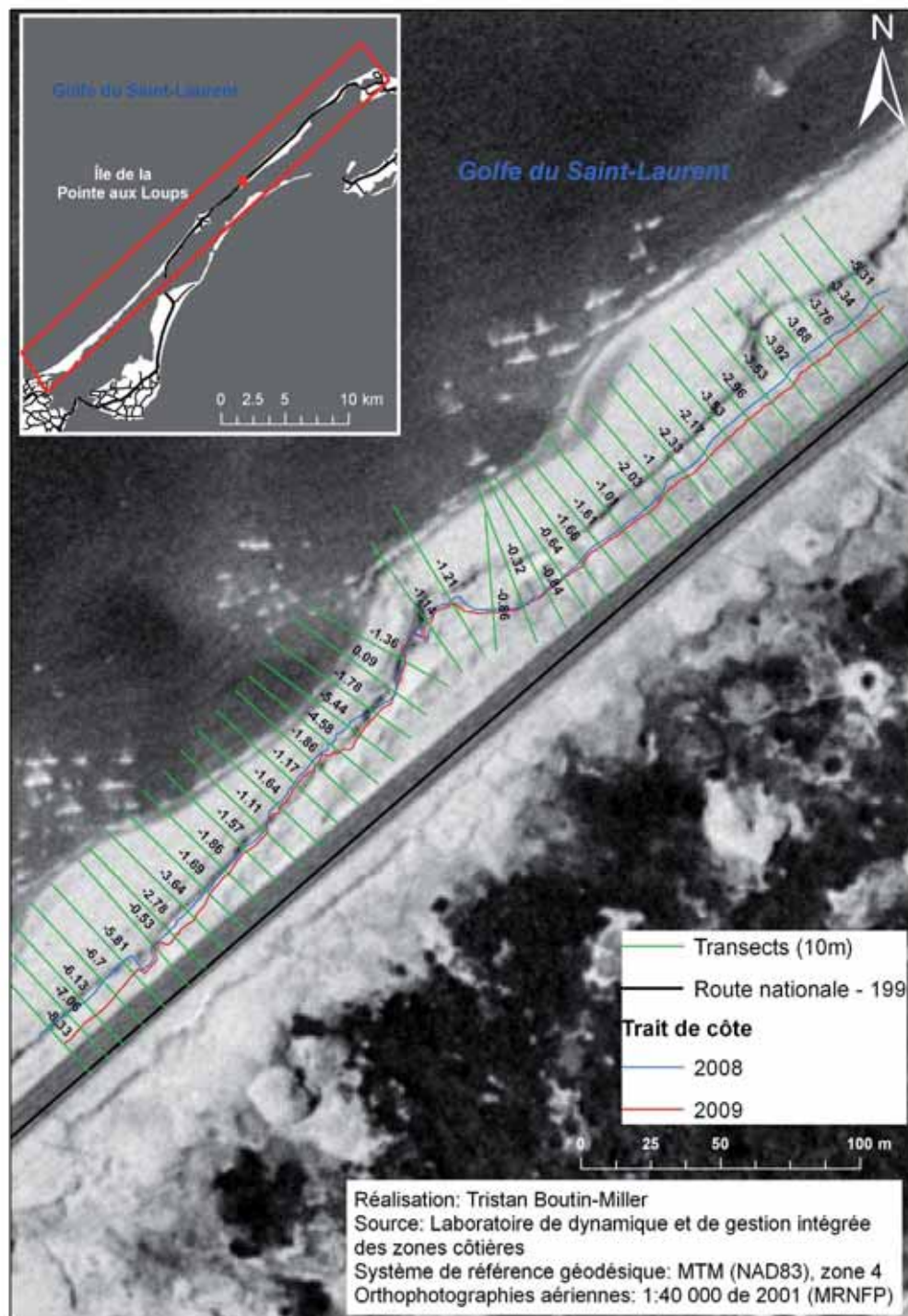


Figure 60. Évolution du trait de côte (2008-2009) d'un secteur de Pointe-aux-Loups (Boutin-Miller, 2010)

5.2.2 Évolution des profils de plage et bathymétriques

Cette section fera état de l'évolution temporelle de la morphologie des plages relevée durant les deux années d'étude (2008 et 2009). Contrairement à l'évolution de la ligne de rivage où uniquement la composante latérale était mesurée, ici, il sera aussi question de la composante verticale de l'évolution des plages. La caractérisation topographique des plages a été réalisée à l'aide d'un DGPS. Une comparaison interannuelle, mais également saisonnière des profils de plage, permettra d'évaluer les variabilités spatiale et temporelle de la morphologie des plages ainsi que de quantifier leur évolution en zone naturelle et en zone artificielle. Cette analyse permettra d'évaluer les effets de l'artificialité sur l'évolution morphodynamique des plages.

La quantification sur le terrain de la largeur moyenne des plages a aussi contribué à l'analyse spatiale de leur dynamique. La flexure, soit la limite entre le bas et le haut estran, a été la limite inférieure considérée pour la mesure de ce paramètre. Le pied des dunes en a été la limite supérieure, permettant ainsi d'inclure le haut de plage et le haut estran. Il est à noter que seuls les profils ayant un point de flexure défini ont été pris en compte pour le calcul de ce paramètre. Des mesures DGPS ont été réalisées avant et après le passage de la tempête Danny (30 août 2009) pour mieux estimer l'effet de tels événements sur l'évolution des plages prospectées.

Des relevés bathymétriques réalisés par le CIDCO durant l'été 2009 ont également été utiles pour expliquer l'évolution temporelle des profils terrestres. Ils ont permis, entre autres, la réalisation de profils pouvant aller jusqu'à 6 000 m au large. Afin de mettre l'accent sur les structures sédimentaires pouvant influencer l'évolution des plages, seule la partie la plus proche du rivage (800 m de large) a été représentée dans les figures. La pente a toutefois été calculée sur toute la largeur, mais également sur les cordons pré littoraux.

La dynamique sédimentaire étant différente dans les secteurs de la baie de Plaisance et de Pointe-aux-Loups, la caractérisation topographique et granulométrique se fera en fonction des unités hydrosédimentaires.

5.2.2.1 Unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance

En fonction de l'état des plages, la baie de Plaisance a été divisée en trois parties distinctes : les plages situées au pied des ouvrages de protection (plages artificielles : MAR1-MAR6), les plages situées immédiatement en aval des ouvrages de protection (plages « Effet de bout » : MAR7-MAR10) et les plages naturelles (MAR11-MAR20).

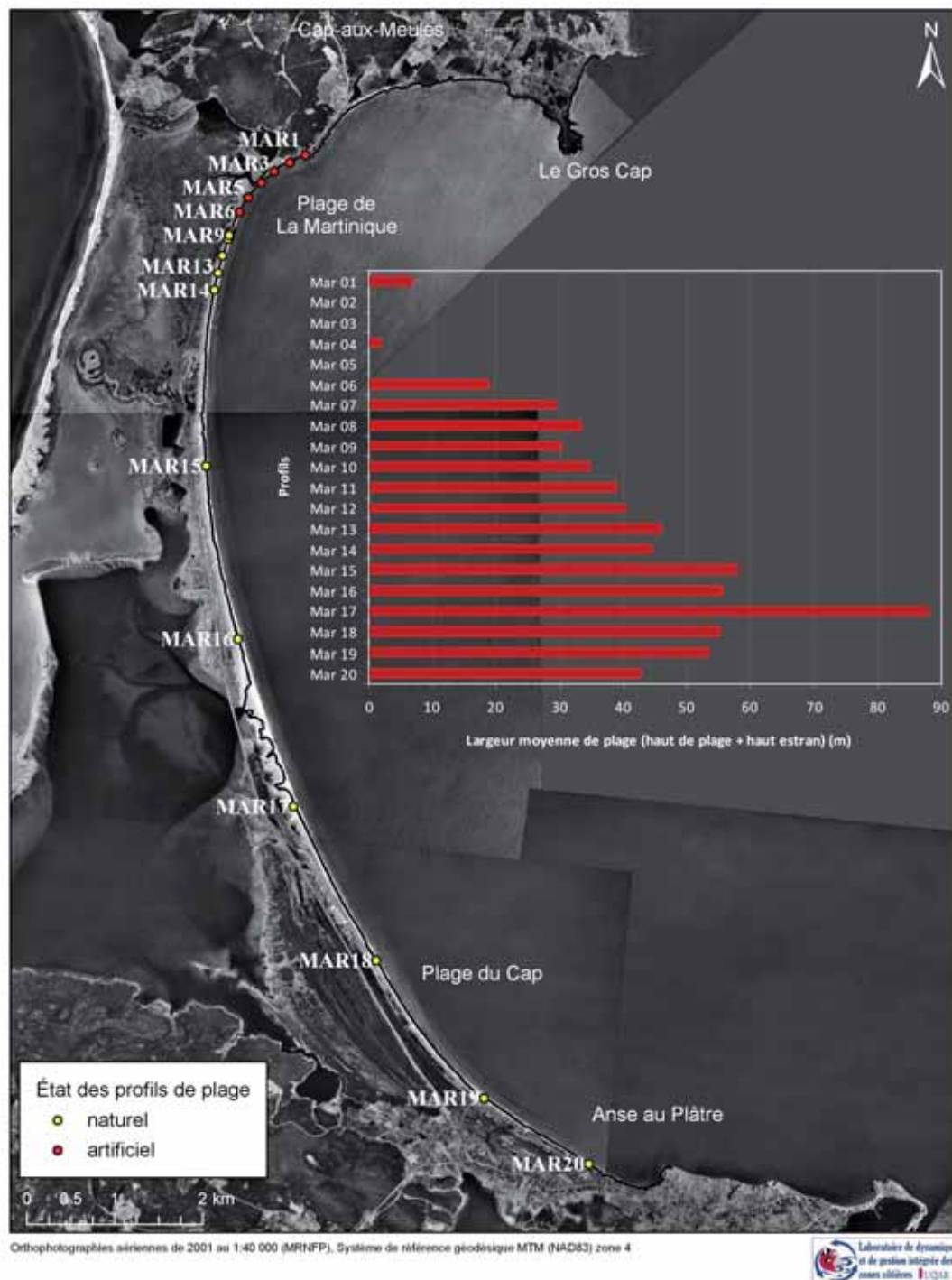


Figure 61. Largeurs moyennes de la plage (haute plage + haut estran) de la baie de Plaisance (m)

➤ Plages « Artificielles » (MAR1-MAR6)

Les plages de cette partie de la baie se situent dans la partie septentrionale de La Martinique et font suite aux terrasses de plage et aux falaises rocheuses de grès situées plus au nord. C'est la partie artificialisée. Elle s'étend de MAR1 à MAR6, sur une distance de 1,2 km, et constitue 6 % de la côte à tombolo de la baie (figure 61). L'enrochement, dont la crête se situe à une hauteur moyenne de 3 m, plonge en décrivant une forte pente. Il n'y a pratiquement pas de plage au sens strict (haut estran) au pied des enrochements et, quand il y en a, elle est presque continuellement sous le niveau moyen de la mer. Le bas estran présente une pente plus douce.

L'évolution des profils de plage durant la période d'étude révèle un abaissement du niveau de la surface des plages durant la période automne 2008-hiver 2009. En effet, durant cette période, l'altitude au pied des enrochements a diminué en moyenne de 0,4 m (figures 62 et 63). L'analyse de l'évolution temporelle de la composition granulométrique des sédiments dans ce secteur montre un appauvrissement en sable moyen de l'ordre de 16,7 %, en moyenne, et une augmentation de sable fin de l'ordre de 18,71 %, en moyenne. Cet abaissement pourrait être dû aux conditions météorologiques automnales et hivernales (souvent accompagnées de tempêtes) qui ont sévi aux îles de la Madeleine durant l'automne 2008 et l'hiver 2009. L'énergie engendrée par la réflexion des vagues sur l'enrochement (affouillement) serait la cause principale de l'érosion dans ce secteur. D'autre part, la dérive littorale dans la baie de Plaisance décrit un transfert des sédiments des extrémités vers le centre de la baie (figure 21). Ce facteur aurait contribué à accentuer le déficit sédimentaire observé dans cette partie de La Martinique, donc à son démaigrissement.

À l'inverse, la période s'étendant de juin 2009 à octobre 2009 semble avoir été bénéfique sur le plan sédimentaire, puisqu'il a été constaté un rehaussement moyen du niveau des plages de 0,5 m. Cette situation pourrait être liée aux conditions estivales calmes, généralement synonymes d'engraissement des plages. Dans certains cas, des cordons de sable de bas estran viennent momentanément et ponctuellement s'accoler au pied de l'enrochement. Ceux-ci ne sont toutefois pas permanents et, avec la turbulence engendrée par la réflexion des vagues, les sédiments sont généralement évacués dans le sens de la dérive littorale. Il est à noter que les niveaux atteints en octobre 2009 avoisinent ceux relevés en septembre 2008.

Par ailleurs, l'étude de l'évolution historique (section 5.1) révèle la présence de plages d'une largeur moyenne de 22 m avant la construction des premiers ouvrages de protection dans les années 70. Le constat actuel révèle la disparition de la haute plage et du haut estran de la presque totalité des plages situées en zone artificialisée (plage inexistante sur trois des six profils prospectés et largeur de plage moyenne : 5 m) (figures 61 à 63), alors que, dans le secteur naturel, les plages mesurées avoisinent généralement 35 à 55 m de largeur. En effet, la plus grande partie des plages situées devant la zone d'enrochement se trouve être continuellement sous le niveau moyen de

la mer, formant des zones sans haut estran, vulnérables aux conditions hydrodynamiques prédominantes dans le secteur.

➤ **Plages « Effet de bout » (MAR7-MAR10)**

Cette partie, adjacente à la précédente, s'étend de MAR7 à MAR10 sur une longueur de près de 100 m (figure 61).

La largeur des plages augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'enrochement, passant de 29 à 35 m, mais reste bien en dessous des largeurs des plages mesurées en milieu naturel (52 m en moyenne en incluant le haut de plage et le haut estran) (figure 63). La pente moyenne des plages dans cette partie de la baie fluctue de 5 à 10 %. La moyenne, toutes saisons confondues, est relativement forte avec une valeur de 7 %. L'évolution des profils topographiques durant la période s'échelonnant de 2008 à 2009 révèle un appauvrissement prononcé en sédiments. En effet, un abaissement du niveau des plages, de près de 0,4 m, est observé par endroits (évolution de septembre 2008 à octobre 2009), et même au-delà (0,6 m), si l'on considère les relevés topographiques post-tempête (tempête Danny survenue le 30 août 2009). L'évolution temporelle (pré- et post-tempête) des différentes classes granulométriques montre une diminution de la proportion de sable fin (5,67 %, en moyenne) et une augmentation similaire de celle du sable moyen (5,33 %).

L'étude de l'évolution historique de 1963 à 2008 (figure 49) indique un recul de la côte d'environ 15 m sur MAR7 et MAR8. Cette situation, en partie due à l'effet de bout, est typique des plages situées en bordure des structures rigides de protection. Un ensablement, probablement induit par apport éolien, est cependant observé durant l'année 2009 au pied de la dune située à la limite de la partie « naturelle » (MAR10). En effet, durant la même période, une augmentation du pourcentage de sable moyen de 13,8 % a été révélée par l'étude granulométrique. Enfin, l'effet de bout s'atténue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'enrochement.

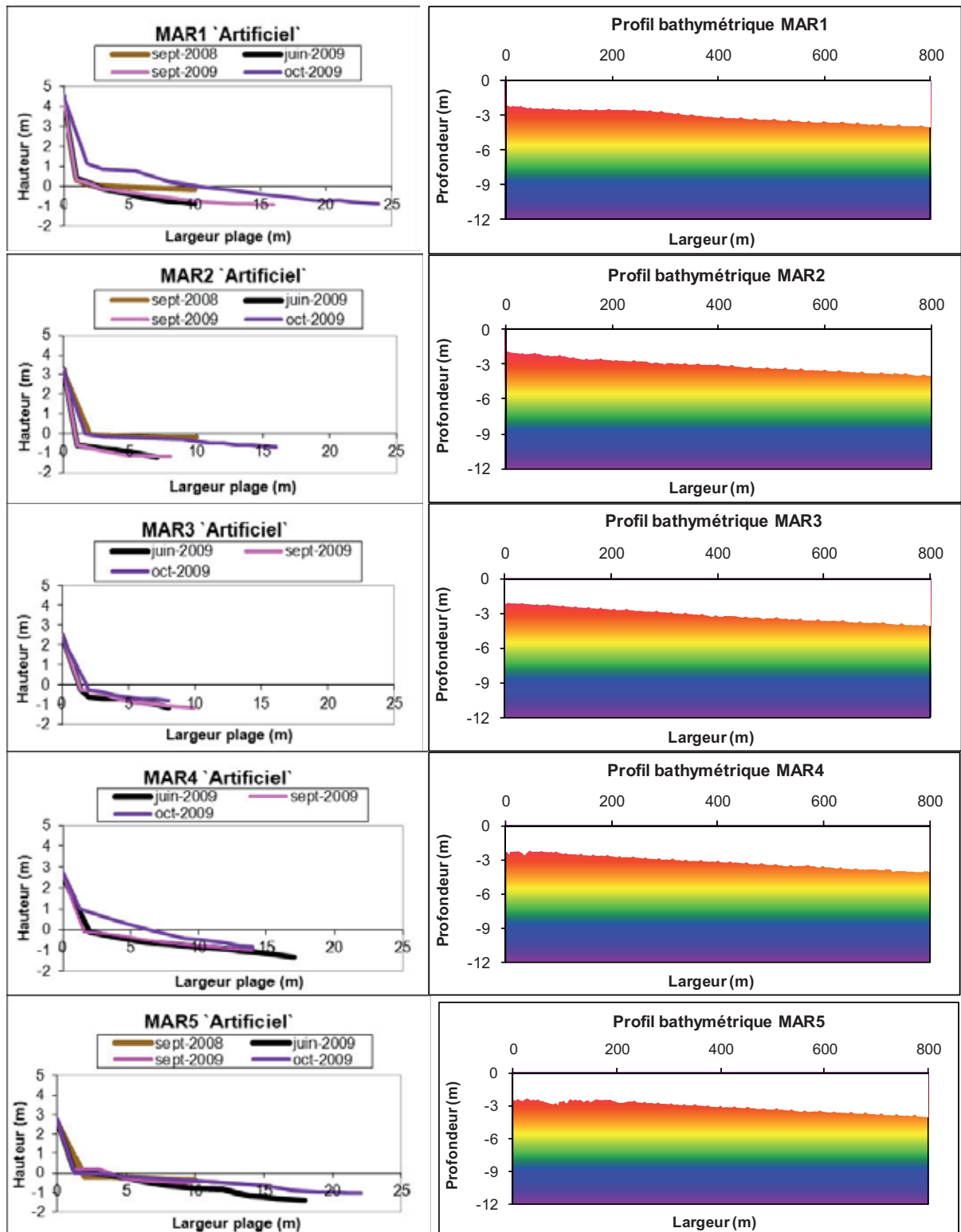


Figure 62. Profils de plage et profils bathymétriques de la baie de Plaisance (MAR1-MAR5)

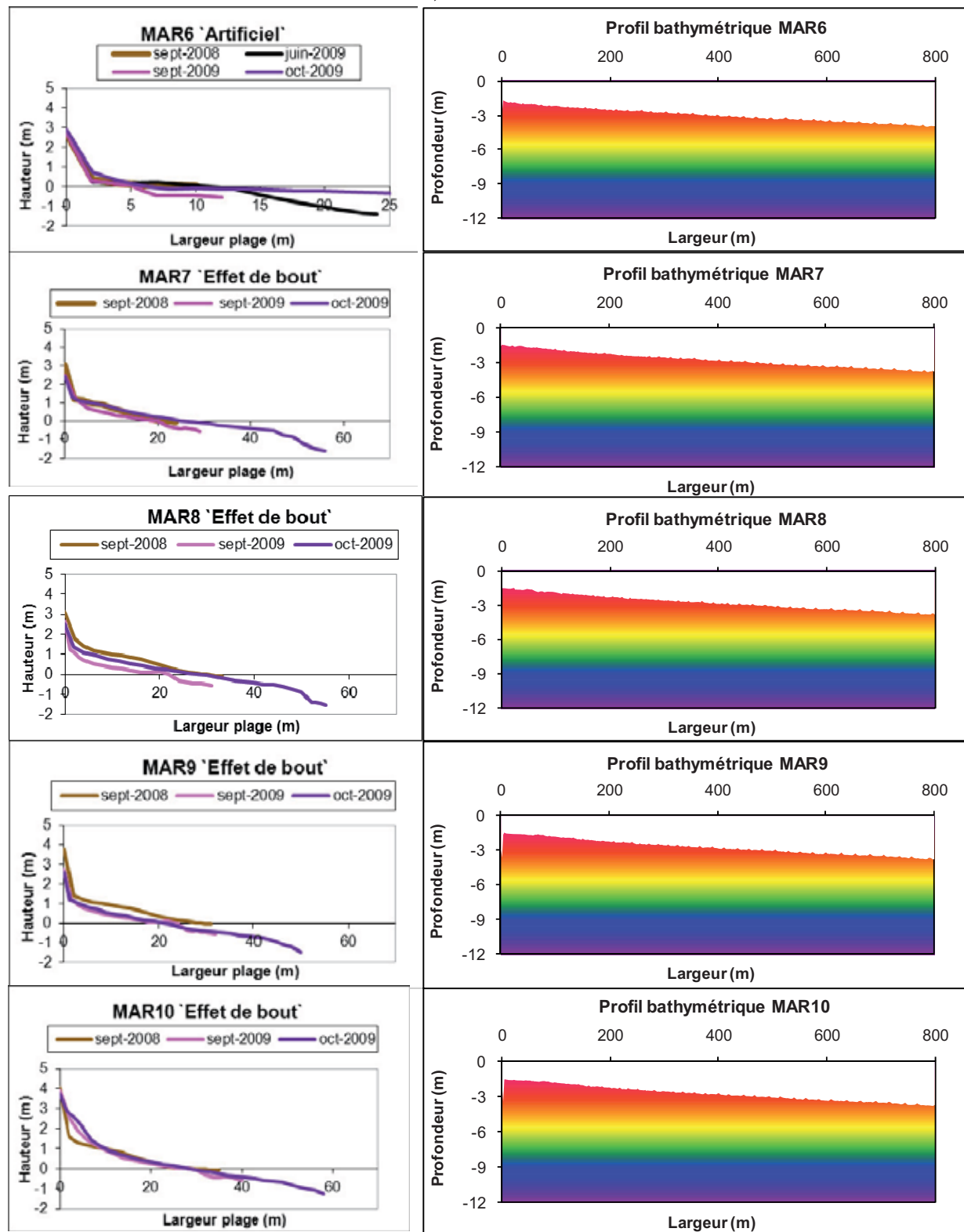


Figure 63. Profil de plage et profils bathymétriques de la baie de Plaisance (MAR6-MAR10)

➤ Plages « Naturelles » (MAR11-MAR20)

Les plages de cette catégorie se trouvent en bordure d'une côte naturelle et sont localisées dans la partie centrale et sud de la baie de Plaisance (figure 61). Le haut de plage et la partie supérieure du haut estran présentent des pentes douces, tandis que la partie inférieure du haut estran ainsi que le bas estran affichent des pentes moyennes à fortes.

L'analyse de l'évolution temporelle des profils de plage dans cette partie de la baie, de 2008 à 2009, révèle une baisse du niveau de plage du haut estran sur une largeur de plus de 20 m dans certains cas (figures 64 et 65). D'autre part, les relevés topographiques réalisés en septembre et octobre 2009 indiquent un élargissement du haut estran. L'analyse sédimentologique révèle un changement dans les proportions des différentes classes granulométriques. En effet, le pourcentage de sable moyen de la partie inférieure du haut estran augmente, alors qu'une diminution est constatée sur la partie supérieure du haut estran. Cela nous porte à penser qu'une partie des sédiments ayant servi à cette accrétion proviendrait de la partie supérieure du haut estran, probablement en partie par déflation éolienne. Une accumulation sédimentaire induite par la dérive littorale principale est également envisageable.

Un engraissement du haut de plage a cependant été observé au pied des dunes MAR13, 14, 16 et 19, où il a été mesuré plus de 1 m de relèvement par endroits (figures 64 et 65). Il est à noter que les échantillons prélevés au pied de ces dunes n'ont pas révélé de changement de composition granulométrique durant la période d'étude.

L'abaissement du niveau du haut estran et l'accrétion du haut de plage, confortés par la stabilité des proportions des classes sédimentologiques dominantes, laissent présumer une migration des matériaux sédimentaires vers le bas des dunes, sous l'effet du vent. Cette hypothèse est confirmée par l'analyse des images prises par les caméras.

D'autre part, la largeur de plage augmente au fur et à mesure que l'on se dirige des extrémités de la baie vers le centre de celle-ci. Cette progression semble plus marquée dans le sens nord-sud (figure 61). En effet, elle passe en moyenne de 0 à 88 m, en se dirigeant de la partie septentrionale de la baie (anse aux Étangs et nord de la plage de La Martinique) vers le centre de celle-ci, et de 43 à 88 m, en remontant du sud de l'anse au Plâtre vers le centre. Les matériaux, issus entre autres de l'érosion des falaises situées au sud de la baie, convergent vers le centre de celle-ci par la dérive littorale, favorisant l'engraissement des plages situées dans la partie centrale de la baie. Le sens convergent des dérives littorales principales dans la baie explique donc ce profil de la largeur des plages (figure 21). Il est donc normal d'avoir des plages plus étroites, même en zone naturelle, en amont des deux dérives littorales et aux extrémités de l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance. Il est aussi normal d'avoir des plages plus étroites au nord, puisque l'on trouve une dérive littorale divergente, délimitant ainsi les cellules hydrosédimentaires de la baie de Plaisance et de l'anse aux Étangs.

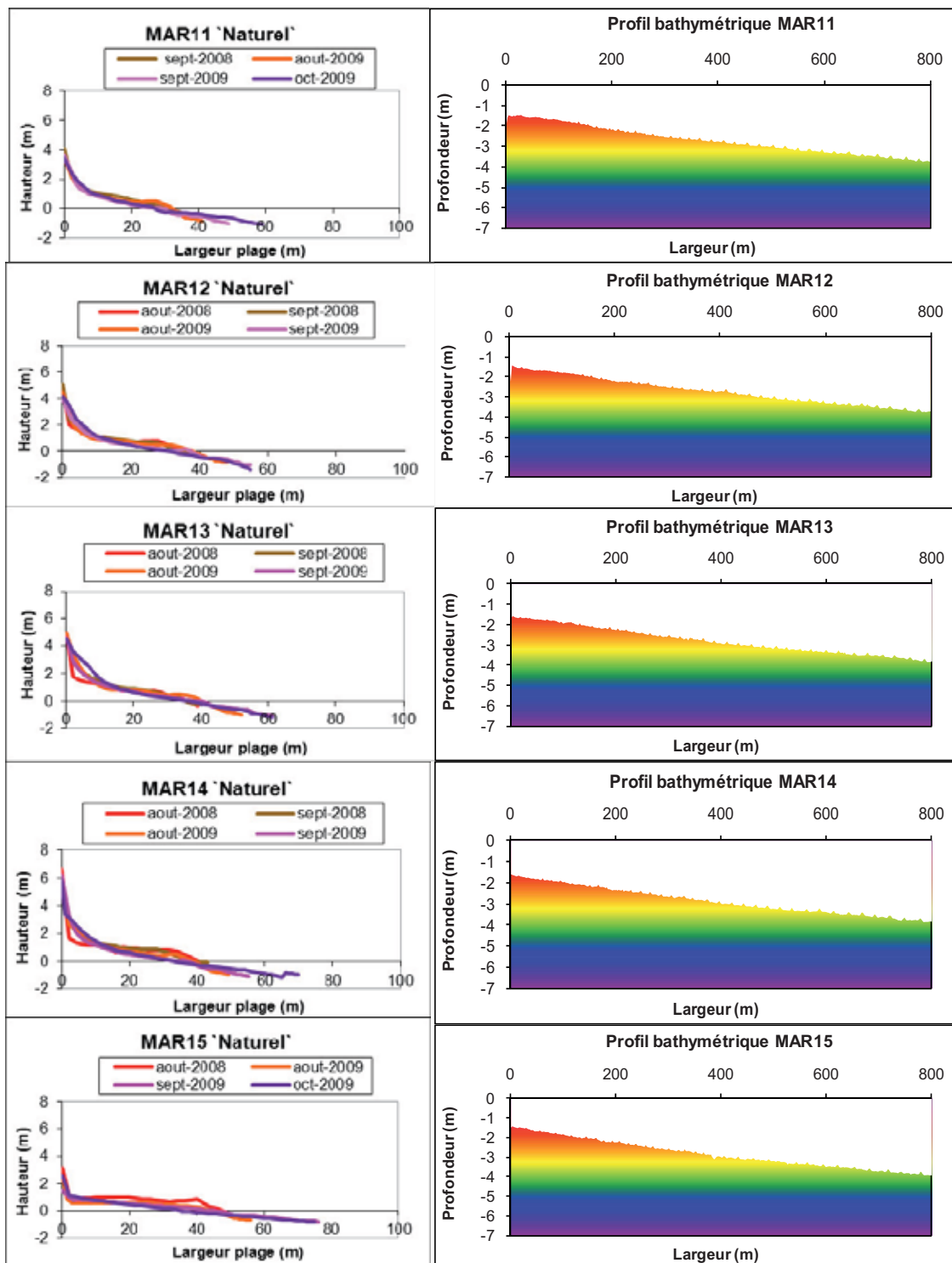


Figure 64. Profils de plage naturels et profils bathymétriques de la baie de Plaisance (MAR11-MAR15)

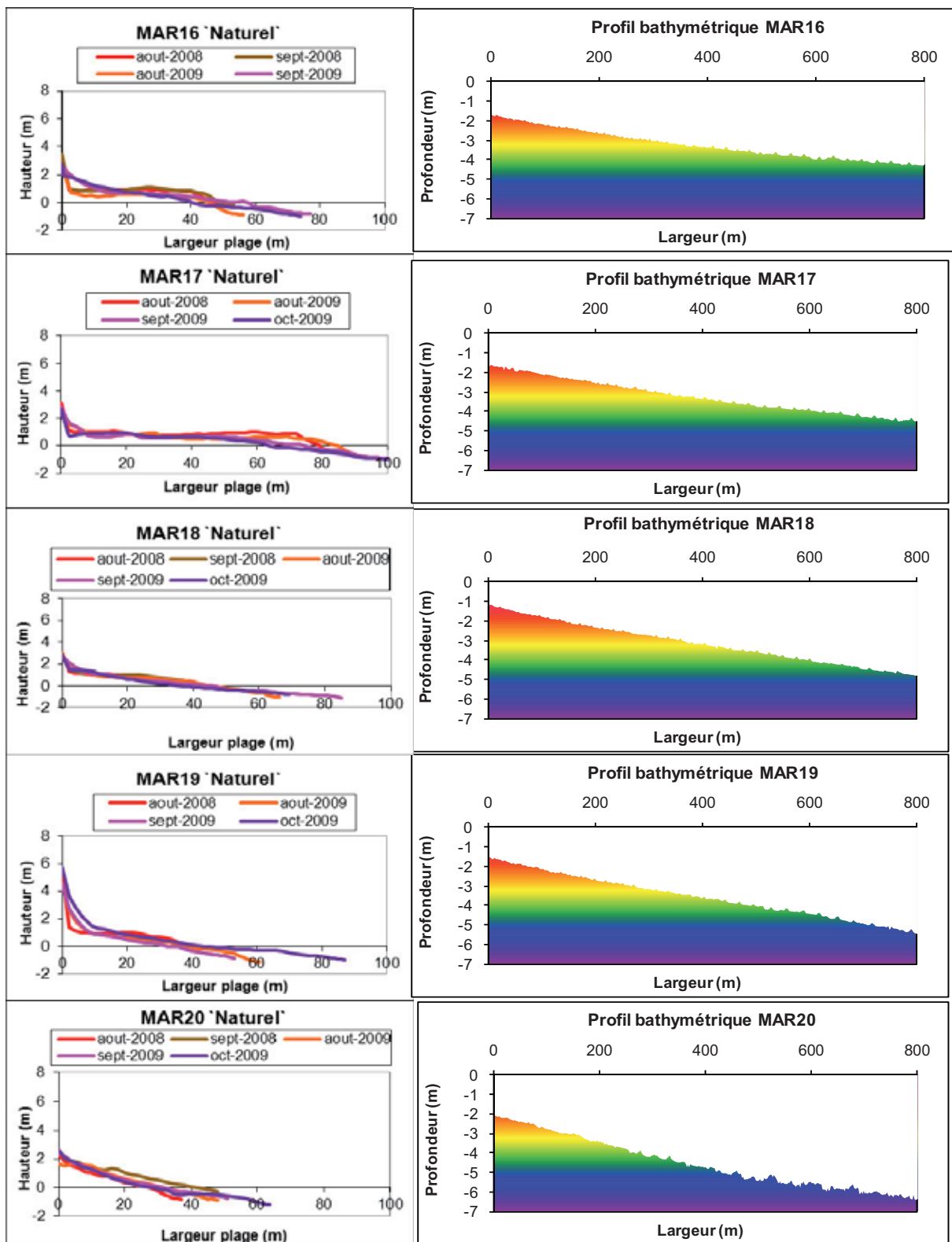


Figure 65. Profils de plage naturels et profils bathymétriques de la baie de Plaisance (MAR16-MAR20)

➤ **Bathymétrie de l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance**

Les profils bathymétriques de la baie de Plaisance décrivent une pente faible (0,16 %, en moyenne) et régulière (figures 62 à 66). La pente des profils MAR1 à MAR19 varie de 0,11 à 0,20 % et semble croître en s'approchant de la côte. Le profil bathymétrique MAR20, situé dans la partie méridionale de la baie, présente une pente relativement plus forte (0,93 %). De manière générale, ce type de profil est typique des côtes dissipatives où l'énergie des vagues est graduellement dissipée sur une large surface et où l'espace entre les isobathes croît vers la plage (Paskoff, 2003). Cette topographie favorise donc l'accumulation de sédiments sur la côte et est par conséquent un des facteurs explicatifs du bilan positif et de la progradation de la côte dans l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance. Par ailleurs, les deux secteurs à falaises rocheuses, soit entre le Gros Cap et le port de Cap-aux-Meules, et entre l'anse au Plâtre et la flèche littorale Sandy Hook, présentent des caractéristiques morphologiques différentes. Les isobathes devant les falaises rocheuses se rapprochent en raison de la concentration de l'énergie et de la réflexion des vagues causée par l'aspect vertical et rigide de la falaise. Cette dynamique se traduit par une augmentation rapide de la bathymétrie devant les secteurs à falaise.

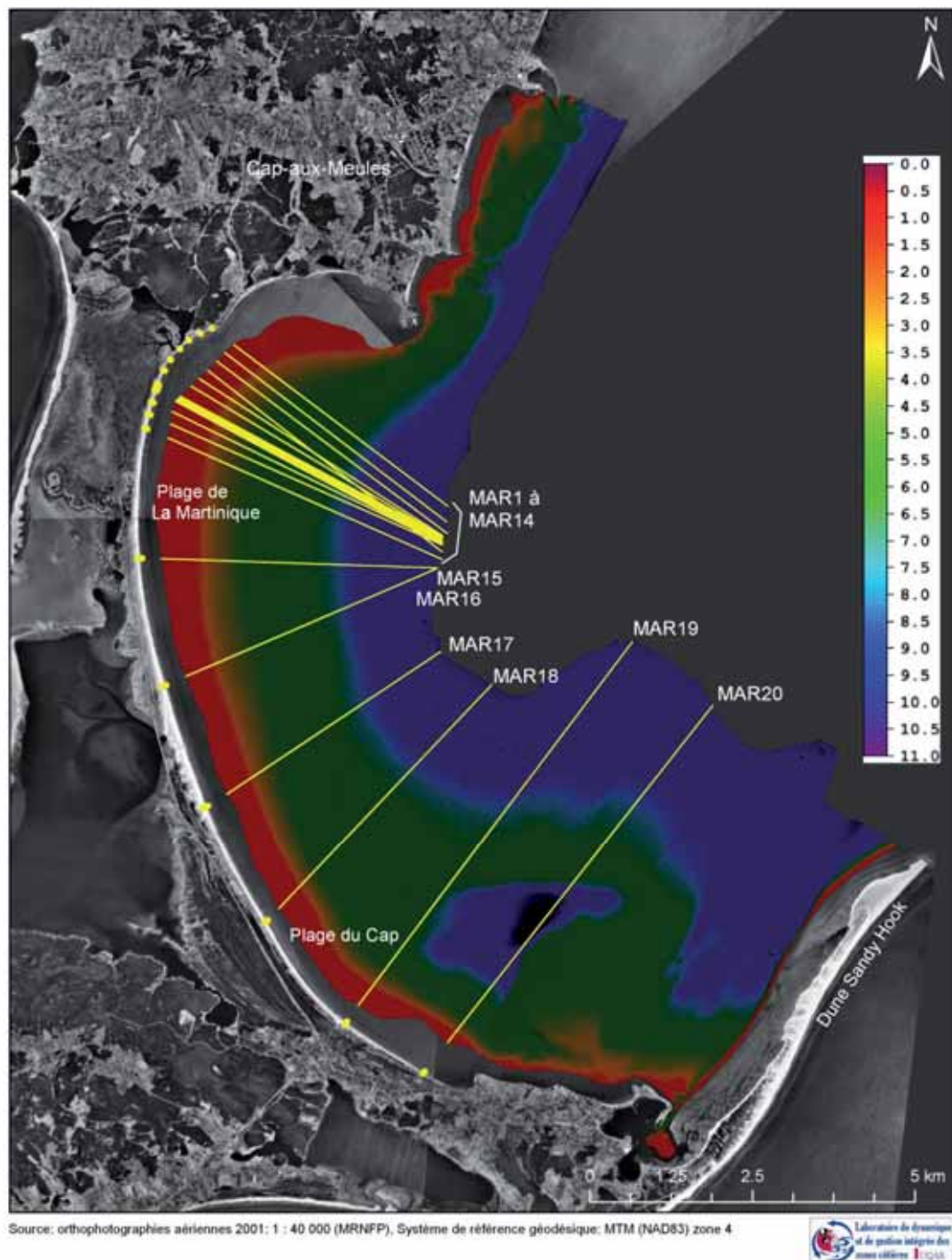


Figure 66. Carte bathymétrique avec la localisation des profils bathymétriques et de la plage de l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance

5.2.2.2 Unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

Globalement, l'aspect général des plages de Pointe-aux-Loups est typique des processus éoliens que l'on retrouve sur les côtes bordées de dunes. Surplombée par une crête de 3 à 8 m de hauteur dans la plupart des cas, la dune bordière ou parabolique est entaillée par le sapement des vagues et par la déflation éolienne qui forme un talus abrupt sans végétation qui alimente en sédiments le haut de plage. L'évolution morphodynamique des plages est aussi conditionnée par des courants de retour qui forment sur la plage une série de croissants. La pente varie d'un profil à l'autre, mais aussi d'une période à l'autre au niveau du même profil. La description des profils sera faite en fonction des deux cellules hydrosédimentaires du secteur de Pointe-aux-Loups.

➤ **Cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups [PLOU1 à PLOU49A (figure 68)]**

L'évolution générale (2008-2009) de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups révèle une stabilité de la partie supérieure du haut estran et un engraissement de la partie inférieure du haut estran et du haut de plage en 2009, faisant apparaître une accrétion au pied des dunes (figures 69 à 78).

Toutefois, certains profils correspondant à la partie sud de la cellule hydrosédimentaire font ressortir une situation inverse. C'est le cas des profils PLOU1 à PLOU6 (figures 69 à 70), où l'on a constaté un démaigrissement en 2008. Quant aux profils PLOU10 et PLOU11, il a été observé en 2009 un abaissement du niveau moyen de la plage ainsi qu'une diminution de la largeur des plages de plus de 10 m. Il en est résulté la disparition de la plage au pied des enrochements situés au niveau de ces profils (figures 70 et 71). L'affouillement se produisant au pied de l'enrochement en serait la principale cause. En effet, la réflexion des vagues sur les enrochements crée des turbulences suivies d'un déplacement du matériel sédimentaire se trouvant au pied des enrochements.

Les mesures réalisées après le passage de la tempête Danny ont laissé paraître une accrétion sur la majeure partie des plages constituant cette cellule hydrosédimentaire. Cette accrétion se traduit non seulement par un rehaussement du niveau des plages pouvant dépasser 1 m par endroits, mais également par un élargissement du haut estran pouvant atteindre jusqu'à 15 m. Le niveau d'eau atteint sur la côte durant la tempête Danny a fait en sorte que les vagues ont eu peu d'effets de sapement sur le talus de la dune, mais qu'elles ont plutôt favorisé le déplacement vers la plage des sédiments provenant des cordons de bas estran et des cordons pré littoraux.

Ce qui ressort de l'étude de l'évolution temporelle (2008-2009) des profils de la cellule de Pointe-aux-Loups reflète davantage des variations localisées que des tendances relatives à l'artificialité. En effet, les courants de retour et la formation de croissants de plage expliquent en bonne partie la variabilité de la

morphologie de la plage même devant les zones artificielles. Il faut toutefois faire une distinction selon les types d'ouvrages de protection. On trouve effectivement des enrochements typiques parallèles à la côte, des épis rocheux ainsi qu'un remblai ayant comme fonction de recharger le haut de plage. L'examen de l'évolution spatiale des largeurs de plage moyennes montre un écart entre les plages situées au pied des enrochements (moyenne : 21 m de large) et les plages naturelles (moyenne : 35 m de large) (figure 68). Les profils ayant révélé les largeurs de plage les plus faibles se trouvent au pied des enrochements. C'est le cas notamment devant les profils PLOU9, 10, 11, 35 et 36, dont la largeur dépasse à peine 15 m. Les plages en bordure des épis rocheux mesurent en moyenne 24 m de large, alors que celles en bordure de la recharge du haut de plage mesurent en moyenne 31 m de large (figure 67). Les plages adjacentes aux enrochements font office de zone de transition vers les plages naturelles et présentent une largeur moyenne de 26 m.



Figure 67. Élargissement de la largeur de la plage devant le secteur rechargé en sable

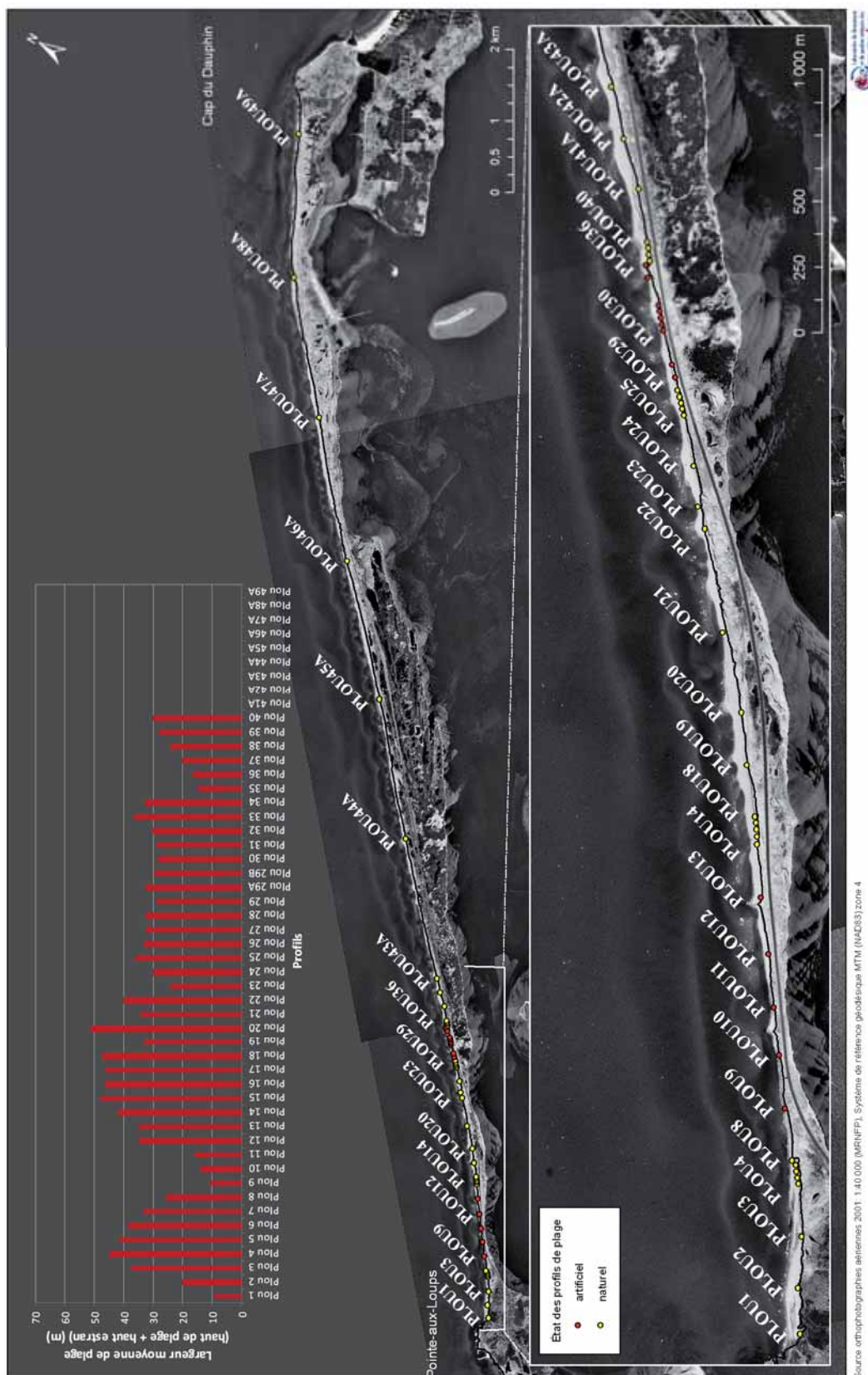


Figure 68. Largeurs moyennes de plage de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

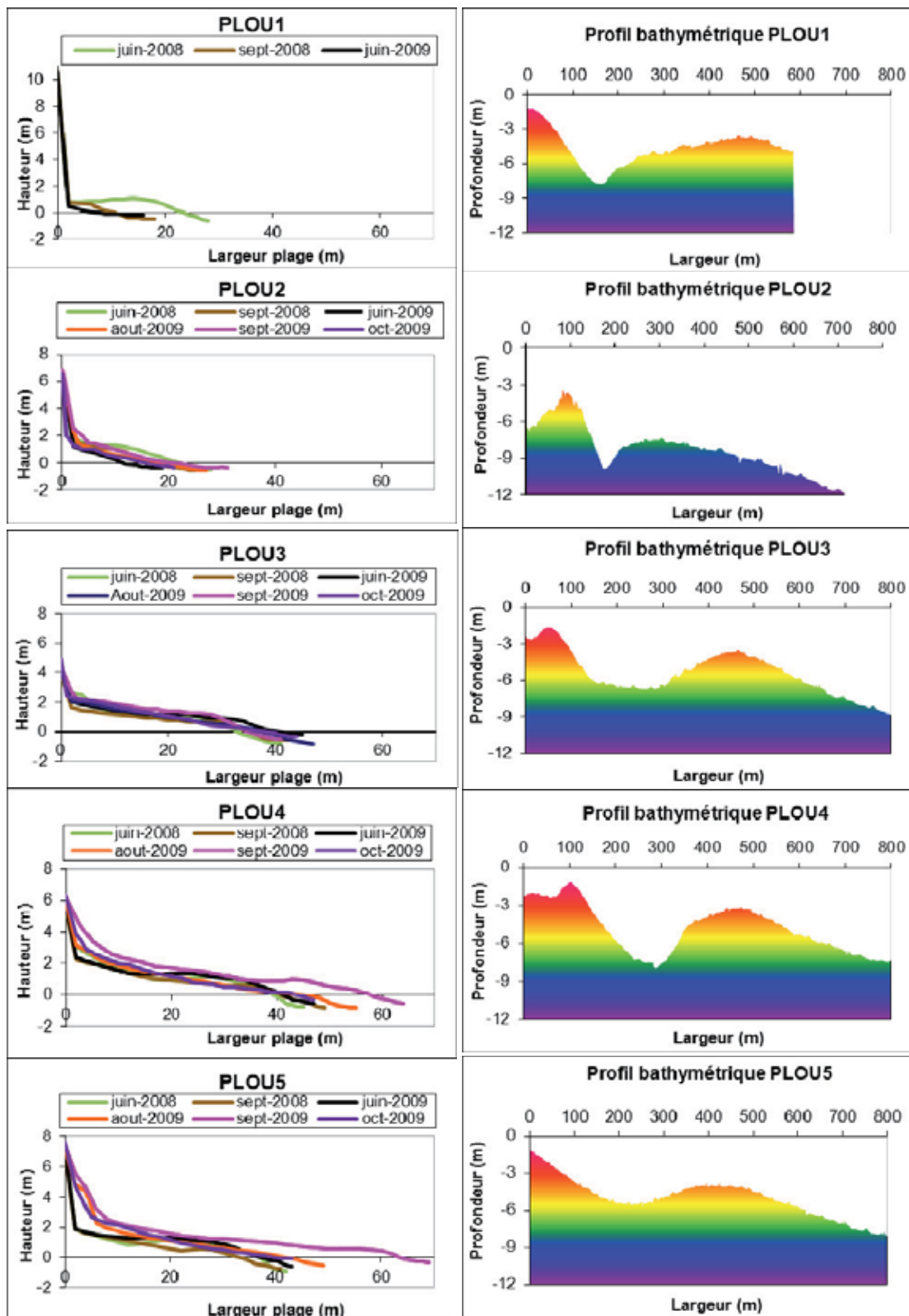


Figure 69. Profils de plage et profils bathymétriques de Pointe-aux-Loups (PLOU1-PLOU5)

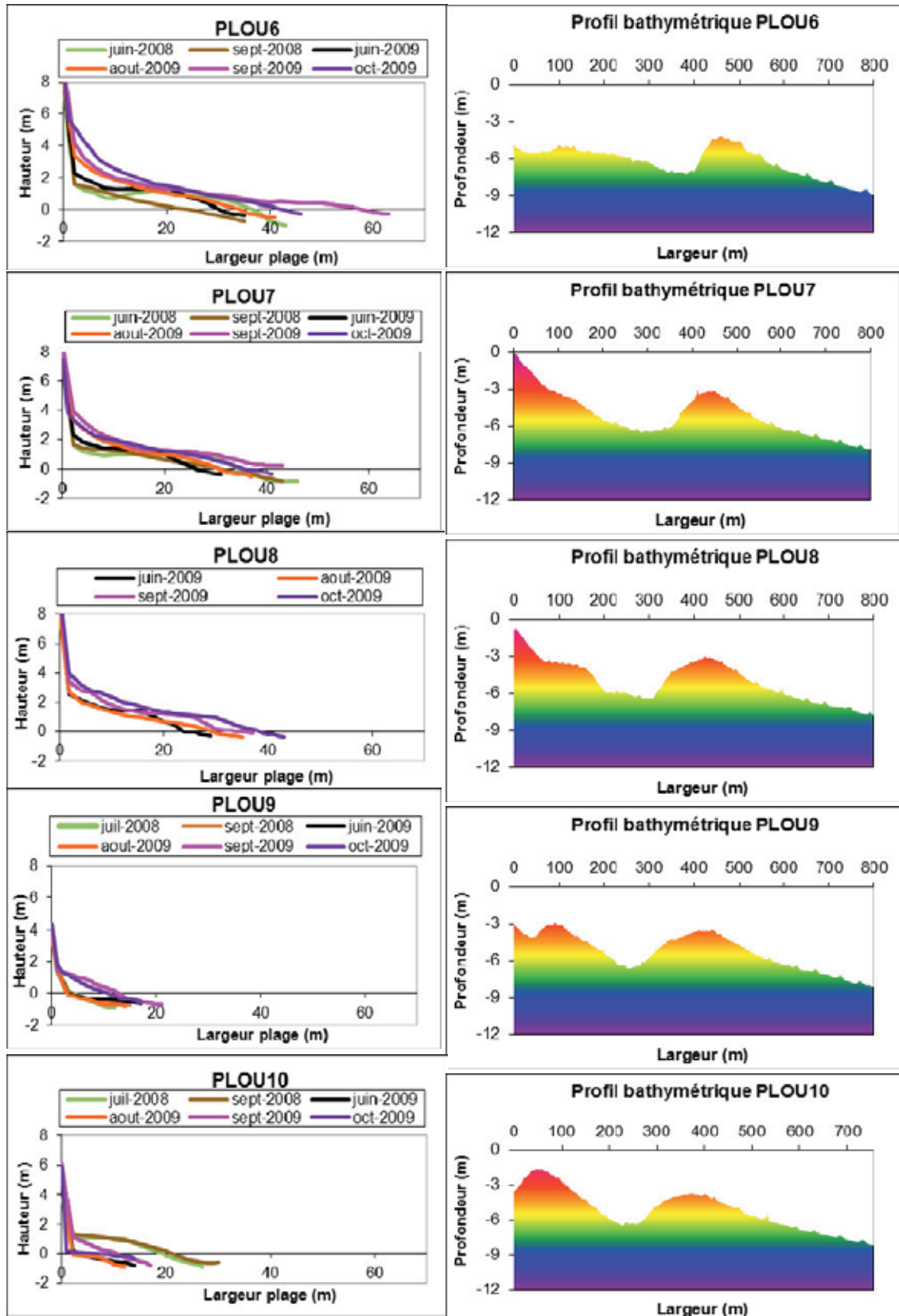


Figure 70. Profils de plage et profils bathymétriques de Pointe-aux-Loups (PLOU6-PLOU10)

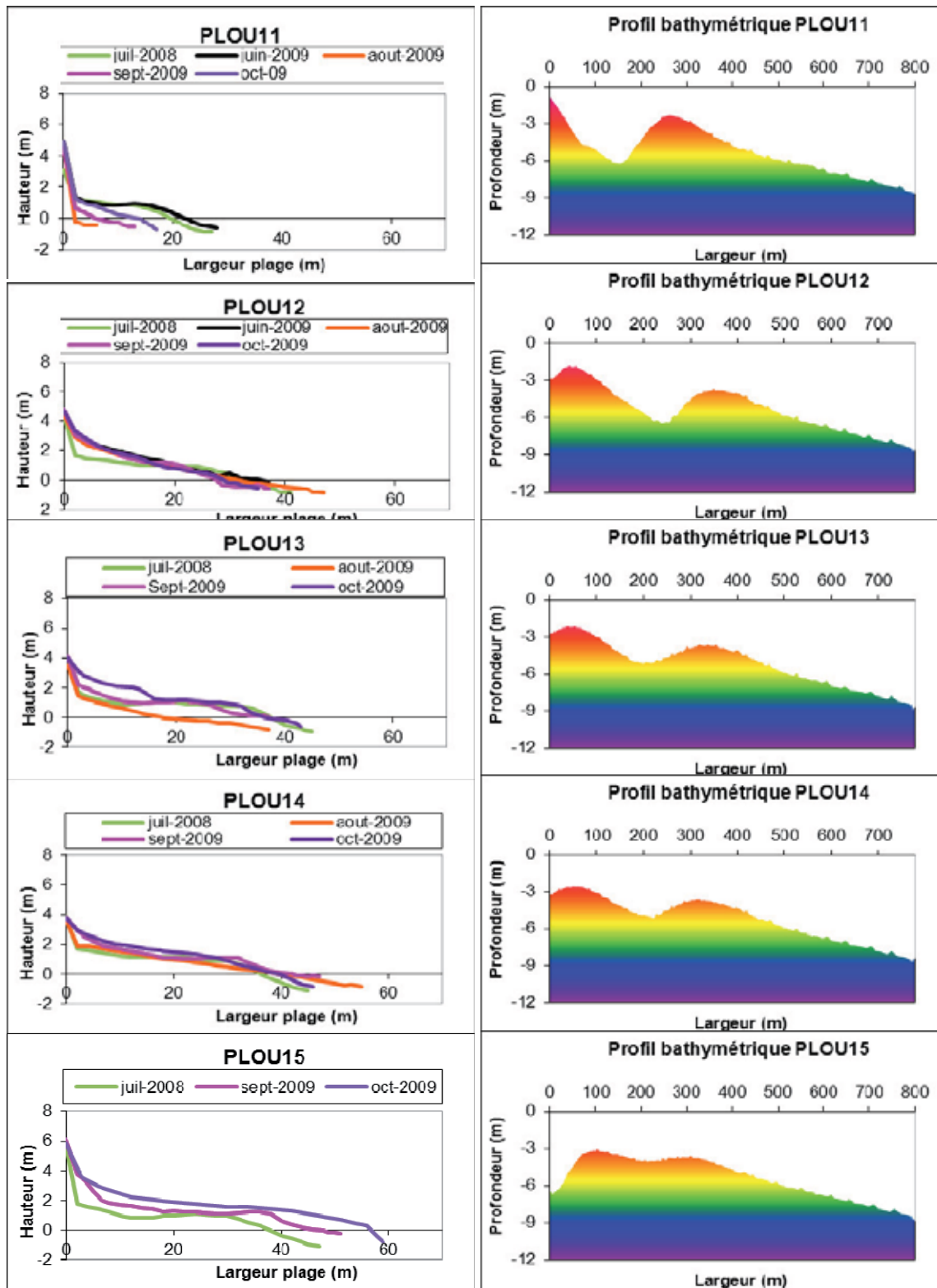


Figure 71. Profils de plage et profils bathymétriques de Pointe-aux-Loups (PLOU11-PLOU15)

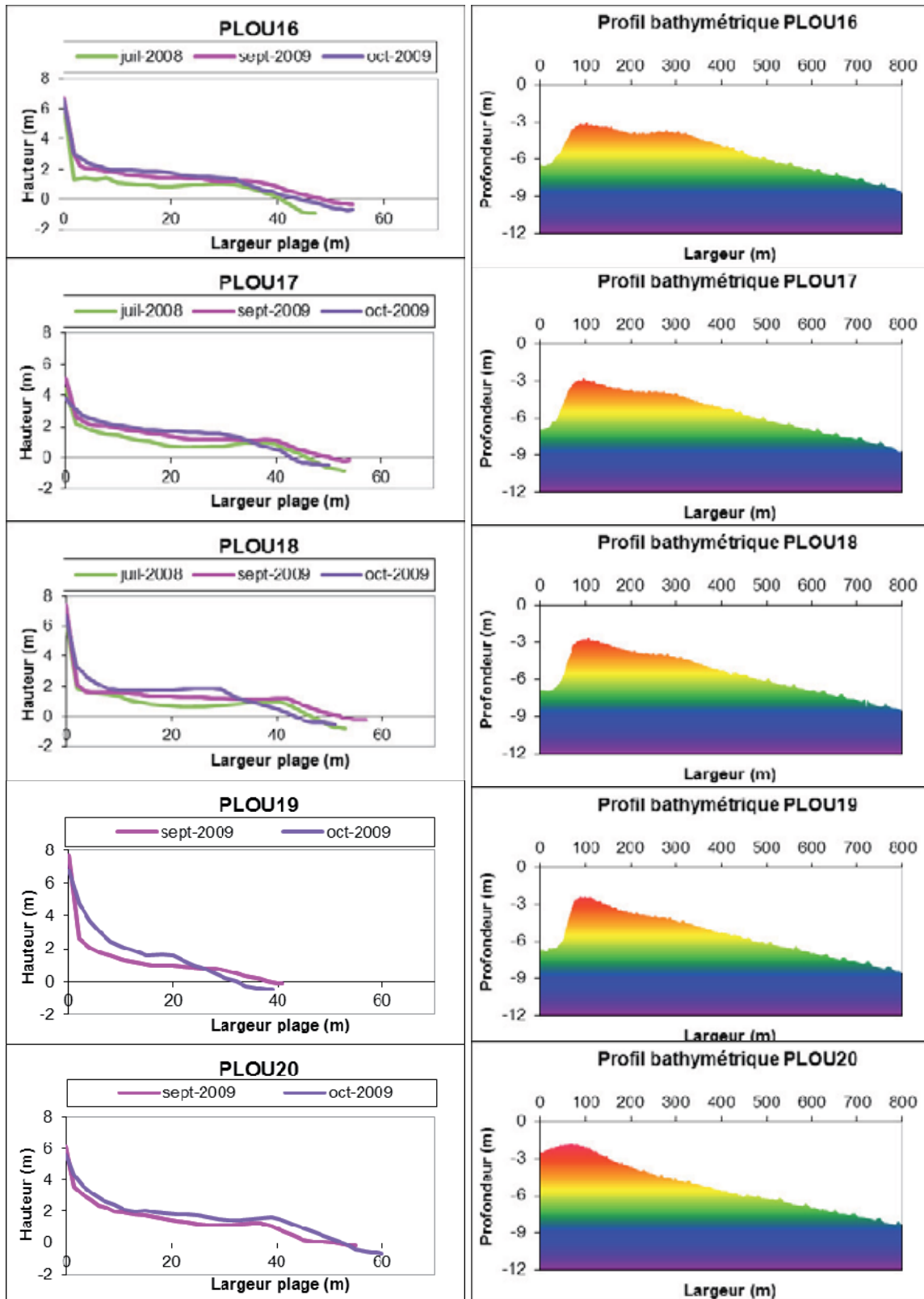


Figure 72. Profils de plage et profils bathymétriques de Pointe-aux-Loups (PLOU16-PLOU20)

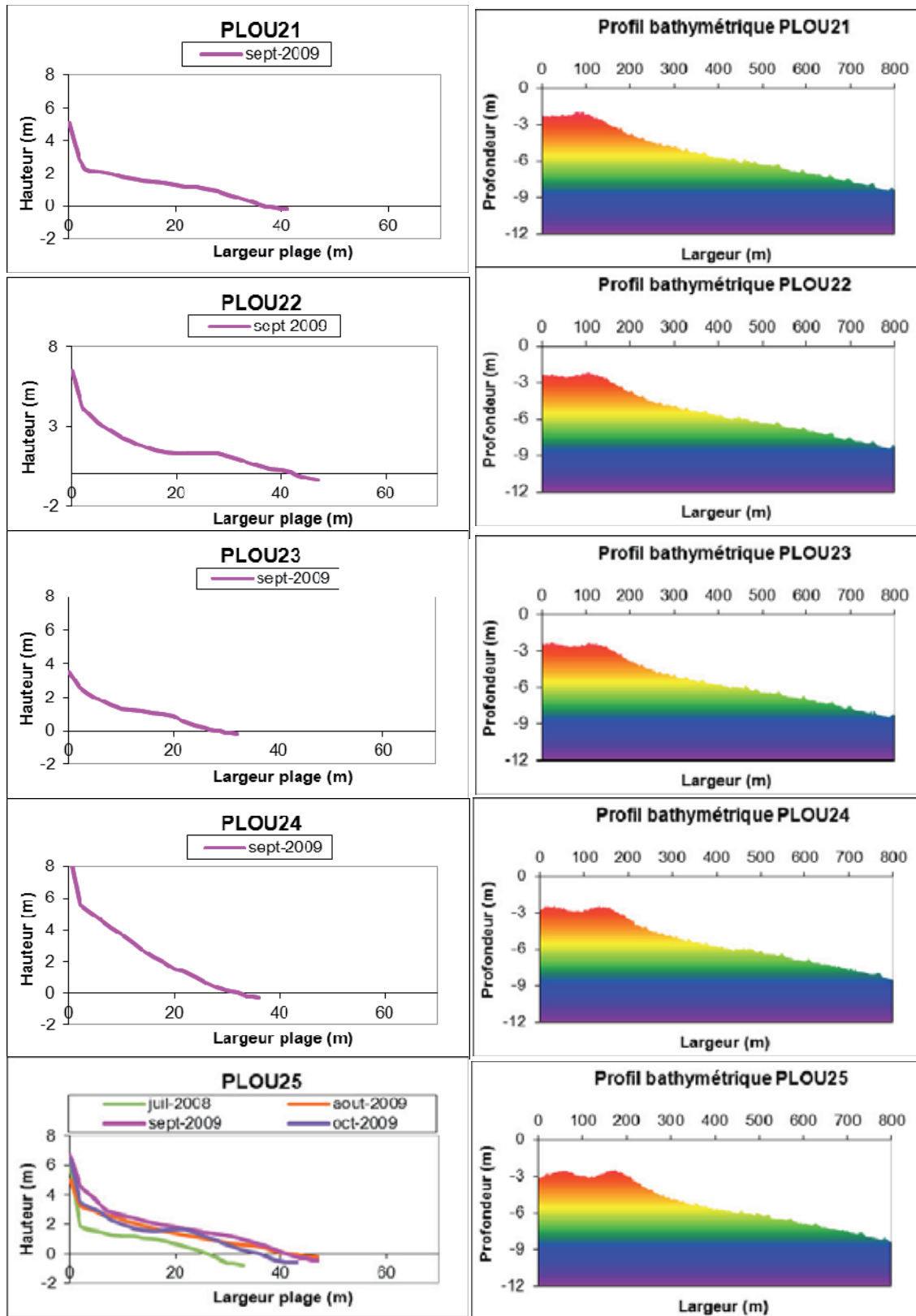


Figure 73. Profils de plage et profils bathymétriques de Pointe-aux-Loups (PLOU21-PLOU25)

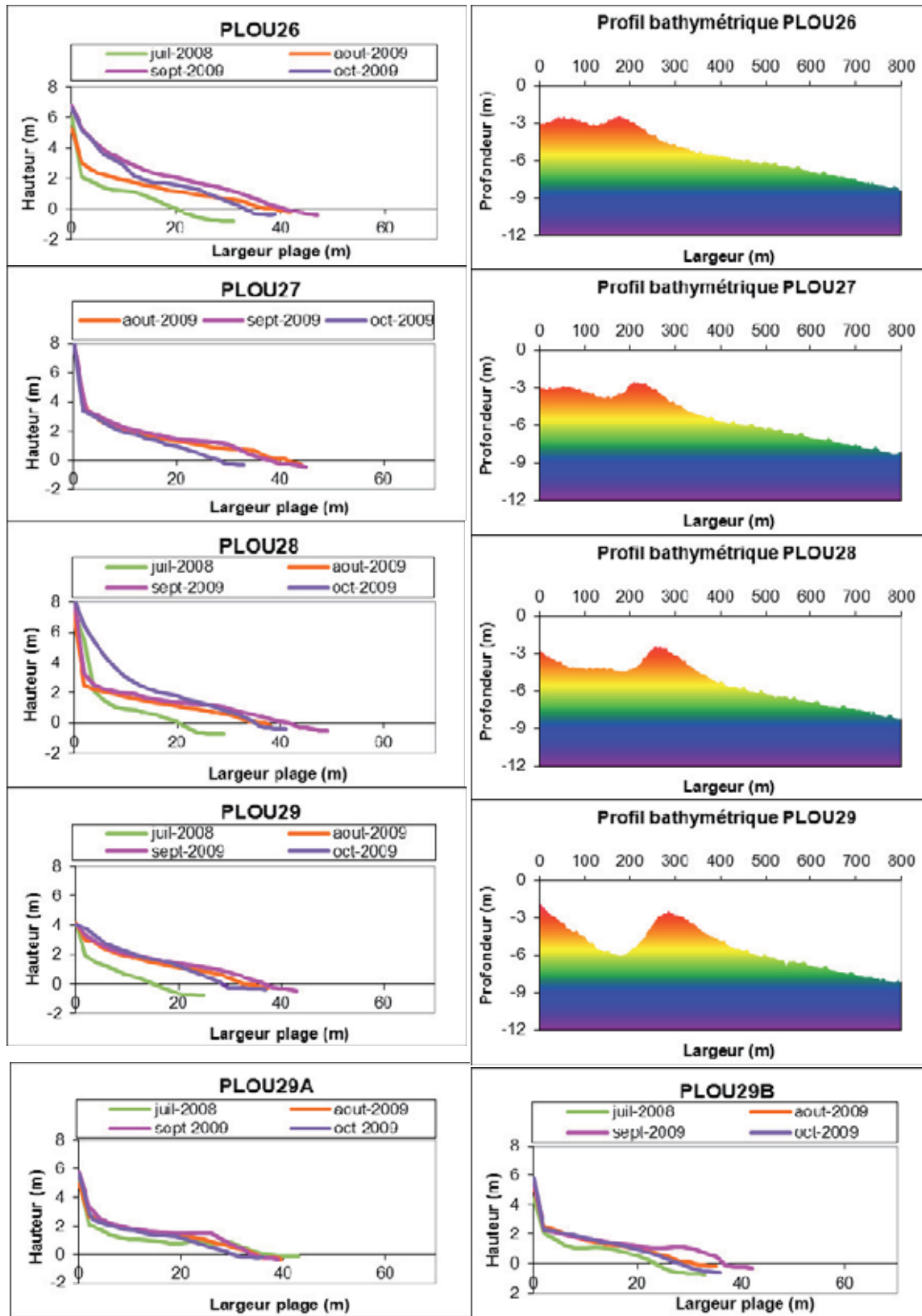


Figure 74. Profils de plage et profils bathymétriques de Pointe-aux-Loups (PLOU26-PLOU29B)

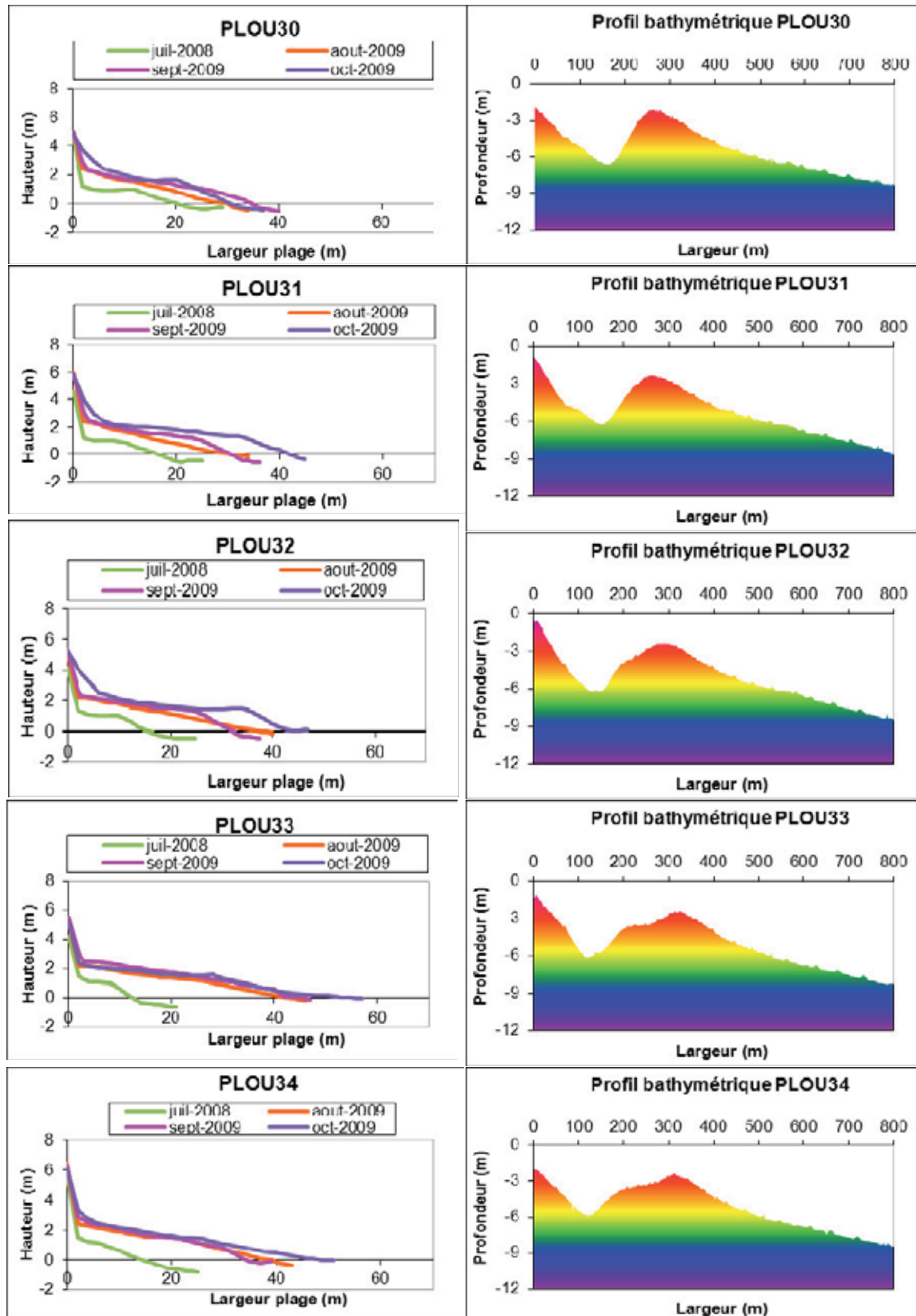


Figure 75. Profils de plage et profils bathymétriques de Pointe-aux-Loups (PLOU30-PLOU34)

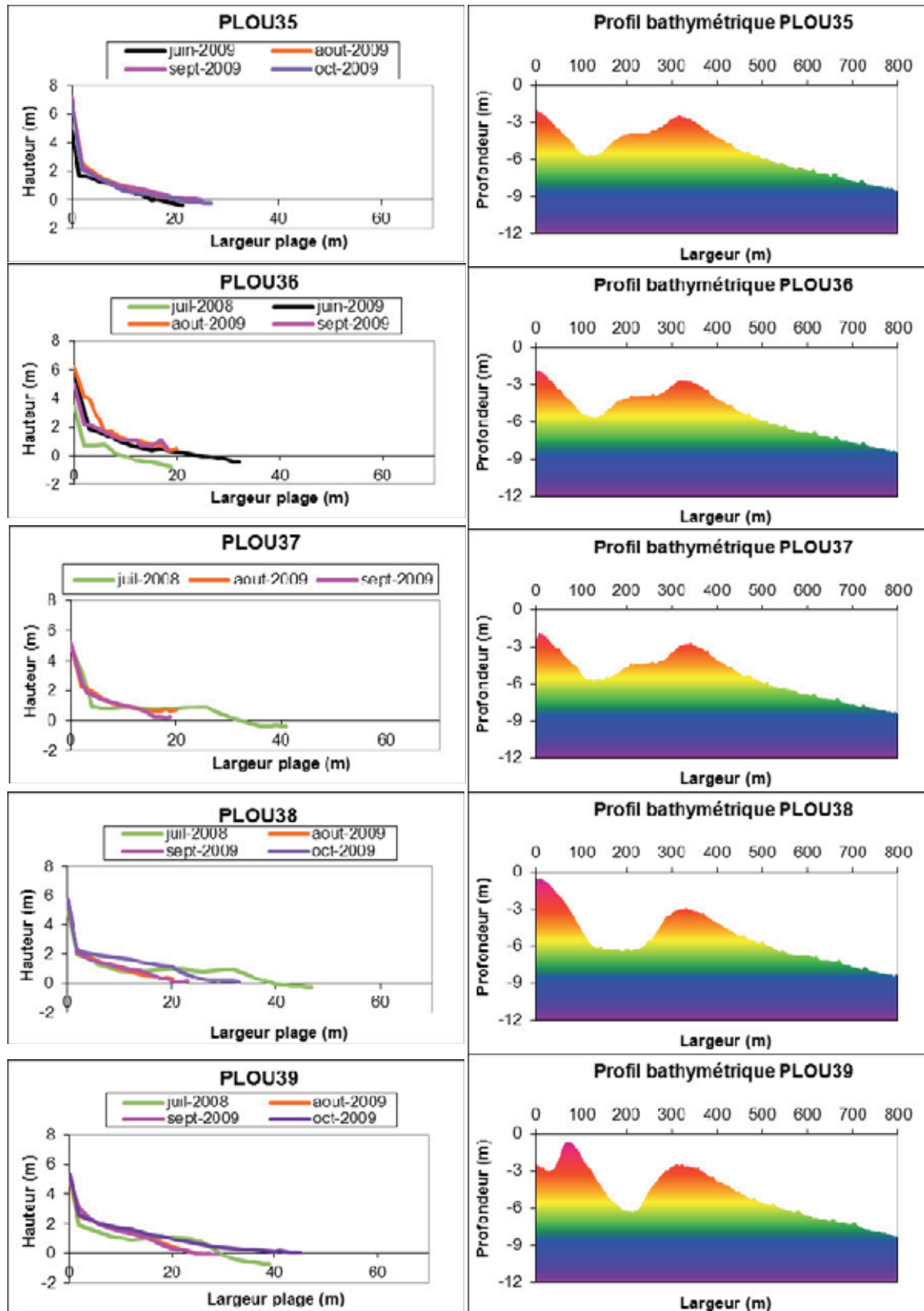


Figure 76. Profils de plage et profils bathymétriques de Pointe-aux-Loups (PLOU35-PLOU39)

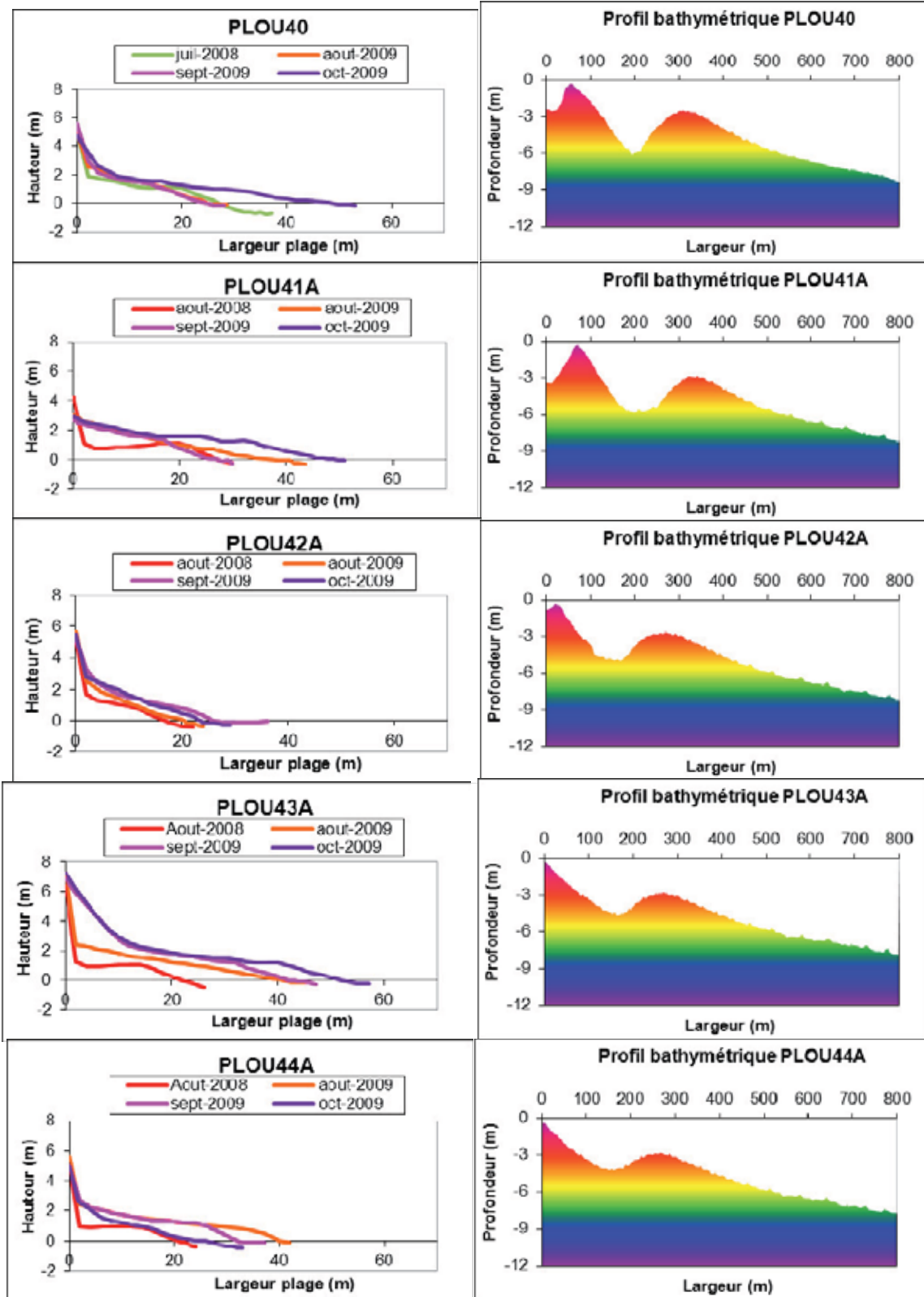


Figure 77. Profils de plage et profils bathymétriques de Pointe-aux-Loups (PLOU40-PLOU44A)

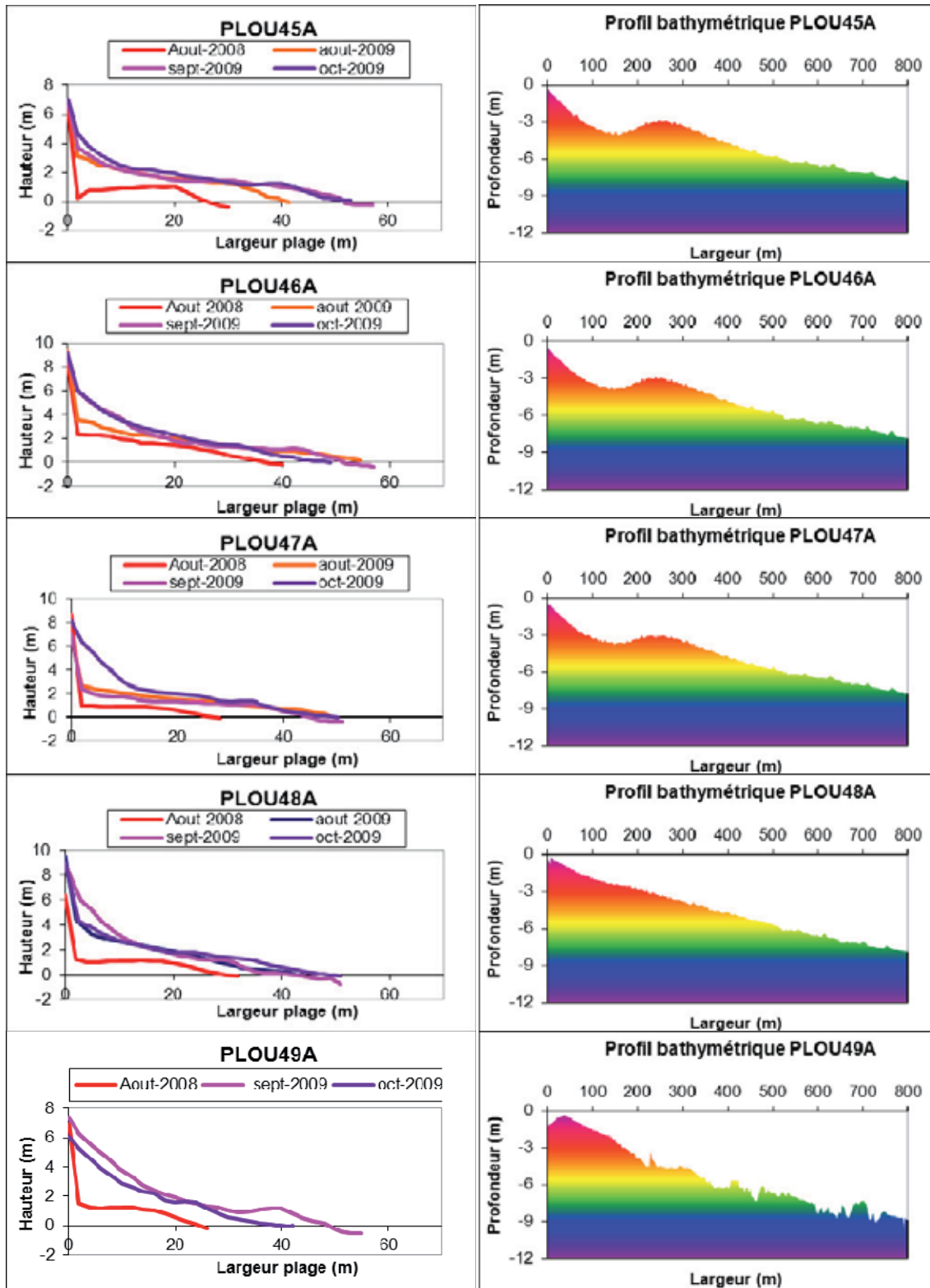


Figure 78. Profils de plage et profils bathymétriques de Pointe-aux-Loups (PLOU45A-PLOU49A)

➤ **Cellule hydrosédimentaire de Fatima [PLOU50 à 59 (figure 79)]**

L'état des plages dans cette partie de l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups est naturel. L'évolution spatiotemporelle des profils de plage de la cellule hydrosédimentaire de Fatima montre une tendance vers une diminution de la variabilité saisonnière des profils de plage en se dirigeant de la Pointe-aux-Loups vers le cap de l'Hôpital. Deux dynamiques évolutives sont observées au sein de cette cellule hydrosédimentaire.

En ce qui a trait à la partie nord de la cellule hydrosédimentaire, soit du centre de la cellule jusqu'à Pointe-aux-Loups (PLOU50 à PLOU54), les profils de plage révèlent des changements marqués, notamment dans la partie proche de la pointe (PLOU50 à PLOU53). Les profils de cette portion de plage décrivent une accrétion importante en 2008 et durant l'été 2009, suivie d'un démaigrissement du haut estran durant l'automne 2009. L'accrétion s'est traduite d'une part par un engraissement survenu au pied des dunes pouvant dépasser 1 m de haut, mais également par un élargissement du haut estran sur parfois plus de 10 m, comme cela a été le cas pour PLOU52. Le démaigrissement survenu durant l'automne 2009 s'est produit dans des proportions équivalentes, voire supérieures, dans le cas de PLOU50 et PLOU53, où un bilan sédimentaire négatif est enregistré. Le profil PLOU54 amorce la tendance vers la stabilité, puisque les changements survenus sont minimes, si ce n'est un faible ensablement survenu durant l'automne 2009 (figure 80).

À l'inverse, la partie sud de la cellule hydrosédimentaire (PLOU55 à PLOU59) semble relativement stable. Un faible rehaussement du haut de plage et de la partie inférieure du haut estran est cependant mesuré en 2009, dans la partie centrale (PLOU55 et PLOU56) (figure 81).

Enfin, les plages situées dans la partie sud présentent des pentes relativement plus faibles et des largeurs de plages beaucoup plus importantes. En effet, comparativement au reste de la cellule hydrosédimentaire où est relevée une largeur moyenne de 35 m, cette partie de Fatima affiche des largeurs de plages moyennes relativement importantes, variant de 45 à 67 m, avec une largeur moyenne de 53 m (figure 79).

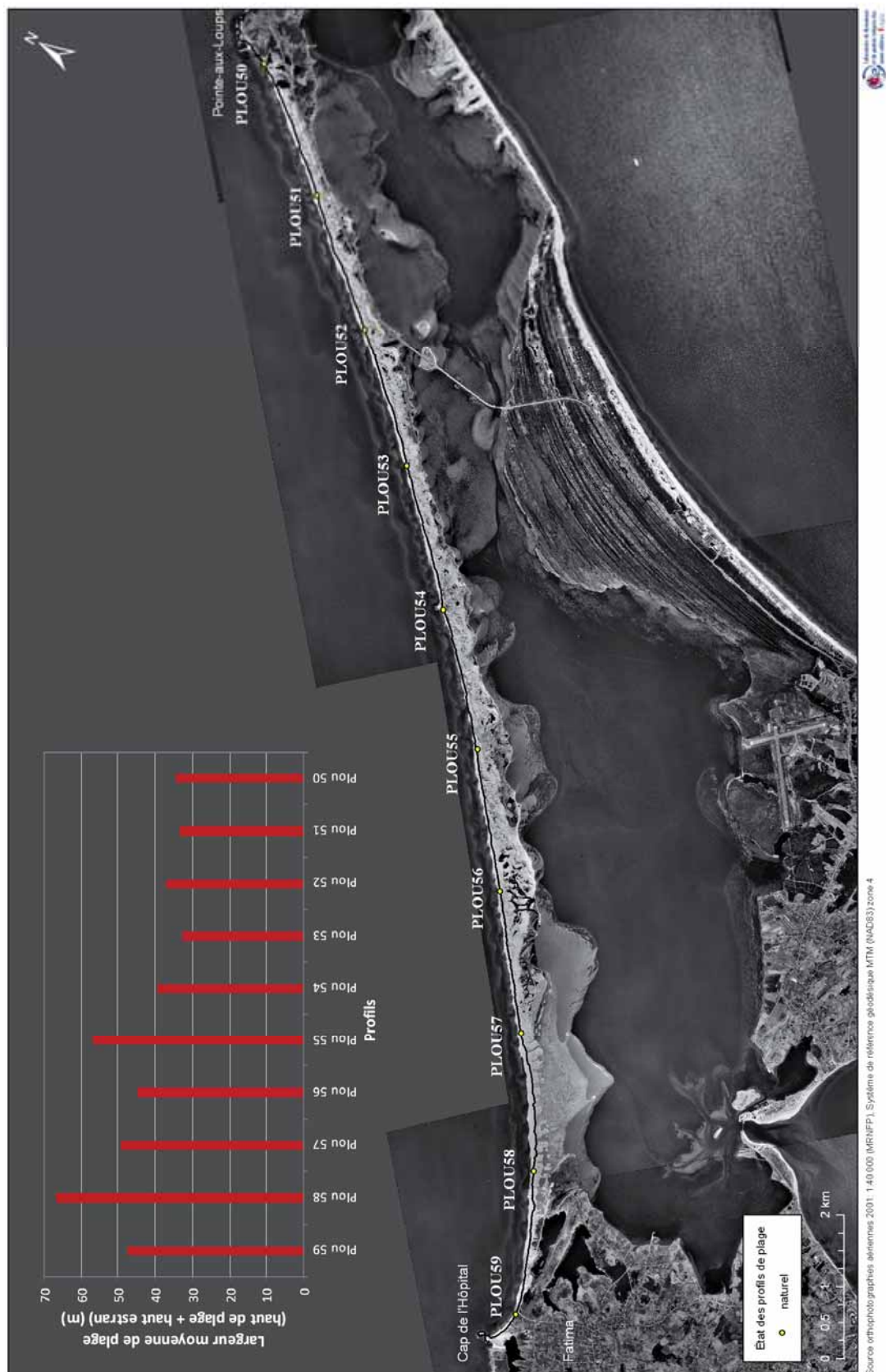


Figure 79. Largeurs moyennes de plage de la cellule hydrosédimentaire de Fatima

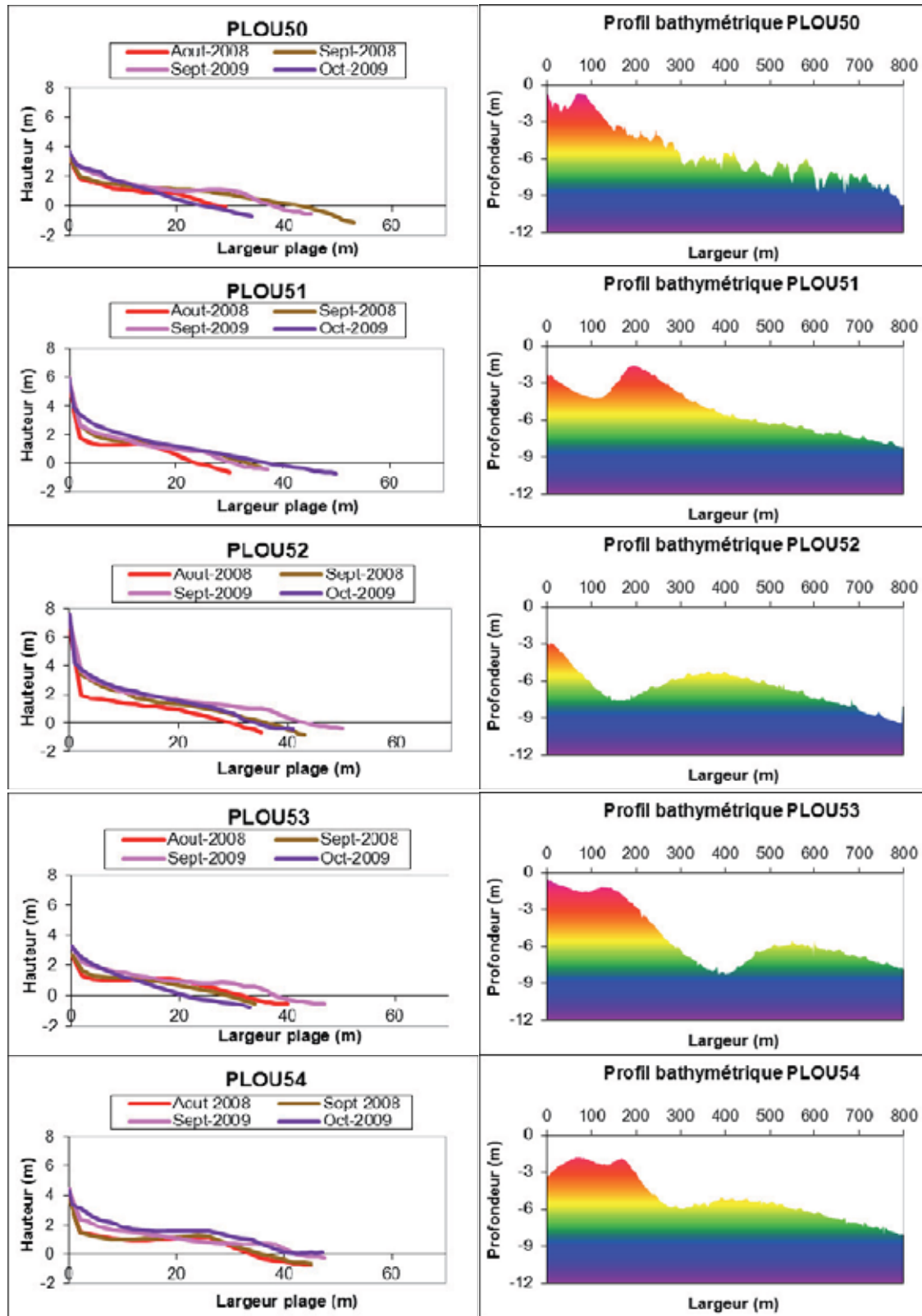


Figure 80. Profils de plage et profils bathymétriques de Fatima (PLOU50-PLOU54)

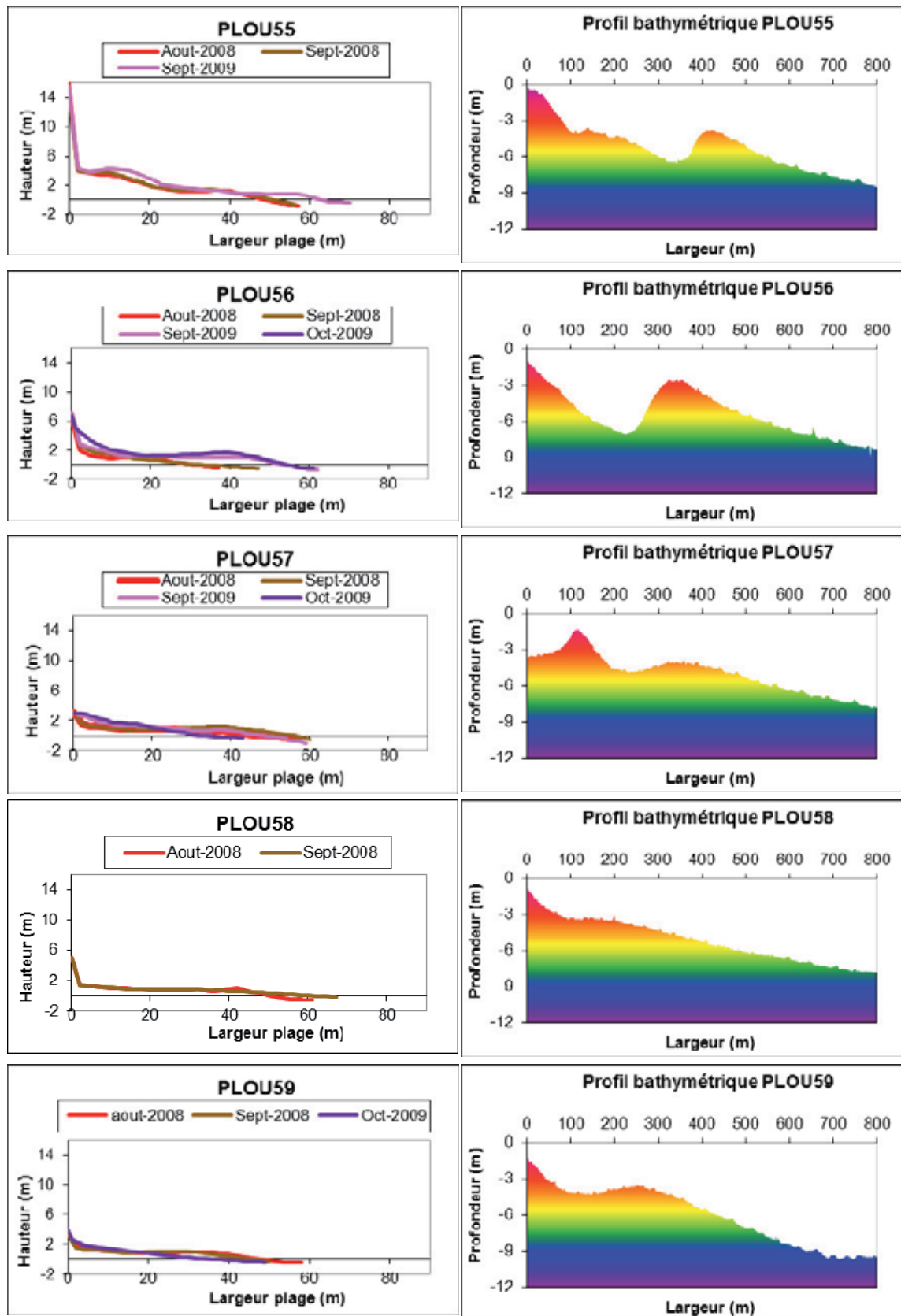


Figure 81. Profils de plage et profils bathymétriques de Fatima (PLOU55-PLOU59)

Bathymétrie de l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

Il est à noter qu'il y a environ de 200 à 400 m entre les relevés topographiques et les relevés bathymétriques pour cette zone (figures 82 et 83).

Les profils bathymétriques du secteur de Pointe-aux-Loups ne présentent pas de pentes régulières (figures 69-78 et 80-81). Ils sont en général constitués de deux ou trois parties. Celle située plus au large affiche des pentes relativement plus douces, de 0,48 à 2,30 %. Plus près de la côte, il est constaté un relèvement important pouvant atteindre une pente de 7 % sur plus de 200 m de large. Ces relèvements donnent naissance à deux cordons pré littoraux qui sont parallèles à la côte des cellules hydrosédimentaires de Pointe-aux-Loups et de Fatima. D'une largeur d'environ 130 m, ces cordons se situent à une distance maximale de 500 à 750 m au large. Ils présentent un rehaussement bathymétrique suffisant pour former une zone de déferlement des vagues, ce qui constitue une protection naturelle servant à absorber une partie de l'énergie des vagues. La source sédimentaire ayant permis une accrétion de la partie inférieure du haut estran proviendrait de ces cordons pré littoraux. Il est à noter qu'il n'a pas été constaté d'engraissement dans le secteur de la baie de Plaisance à la suite du passage de la tempête Danny. D'autre part, les profils bathymétriques dans cette partie des îles n'ont pas révélé l'existence de cordons pré littoraux. Ces différences font, d'une part, ressortir la particularité de la dynamique sédimentaire de chacun des secteurs et, d'autre part, soulignent le rôle du relief sous-marin de la zone d'avant-plage dans l'évolution saisonnière des plages. L'analyse de la géomorphologie des zones supratidale, intertidale et pré littorale, à l'aide des données topographiques et bathymétriques, montre clairement l'importance des échanges sédimentaires entre la plage et la zone sous-marine dans l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups. Les courants de retour qui forment les nombreux croissants de plage sont séparés par des sillons et des chenaux par lesquels les sédiments transitent pour alimenter des dunes sous-marines et les cordons pré littoraux. Selon les conditions océanographiques, une partie des sédiments sous-marins viennent à leur tour alimenter la plage, comme cela a été mesuré lors de la tempête Danny. Malgré le recul généralisé de la côte de l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups et les forts taux mesurés de 1963 à 2008, cette dynamique sédimentaire côtière-marine semble être en équilibre. Le système côtier à tombolo se maintient et se réajuste en fonction de la hausse du niveau marin relatif et suit une tendance naturelle à long terme en décrivant une migration continue vers la lagune. Le tarissement en sédiments des cordons pré littoraux pourrait cependant compromettre cet équilibre dynamique, mais rien n'indique pour le moment cette possibilité.

Enfin, le fond marin situé devant l'îlot rocheux de Pointe-aux-Loups montre une plus forte rugosité que pour le reste de la zone en raison d'un important dépôt glaciaire et fluvioglaciaire comportant de nombreux blocs cristallins. Ce dépôt constitue sans doute une source sédimentaire pour l'alimentation du littoral.

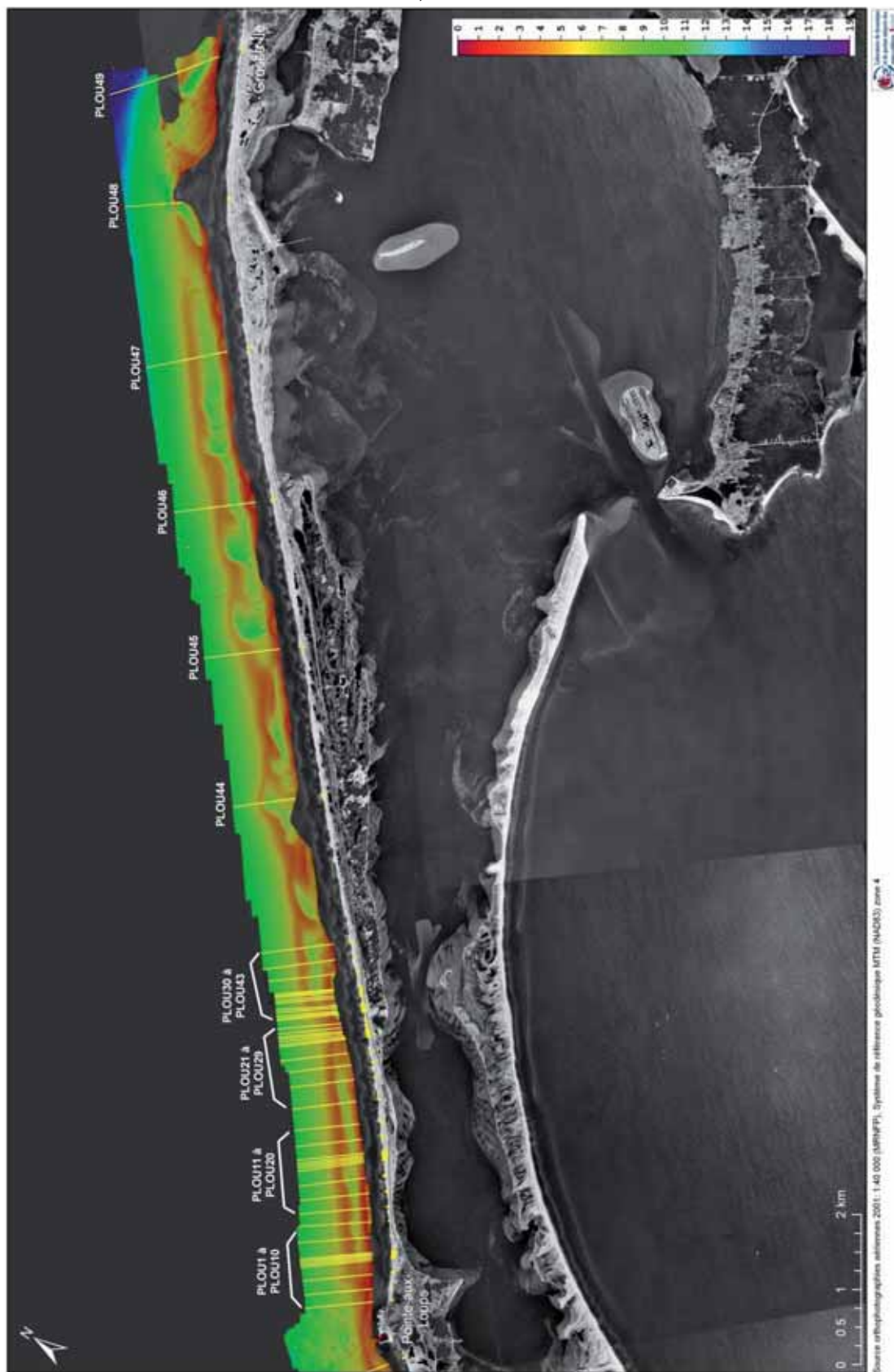
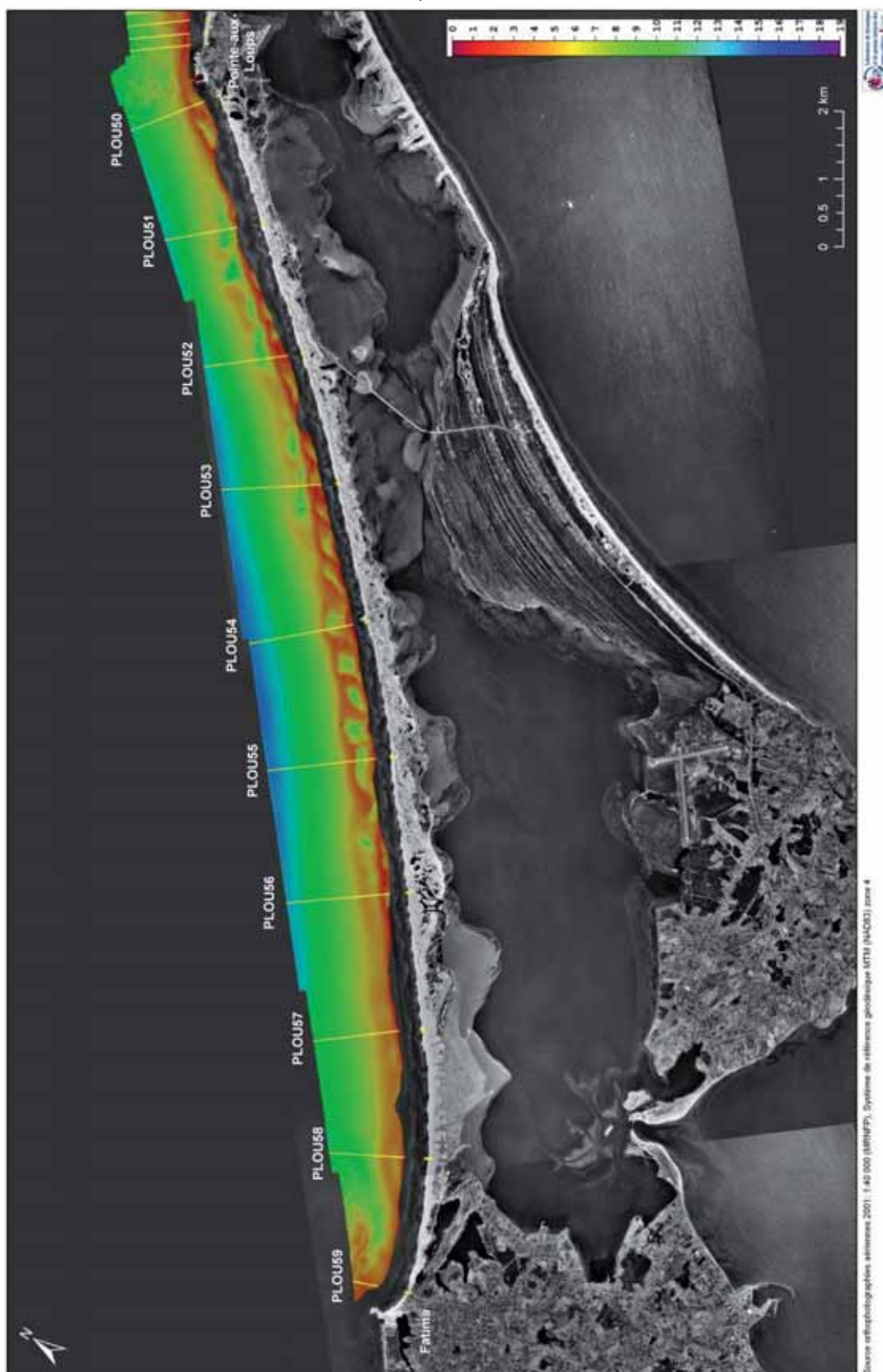


Figure 82. Carte bathymétrique avec localisation des profils bathymétriques et de plage de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups



5.2.2.3 Synthèse de l'évolution des profils de plage et bathymétriques

À la lumière des résultats de l'évolution temporelle des profils de plage, deux périodes distinctes semblent régir le transfert sédimentaire au niveau des plages. La première concerne la période automne-hiver. Elle est caractérisée par un abaissement du niveau des plages en bordure des enrochements (moyenne d'abaissement : 0,4 m). Cette situation est probablement induite, d'une part, par l'affouillement résultant du déferlement des vagues contre les ouvrages de protection qui remobilise les sédiments au pied des enrochements, mais aussi par une dérive littorale principale défavorable, charriant et transportant les sédiments remobilisés des extrémités de la baie vers le centre de celle-ci. La deuxième période, estivale, est caractérisée par des conditions favorables à un engraissement et un rehaussement du niveau des plages. L'abaissement du niveau des plages au pied des enrochements, mais aussi la disparition de la haute plage et du haut estran, nous porte à penser que cet engraissement est insuffisant pour compenser le démaigrissement survenu durant la période automne-hiver.

La partie adjacente aux enrochements n'en est pas moins affectée puisqu'un abaissement significatif du niveau des plages a été mesuré (0,4 m et même plus après de fortes houles : 0,6 m). L'effet de bout, qui en serait la cause, semble s'atténuer en s'éloignant de 75 m de l'enrochement.

La zone naturelle de la baie de Plaisance présente des conditions plutôt favorables à l'accumulation, puisqu'un élargissement des plages, mais aussi un engraissement au pied des dunes, y sont observés sur une bonne partie de la baie. C'est notamment le cas dans la partie centrale de la baie qui bénéficie d'apports sédimentaires provenant de la dérive littorale principale. C'est d'ailleurs ce facteur qui régirait l'évolution spatiale des largeurs de plage dans la baie, qui dévoile un accroissement de ces dernières en se dirigeant vers le centre de la baie.

L'évolution spatiale des largeurs de plage de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups fait apparaître un écart important entre la partie naturelle et la partie située au pied des enrochements, où il a été noté de faibles largeurs de plage.

L'allongement des structures rigides de protection pour prévenir l'érosion des secteurs à effet de bout ne ferait que déplacer le problème et engendrerait, à plus long terme, la disparition totale de la plage. L'engraissement artificiel des plages (recharge en sable) pourrait être une solution dans la mesure où elle s'inscrit dans un programme d'entretien et de recharge à long terme et que le volume déversé sur la plage est assez important pour soustraire complètement les enrochements à l'action des vagues, ce qui permettrait d'éviter la réflexion des vagues. Compte tenu du sens de la dérive littorale dans la baie de Plaisance, une recharge répétitive devra être envisagée, du moins jusqu'au retour des conditions d'équilibre pré-enrochement.

La constatation générale confirme une érosion accrue de la côte en bordure des enrochements et fait ressortir une situation critique étant donné la proximité des infrastructures routières qui, par endroits, sont à moins de 10 m du trait de côte.

6. BILAN SÉDIMENTAIRE DE LA ZONE CÔTIÈRE

Ce chapitre présente les résultats et l'analyse du bilan sédimentaire de la zone côtière basée sur les données acquises lors d'un relevé LiDAR aéroporté en septembre 2008 et les données bathymétriques acquises lors d'un relevé de juillet à septembre 2009. Le tableau 14 présente une synthèse des résultats pour les deux unités hydrosédimentaires. Une comparaison entre les compartiments et les cellules sera effectuée afin d'évaluer les secteurs où la quantité de sédiments du cordon dunaire est moins élevée. La distance entre les infrastructures permanentes et la ligne de rivage est mesurée à un intervalle de 50 m pour l'ensemble de la zone d'étude. L'analyse du volume de sédiments, du taux de recul historique et de l'indice du budget sédimentaire des plages permettront d'évaluer les secteurs où les infrastructures routières sont les plus vulnérables à l'érosion côtière.

Tableau 14. Synthèse des résultats pour les deux unités hydrosédimentaires à l'étude

	Surface totale (m ²)	Volume du cordon (m ³)	Largeur de plage moyenne (m)	Indice du budget sédimentaire moyen
Unité de la baie de Plaisance	2 633 096	5 363 817	35,72	22,02
Unité de Pointe-aux-Loups	9 700 760	28 552 487	36,97	48,89

6.1 Unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance

Les résultats sont présentés en fonction des deux secteurs de l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance (tableau 15). Pour calculer la surface, le volume, la largeur des plages et l'indice du budget sédimentaire des plages, le littoral a été divisé en 29 compartiments de 500 m de large. Le volume total de sédiments calculé pour la baie de Plaisance est de 6 031 135,73 m³, pour une surface totale de 2 633 096,8 m². Le volume sédimentaire du cordon dunaire est de 5 363 817 m³, ce qui correspond au volume entre la ligne de rivage et les infrastructures permanentes pour l'ensemble de l'unité hydrosédimentaire. L'indice du budget sédimentaire des plages moyen est de 22,02, avec un minimum de 0 et un maximum de 70,96.

Tableau 15. Synthèse des résultats pour l'unité de la baie de Plaisance et pour les deux cellules hydrosédimentaires

	Surface totale (m ²)	Volume du cordon (m ³)	Largeur de plage moyenne (m)	Indice du budget sédimentaire moyen
Unité de la baie de Plaisance	2 633 096	5 363 817	35,72	22,02
Secteur de La Martinique	963 079	2 104 954	36,49	23,48
Secteur du Cap	1 670 017	3 511 666	34,95	20,55

6.1.1 Secteur de La Martinique

6.1.1.1 Largeur des plages du secteur de La Martinique

La largeur des plages du secteur de La Martinique a été mesurée à un intervalle de 50 m, pour un total de 135 transects. Pour l'ensemble du secteur, la largeur de la plage minimale est de 0 m, la largeur maximale est de 108,7 m et la largeur moyenne est de 36,5 m. L'écart type est de 18,26 m. La distribution des largeurs de plage pour chacun des transects et la moyenne par compartiment sont présentées dans le graphique de la figure 84. Le secteur situé le plus au nord (BP1 et BP2) est celui où la largeur de la plage est la plus faible, puisque en réalité la plage est inexistante et correspond au kilomètre de la route 199 qui est enroché. La photographie de la figure montre le long transect où il n'y a pas de plage devant l'enrochement. Le compartiment BP3 est enroché sur les 350 m situés le plus au nord. La figure 85 montre une augmentation de la largeur de la plage à la fin de l'enrochement, passant de 18,6 m à 25,9 m sur une distance latérale de 50 m. La largeur de la plage augmente constamment vers le sud dans ce compartiment, passant de 0 à 25,6 m. Cette augmentation de la largeur est expliquée par la disponibilité des sédiments dans le secteur naturel ainsi que par le recul de la ligne de rivage.

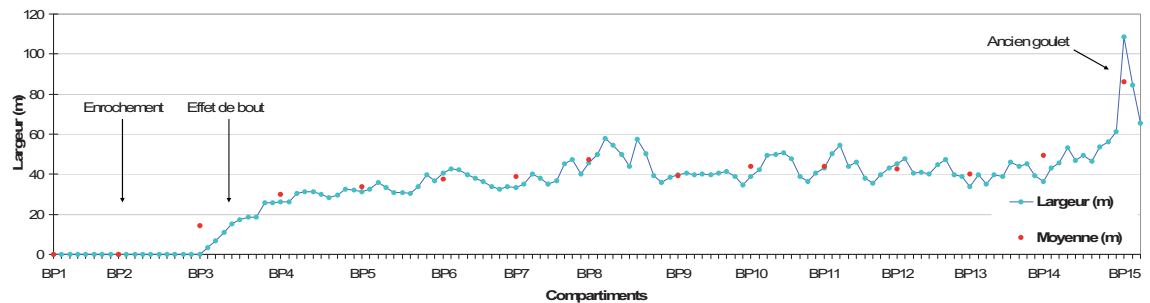


Figure 84. Largeur des plages au 50 m et moyenne par compartiment de 500 m pour le secteur de La Martinique



Figure 85. Portion de côte enrochée au nord du secteur de La Martinique

Pour les compartiments BP4 à BP14, la moyenne de la largeur de la plage est assez constante, variant de 29,8 m à 47,5 m, avec un écart type de 5,71. D'autre part, le compartiment situé le plus au sud (BP15) est celui où la largeur calculée est la plus grande, avec une moyenne de 86,2 m. Ce compartiment correspond à l'emplacement d'un ancien goulet et à la zone de confluence des deux dérives littorales, ce qui explique cette largeur moyenne des plages, plus élevée que la moyenne de l'ensemble de la cellule. Il s'agit d'une zone de réception des sédiments en transit, provenant tant du nord que du sud. Par ailleurs, il est possible d'affirmer que la fermeture de ce goulet de 1952 à 1953 (Dubois et Grenier, 1993) a permis la formation d'une grande plage. De plus, cette accumulation sableuse a un effet direct sur la largeur des plages du compartiment (BP14) adjacent au nord de l'ancien goulet où la moyenne est de 49,25 m.

6.1.1.2 Indice du budget sédimentaire des plages pour le secteur hydrosédimentaire de La Martinique

L'analyse de l'indice du budget sédimentaire des plages du secteur de La Martinique est basée sur le calcul de 135 transects. Pour chacun des compartiments, il y a environ 10 transects. La figure 86 présente la répartition spatiale de l'indice du budget sédimentaire des plages ainsi que le volume sédimentaire de la plage pour chacun des compartiments. Les compartiments BP5, BP6 et BP15 sont ceux où l'indice est le plus élevé. Les compartiments BP5 et BP6 bénéficient des apports sédimentaires provenant des processus éoliens qui rehaussent la partie supérieure de la plage, tout en étant situés immédiatement en aval d'une zone de forte érosion. En effet, la perte de sédiments des compartiments BP3 et BP4 semble se faire au profit de l'engraissement des compartiments BP5 et BP6 en raison des apports sédimentaires provenant de la dérive littorale. La largeur de la plage élevée du compartiment BP15, à l'emplacement de l'ancien goulet, explique pourquoi l'IBSP est aussi élevé et que le volume sédimentaire de ce secteur ($77\,911\text{ m}^3$) est trois fois plus grand que le volume moyen par compartiment ($23\,861\text{ m}^3$) pour cette cellule hydrosédimentaire. Comme nous l'avons mentionné, l'édification d'un complexe dunaire et la progradation de la ligne de rivage devant ce secteur expliquent ce fort indice (figures 49 et 50).

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

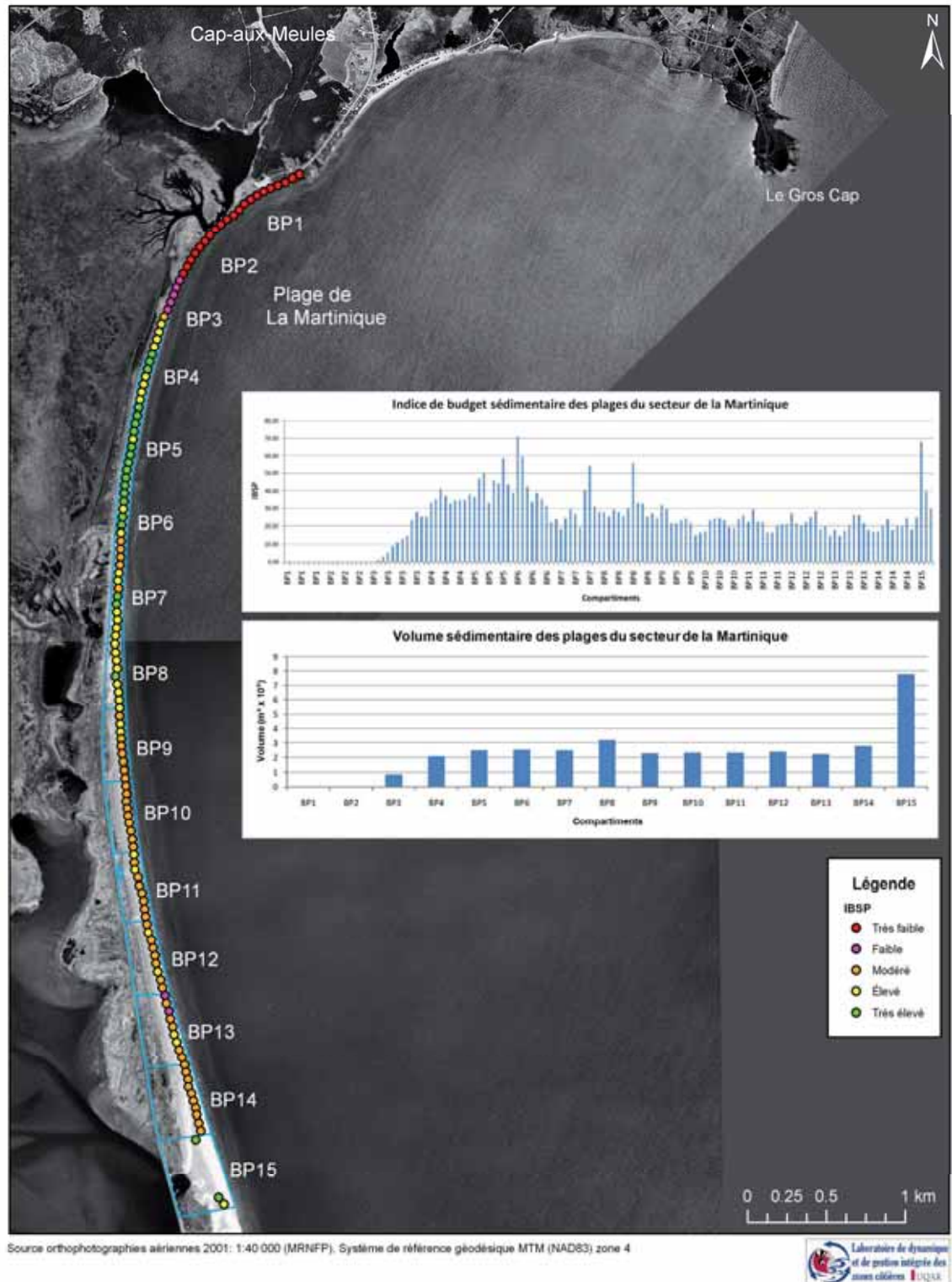


Figure 86. Indice du budget sédimentaire des plages et volume sédimentaire des plages du secteur de La Martinique

Le tableau 16 présente le nombre de transects et le pourcentage représenté pour chacune des classes. La classe ayant le pourcentage le plus élevé est la classe *modérée* avec 37,78 %, se situant principalement dans les compartiments BP9 à BP14.

Tableau 16. Indice du budget sédimentaire des plages pour le secteur hydrosédimentaire de La Martinique

	Très faible	Faible	Modéré	Élevé	Très élevé	Total
N^{bre} de transects	21	7	51	34	22	135
Pourcentage (%)	15,56	5,19	37,78	25,19	16,30	100

L'ensemble des transects de la classe *très faible* de l'IBSP est situé dans le secteur enroché situé au nord du secteur de La Martinique (figure 87). En effet, ce secteur est caractérisé par une absence complète de plage au sens strict. Une augmentation graduelle de la valeur de l'indice vers le sud est visible, allant jusqu'à la classe *très élevée* dans les compartiments BP5 et BP6. De plus, l'altitude moyenne de la ligne de rivage pour le secteur enroché (base de l'enrochement) est de 0,65 m, alors que l'altitude moyenne de la ligne de rivage du secteur naturel (BP3 et BP4) est de 2,14 m et de 2,35 m pour BP5 et BP6. Seulement les quatre points de mesure situés le plus au sud de l'enrochement ont une altitude supérieure à 1 m.

**CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.**

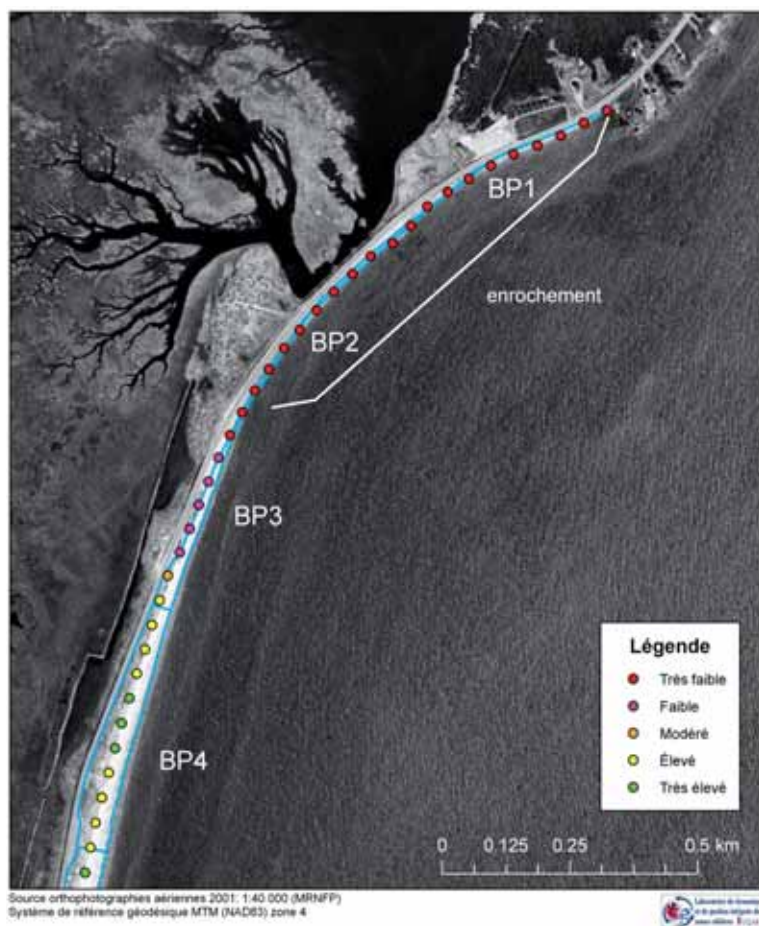


Figure 87. Indice du budget sédimentaire des plages du secteur enroché

6.1.1.3 Volume sédimentaire et largeur du cordon dunaire du secteur de La Martinique

L'analyse du volume sédimentaire du cordon dunaire du tombolo de La Martinique est basée sur 15 compartiments d'une largeur de 500 m chacun. La figure 88 permet de visualiser spatialement le volume sédimentaire et la largeur du cordon dunaire. L'analyse des deux graphiques permet d'observer qu'il existe une relation entre le volume sédimentaire et la largeur du cordon dunaire.

Comme la limite interne utilisée pour tracer le cordon est la limite de la route ou de l'enrochement, il est normal en ce sens, pour les compartiments BP1 et BP2, que le volume sédimentaire calculé soit de 0 m³ et que la largeur du cordon dunaire soit nulle. Une légère augmentation est remarquée pour le compartiment BP3. Par ailleurs, l'effet de bout fait en sorte que le volume sédimentaire est faible. Il est aussi responsable du fait que le taux de recul historique de la ligne de rivage pour ce compartiment est le plus élevé de l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance, avec un recul moyen de -0,51 m/an pour la période de 1963 à 2008 (figure 89). Pour les compartiments BP4 à BP14, le volume du cordon varie principalement en fonction de la distance entre la ligne de rivage et la route 199. Le plus grand volume (184 609 m³) du compartiment BP9 est expliqué par l'altitude élevée du cordon dunaire, comparativement aux compartiments BP10 et BP11 qui ont des largeurs de cordons semblables. La différence entre BP8 et BP9 s'explique plutôt par la plus faible largeur du cordon dunaire pour BP8. Pour le compartiment BP15 (ancien goulet), les résultats du volume de sédiments font ressortir que, bien que ce secteur présente une très grande largeur de plage et un IBSP élevé, le volume de sédiments en réserve pour le cordon dunaire est plutôt faible comparativement aux compartiments adjacents, de sorte qu'il représente tout de même une zone vulnérable en cas de tempêtes violentes.

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
 DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
 ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

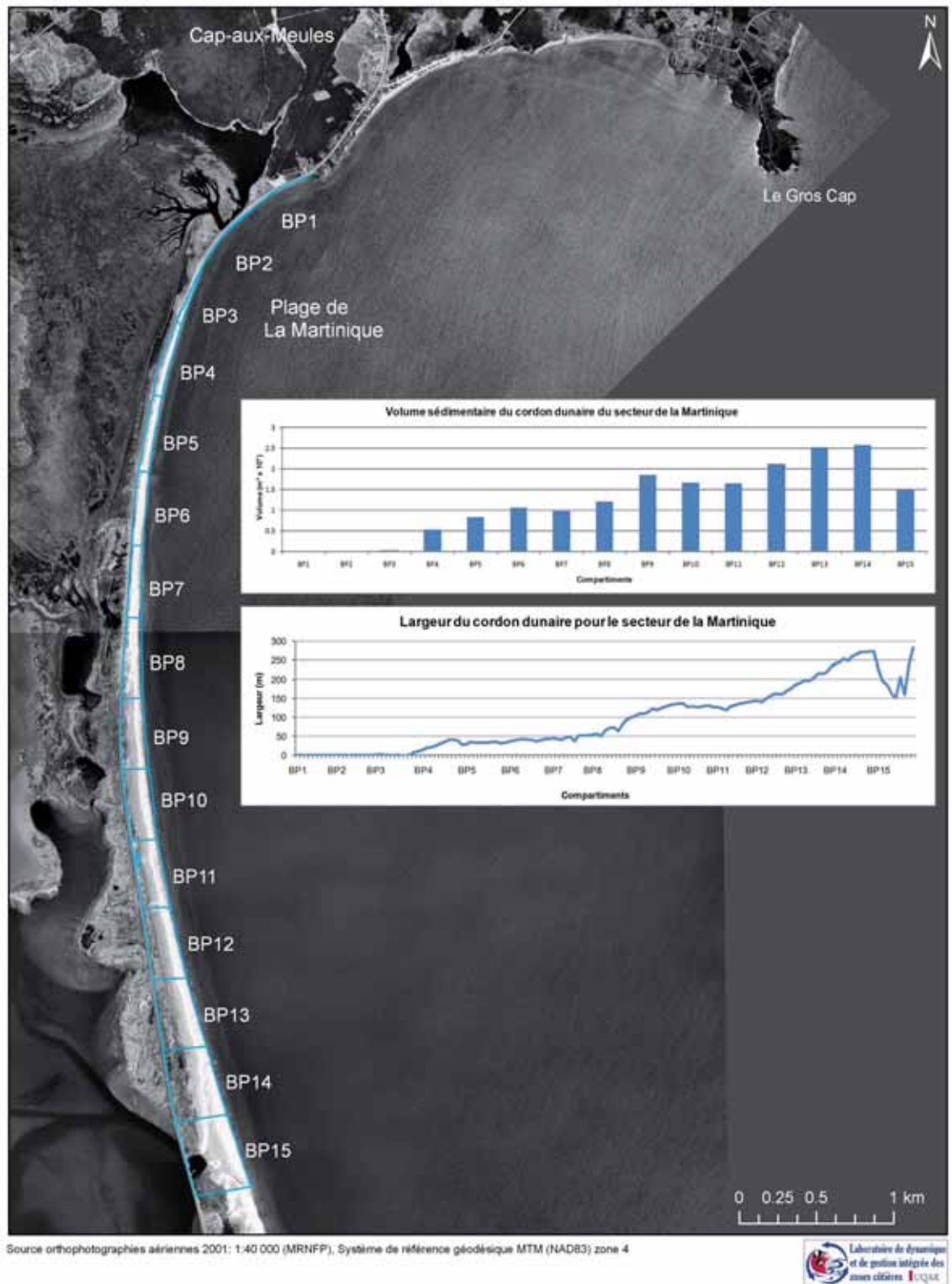


Figure 88. Volume sédimentaire et largeur du cordon dunaire du secteur de La Martinique

Une moyenne des taux de migration historique de la ligne de rivage (1963-2008) a aussi été calculée en fonction de compartiments de 500 m de largeur. Les taux d'érosion les plus élevés et les taux d'accumulation les plus faibles correspondent aux compartiments où la largeur et le volume du cordon dunaire sont les plus faibles (BP1 à BP8). Ces résultats révèlent que, dans ce secteur, la route 199 présente une vulnérabilité assez élevée aux événements de tempête. Le taux de migration le plus élevé (+4,60 m) se situe à l'emplacement de l'ancien goulet (BP15). Malgré cette constatation, ce secteur présente une vulnérabilité modérée en raison de la largeur et du volume de sédiments du cordon qui sont plus restreints que dans les zones adjacentes. En somme, la vulnérabilité de l'infrastructure routière face à l'érosion côtière varie principalement en fonction du volume sédimentaire et de la largeur du cordon dunaire. En ce sens, l'analyse de ces paramètres montre que la partie nord de l'unité hydrosédimentaire est plus vulnérable que la partie sud. De plus, en raison de l'absence d'accrétion devant le secteur enroché, jumelée au volume et à la largeur nuls du cordon dunaire ainsi qu'à l'abaissement du niveau de la plage, fait en sorte que ce secteur et celui situé immédiatement en aval sont les plus à risque.

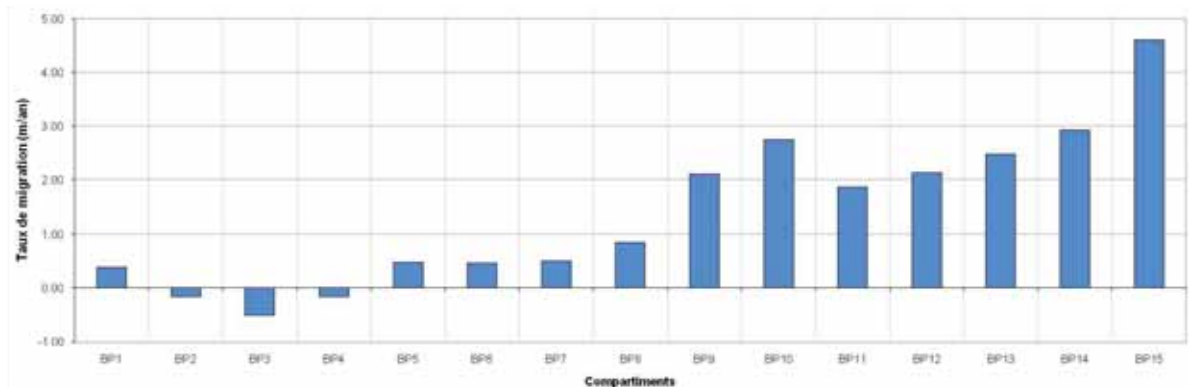


Figure 89. Taux de migration historique de la ligne de rivage (1963-2008) par compartiment de 500 m pour le secteur de La Martinique

6.1.2 Secteur du Cap

6.1.2.1 Largeur des plages du secteur du Cap

La largeur des plages du secteur du Cap a été mesurée à un intervalle de 50 m, pour un total de 126 transects (figure 90). Pour l'ensemble du secteur, la largeur de la plage minimale est de 14,1 m, la largeur maximale est de 85,2 m et la largeur moyenne est de 34,9 m. L'écart type de l'ensemble des largeurs de plage est de 12,50. Par ailleurs, la dynamique géomorphologique locale peut contribuer à la variabilité spatiale. La différence entre les largeurs de plage calculées à partir des profils (chapitre 5) et celles de ce chapitre s'explique par le fait que les largeurs calculées

ici n'intègrent pas le haut de plage et correspondent seulement au haut estran (plage au sens strict).

Les largeurs de plage des compartiments BP16 et BP17 sont largement influencées par la présence de l'ancien goulet (BP15). La dérive littorale, allant du sud vers le nord (figure 21), contribue au transport de sédiments vers le nord, ce qui explique que ces compartiments ont des moyennes de largeurs de plage respectives de 59 m et de 59,4 m, ce qui est plus élevé que la moyenne globale de ce secteur. Pour ces deux compartiments, les largeurs de plage moins élevées ont été mesurées devant le cordon dunaire résiduel. Les plages situées le plus au sud (BP28 et BP29), soit en amont de la dérive littorale, sont les moins larges du secteur du Cap.

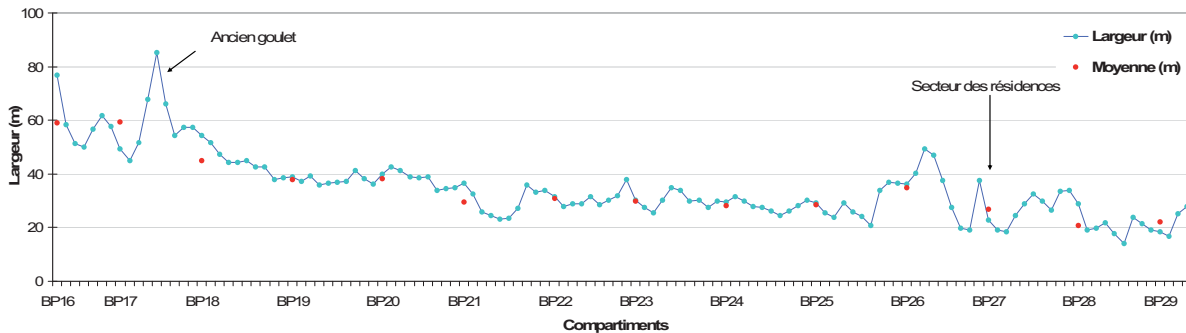


Figure 90. Largeur des plages au 50 m et moyenne par compartiment de 500 m pour le secteur du Cap

Une vingtaine de résidences ou de chalets sont situés à moins de 45 m de la ligne de rivage dans les compartiments BP26 à BP28, sur le chemin de la Baie-de-Plaisance. La figure 91 montre que, devant le secteur résidentiel, la largeur de la plage varie de 18,4 m à 37,7 m, avec une moyenne de 32,3 m pour un total de 10 transects mesurés. Dans plus de la moitié du secteur, il y a un haut de plage végétalisé ou semi-végétalisé au pied de la dune, ce qui présente une certaine stabilité malgré la faible largeur de la plage, comparativement au secteur situé plus au nord.

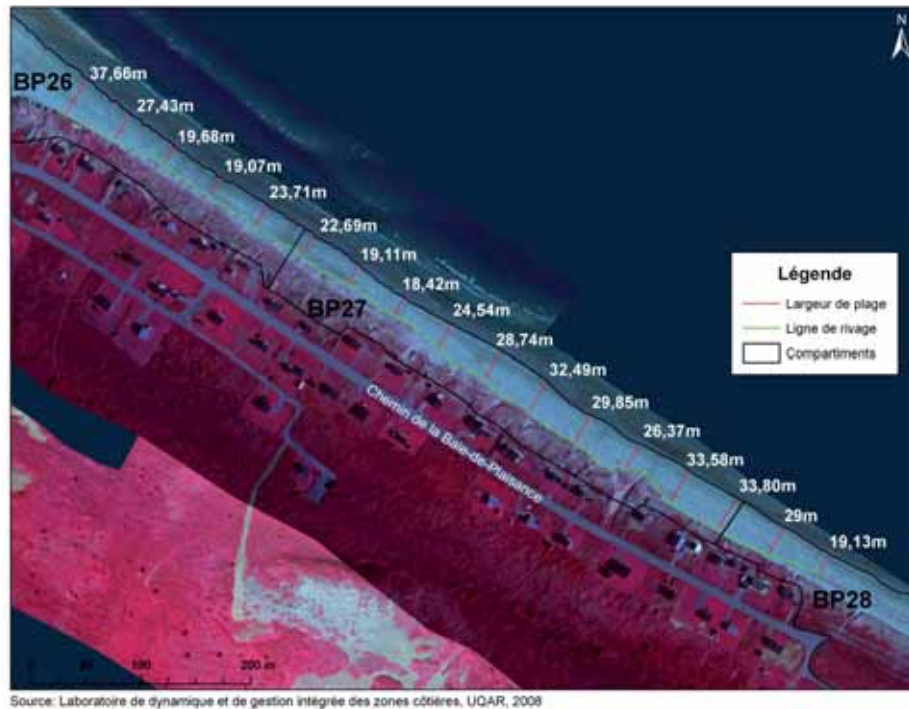


Figure 91. Largeurs de la plage dans le secteur des résidences du chemin de la Baie-de-Plaisance

6.1.2.2 Indice du budget sédimentaire des plages pour le secteur du Cap

L'analyse de l'indice du budget sédimentaire des plages du secteur du Cap est basée sur le calcul de 124 transects. Pour chacun des compartiments, il y a environ 10 transects, sauf pour les compartiments BP16 et BP17 qui contiennent respectivement 7 et 8 transects en raison de l'ancien goulet, et le compartiment BP29 où il y a seulement 4 transects de mesure en raison de sa faible largeur. La figure 92 montre la distribution spatiale de l'IBSP ainsi que le volume sédimentaire des plages par compartiment de 500 m. Près des deux tiers (60,29 %) des transects font partie de la classe *modérée* (tableau 17). La majorité de ceux-ci sont situés dans les compartiments BP16 à BP24. Les compartiments BP26 à BP28, correspondant au secteur de résidences, sont ceux où l'indice est *faible*. Cette observation concorde avec le volume et la largeur du cordon dunaire, le taux de migration de la ligne de rivage ainsi que les largeurs de plage plus faibles pour ce secteur. Les classes extrêmes sont très peu représentées dans ce secteur avec 0 et 2,42 % pour les classes *très faible* et *très élevé*.

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

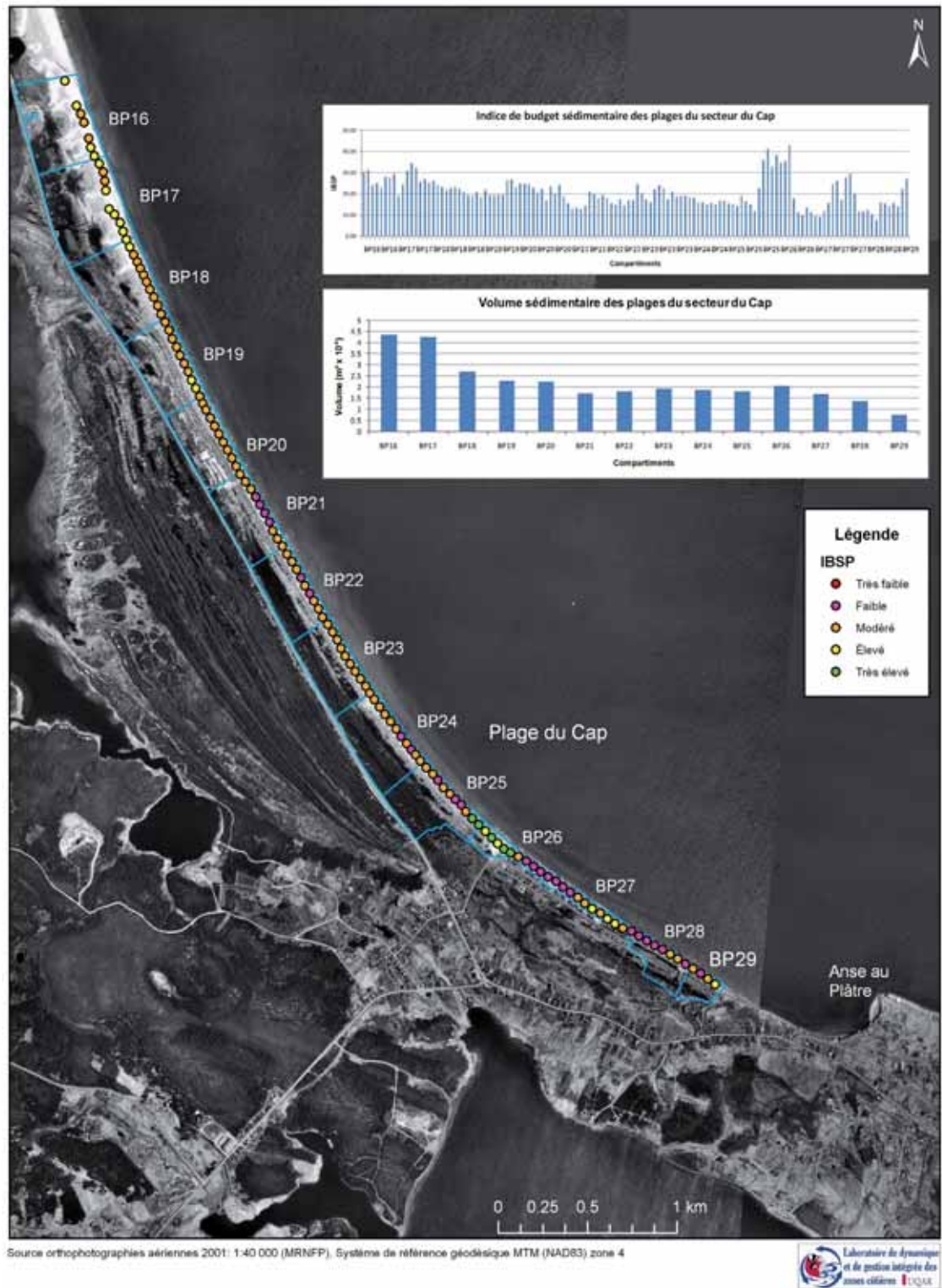


Figure 92. Indice du budget sédimentaire des plages et volume sédimentaire des plages du secteur du Cap

Tableau 17. Indice du budget sédimentaire des plages pour le secteur du Cap

	Très faible	Faible	Modéré	Élevé	Très élevé	Total
N^{bre} de transects	0	25	76	20	3	124
Pourcentage (%)	0	20,16	61,29	16,13	2,42	100

6.1.2.3 Volume sédimentaire et largeur du cordon dunaire du secteur du Cap

L'analyse du volume sédimentaire et de la largeur du cordon dunaire du secteur du Cap est basée sur 14 compartiments d'une largeur de 500 m chacun. Par contre, le compartiment BP29 a une largeur d'environ 225 m, puisqu'il se trouve à la fin du segment. La figure 93 montre la distribution spatiale des valeurs de volume sédimentaire et de la largeur du cordon dunaire.

Le volume sédimentaire un peu moins élevé pour le compartiment BP16 est expliqué par la présence de l'ancien goulet situé juste au nord. Ainsi, bien que la largeur de la plage soit plus grande dans ce secteur, le volume sédimentaire du cordon dunaire est relativement faible. La réduction de la largeur du cordon dunaire au compartiment BP17 s'explique par la présence de trouées dans le cordon. Le secteur où le volume sédimentaire est le moins grand est le secteur des résidences du chemin de la Baie-de-Plaisance qui correspond au secteur présenté dans la figure 91. Ce faible volume s'explique par la faible largeur du cordon dunaire devant les résidences. En effet, la limite arrière du calcul de volume a été tracée à une distance de 5 m devant les résidences. En ce sens, la totalité du cordon dunaire n'est pas considérée comme étant une source sédimentaire disponible pour le littoral. Le faible volume du cordon dunaire du compartiment BP29 est principalement expliqué par sa faible superficie (32 207 m², comparativement à une moyenne de 114 617 m²).

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

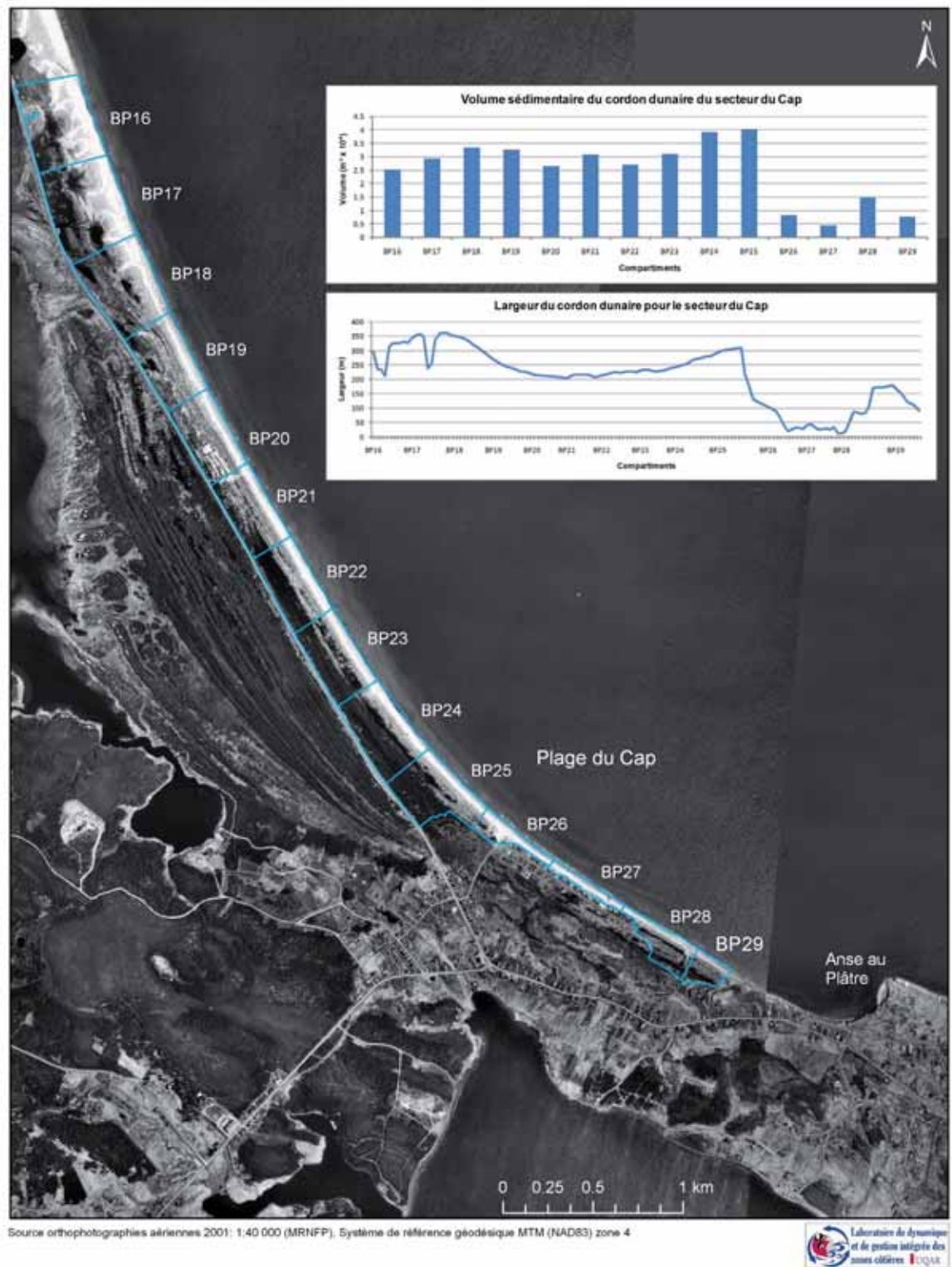


Figure 93. Volume sédimentaire et largeur du cordon dunaire du secteur du Cap

Le taux de migration historique de la ligne de rivage est positif pour tout le secteur du Cap (figure 94). Les taux les plus élevés correspondent au secteur où la largeur du cordon dunaire est la plus grande, montrant bien la progradation du système. Le taux d'avancement le plus élevé (2,07 m/an) est situé dans le compartiment BP16, adjacent à l'ancien goulet localisé au nord. Les taux de migration les plus faibles correspondent au secteur des résidences situé en amont de la dérive littorale. L'analyse des résultats montre que le secteur le plus vulnérable, considérant le volume et la largeur du cordon dunaire ainsi que le taux de migration, est le secteur des résidences, situé au sud du secteur du Cap. En ce qui concerne la route 199, le volume sédimentaire du cordon et la largeur entre la route et la ligne de rivage sont assez constants sur le deux tiers nord du secteur, ce qui ne permet pas de cibler un secteur plus vulnérable qu'un autre. Toutefois, les compartiments BP20 à BP22 ainsi que le compartiment BP16 seraient les plus à surveiller.

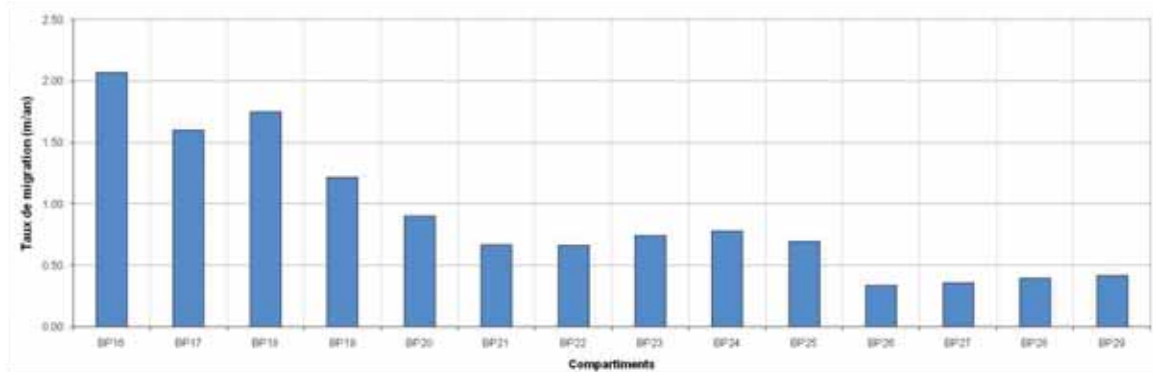


Figure 94. Taux de migration historique de la ligne de rivage (1963-2008) par compartiment de 500 m pour le secteur du Cap

6.2 Unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

Le volume de sédiments du cordon dunaire calculé pour l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups est de 28 552 487 m³ et le volume total des plages est de 2 014 975 m³, pour une surface totale de 9 700 760 m² (tableau 18). Les analyses sont basées sur les résultats de 696 transects perpendiculaires à la plage et de 73 compartiments. La largeur moyenne des plages de l'unité hydrosédimentaire est de 37 m, mais les plages de la cellule de Fatima sont en moyenne plus large (40,5 m) que les plages de la cellule de Pointe-aux-Loups (33,5 m). L'indice du budget sédimentaire des plages présente une moyenne de 48,89, avec un minimum de 0,53 et un maximum de 209,13.

Tableau 18. Synthèse des résultats pour l'unité de Pointe-aux-Loups et pour les deux cellules hydrosédimentaires

	Surface totale (m ²)	Volume cordon (m ³)	Largeur de plage moyenne (m)	Indice du budget moyen
Unité de Pointe-aux-Loups	9 700 760	28 552 487	36,97	48,89
Cellule de Fatima	6 589 342	19 259 188	40,47	47,92
Cellule de Pointe-aux-Loups	3 111 417	9 293 299	33,47	49,86

6.2.1 Cellule hydrosédimentaire de Fatima

6.2.1.1 Largeur des plages de la cellule hydrosédimentaire de Fatima

La largeur des plages de la cellule hydrosédimentaire de Fatima a été mesurée à un intervalle de 50 m, pour un total de 361 transects. Le secteur a aussi été séparé en 38 compartiments d'une largeur de 500 m chacun. Pour l'ensemble de la cellule hydrosédimentaire, la largeur de la plage minimale est de 10,6 m, la largeur maximale est de 108,9 m et la largeur moyenne est de 40,5 m. L'écart type pour l'ensemble de la cellule de Fatima est de 18,34. La figure 95 illustre bien l'aspect en dents de scie de la largeur de la plage. Cette géomorphologie est associée aux courants de retour, typiques des plages réfléchives, formant ainsi sur la plage une série de croissants et de creux. Cette dynamique morphosédimentaire témoigne aussi d'un transit sédimentaire perpendiculaire à la côte, donc d'un échange de sédiments entre la zone intertidale et la zone pré littorale.

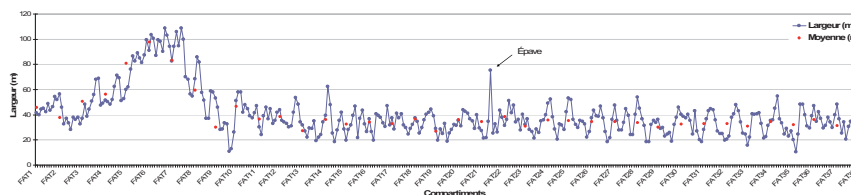


Figure 95. Largeur des plages au 50 m et moyenne par compartiment de 500 m pour la cellule hydrosédimentaire de Fatima

Les plages les plus larges dans la cellule hydrosédimentaire de Fatima sont situées au sud-ouest de la zone, dans les compartiments FAT4 à FAT8. Ce secteur est caractérisé par de larges trouées dans le tombolo. La plage la plus large a été mesurée dans le compartiment FAT21 et s'explique par la présence d'une épave de bateau. La barge s'est échouée en 1988 et a engendré, à la manière d'un brise-lame, une sédimentation derrière, en zone calme, ayant pour conséquence une augmentation significative de la largeur de la plage. La figure 96 montre que, dans ce secteur, la largeur de la plage varie de 21,5 m à 75,2 m. Dans l'ensemble, la plage située au nord-est de l'épave est plus large en raison de la dérive littorale allant du sud vers le nord. Il y a également un haut de plage végétalisé dans ce secteur, ce qui montre la stabilité de la côte à cet endroit.

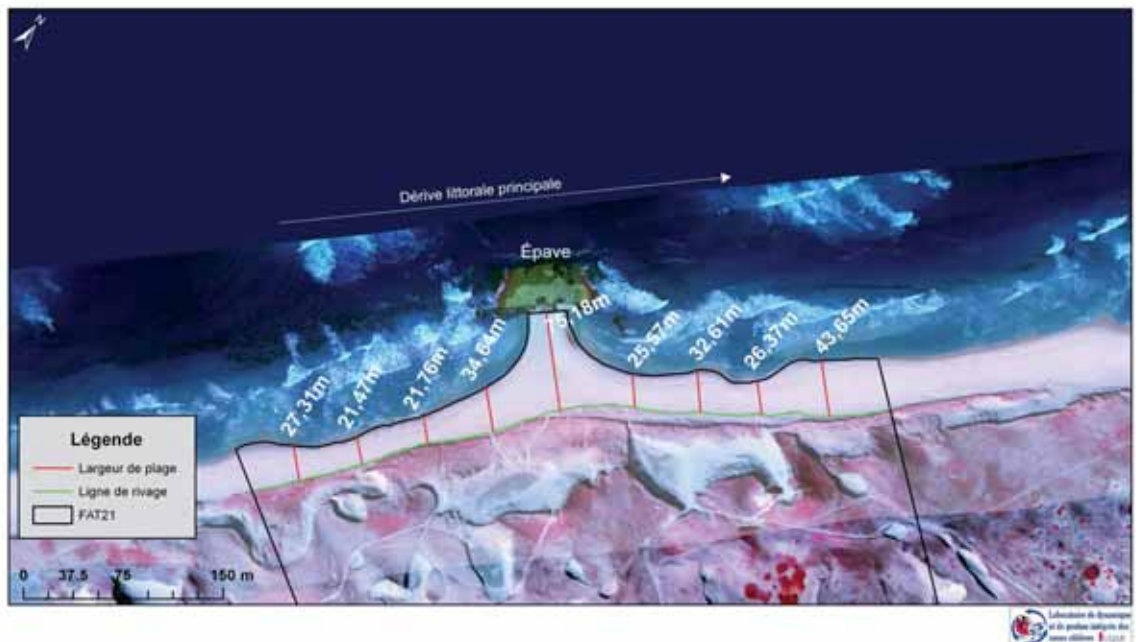


Figure 96. Effets de la présence de l'épave d'une barge sur la largeur de la plage

6.2.1.2 Indice du budget sédimentaire des plages pour la cellule hydrosédimentaire de Fatima

L'indice du budget sédimentaire des plages de la cellule de Fatima a été calculé pour 361 transects. La répartition spatiale de l'IBSP ainsi que le volume sédimentaire de la plage calculé pour chaque compartiment sont présentés dans la figure 97. Les valeurs des compartiments FAT1 à FAT9 sont assez constantes dans la classe *modérée*. Cependant, le volume des plages est significativement plus élevé pour FAT6 et FAT7. Ce résultat s'explique en raison de la morphologie des plages de ce secteur. D'abord, leur plage est beaucoup plus large avec des moyennes respectives de 97,7 et 83,6 m, comparativement à des largeurs qui varient de 40 à 60 m en moyenne pour les autres compartiments. Cependant, l'altitude de la partie supérieure de la surface de la plage pour les compartiments FAT6 et FAT7

est beaucoup plus faible, avec une moyenne de 0,95 m, alors que la moyenne est de 1,86 m pour les autres compartiments.

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELINE.

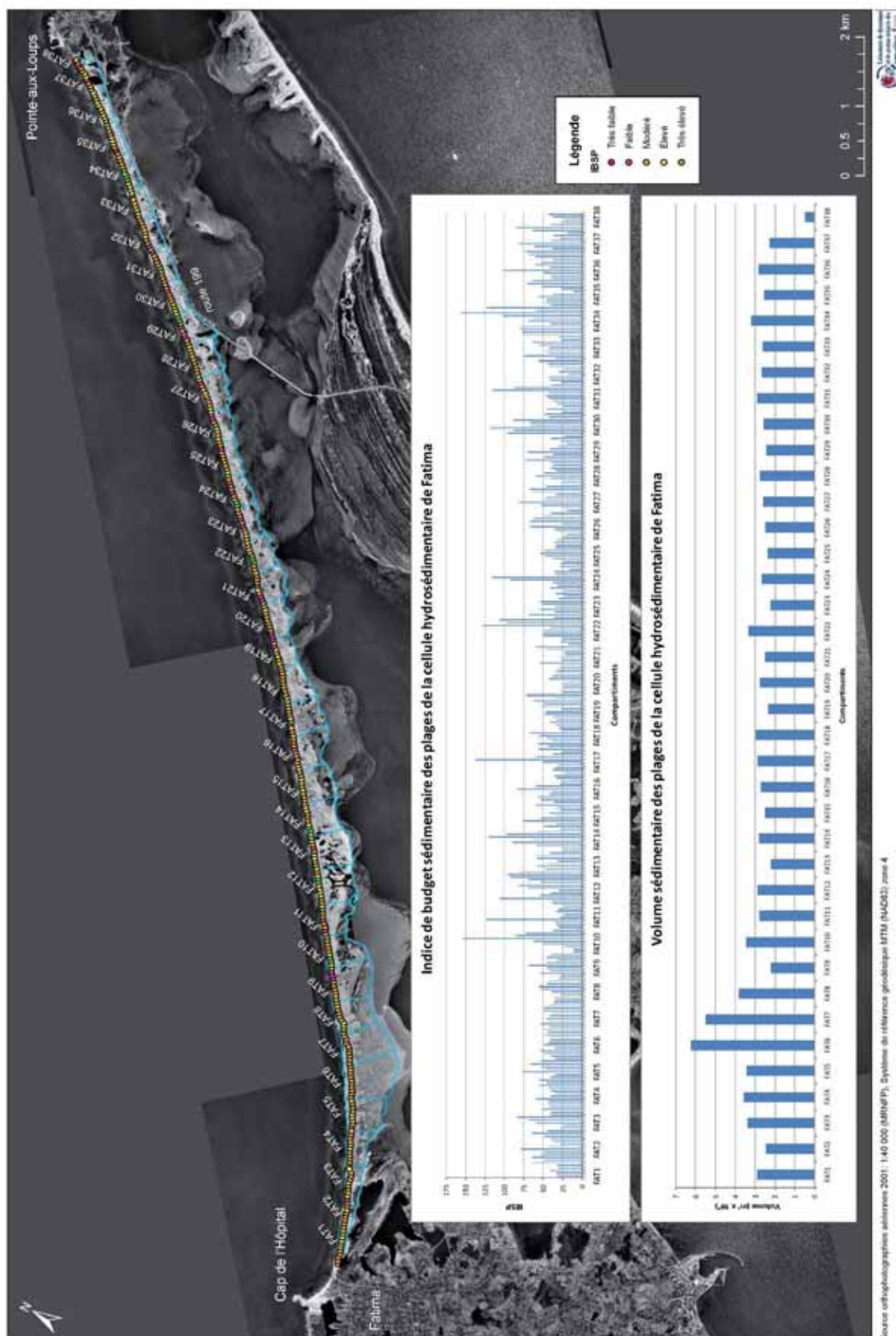


Figure 97. Indice du budget sédimentaire des plages et volume sédimentaire des plages de la cellule hydrosédimentaire de Fatima

La répartition des classes est présentée en fréquence et en pourcentage dans le tableau 19. La classe la plus représentée (57,89 %) dans cette cellule hydrosédimentaire est la classe *modérée* qui correspond à un résultat variant de 25 à 50. Aucun transect n'a été classé dans la catégorie *très faible* et seulement 8,59 % font partie de la classe *faible*. Ces quelques transects correspondent dans l'ensemble à des secteurs où la plage est étroite (figure 95). Ils sont généralement localisés devant des secteurs de courants de retour qui entraînent une réduction de la largeur de la plage et l'abaissement de sa surface. Les quelques transects classés comme étant *très élevé* correspondent, pour 23 des 25 transects, à des secteurs où l'altitude de la partie supérieure de la plage est de plus de 4 m, alors que l'altitude moyenne de la cellule hydrosédimentaire est de 2,56 m. Ces fortes valeurs sont liées à d'importantes accumulations éoliennes sur la partie supérieure de la plage.

Tableau 19. Indice du budget sédimentaire des plages pour la cellule hydrosédimentaire de Fatima

	Très faible	Faible	Modéré	Élevé	Très élevé	Total
N^{bre} de transects	0	31	209	96	25	361
Pourcentage (%)	0	8,59	57,89	26,59	6,93	100

6.2.1.3 Volume sédimentaire et largeur du cordon dunaire de la cellule hydrosédimentaire de Fatima

Pour les compartiments FAT1 à FAT28, le volume de sédiments calculé correspond au volume total du cordon dunaire, puisqu'il n'y a aucune infrastructure permanente. Pour les 10 compartiments situés le plus au nord (FAT29 à FAT38), le volume calculé correspond au cordon dunaire localisé entre la ligne de rivage et la route 199. Le volume du compartiment FAT38 n'est pas comparable à celui des autres, puisque sa surface est beaucoup plus petite et que sa largeur est de seulement 80 m.

Les volumes calculés les plus faibles correspondent aux compartiments situés le plus près des caps rocheux, soit à la partie amont de la cellule hydrosédimentaire (figure 97). À cause de sa situation en amont de la dérive littorale principale, ce secteur reçoit moins de sédiments. Cette affirmation est particulièrement vraie pour les compartiments FAT1 à FAT3. Le volume peu élevé du cordon dunaire des compartiments FAT4 à FAT8 s'explique par le contexte géomorphologique. Le tombolo de ce secteur a été troué à plusieurs reprises par le passé, de sorte que des segments du cordon dunaire ont été complètement érodés. L'altitude générale de la topographie de surface est donc plus basse et, par conséquent, la réserve de sable, plus faible. Ainsi, malgré des plages plus larges et une apparence de budget sédimentaire des plages plutôt positif, ce milieu présente tout de même une grande vulnérabilité aux événements de tempête. Les compartiments FAT13 et FAT14 présentent les volumes de sédiments les plus importants en raison de leur largeur, mais aussi de la présence de grands complexes dunaires.

**CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELINE.**

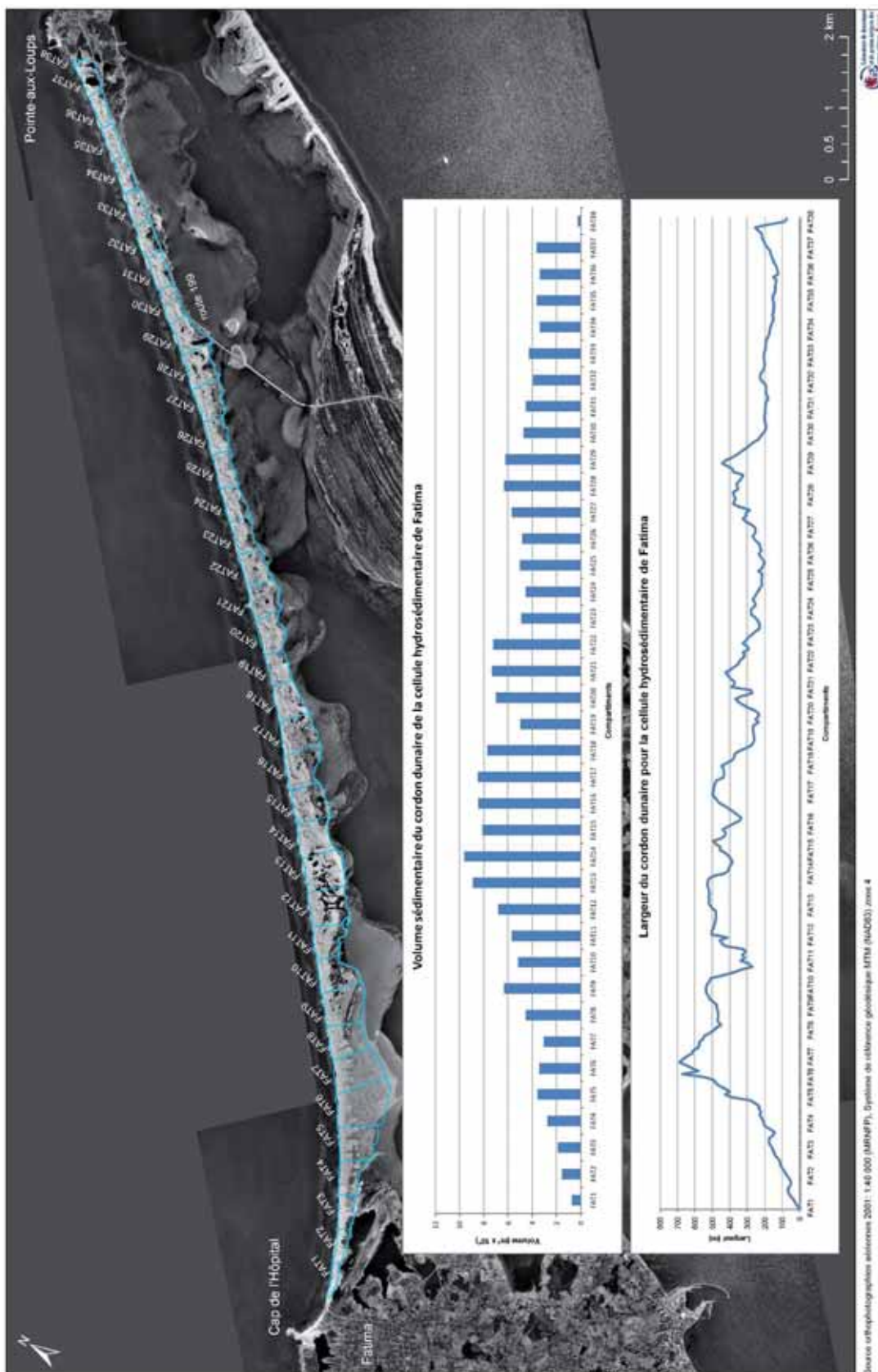


Figure 98. Volume sédimentaire et largeur du cordon dunaire de la cellule hydrosédimentaire de Fatima

Les taux de migration historique de la ligne de rivage sont négatifs pour la totalité de la cellule de Fatima (figure 99). Les taux d'érosion les plus élevés correspondent au secteur où le volume sédimentaire du cordon dunaire actuel est le plus faible, correspondant à la partie sud-ouest de la cellule (FAT1 à FAT7). Le secteur de l'épave (FAT21) est celui qui a le taux de migration le plus faible, puisqu'il affiche une accumulation depuis 1963. Pour cette cellule hydrosédimentaire, la vulnérabilité de la route 199 doit être évaluée seulement pour la partie située le plus au nord-est (FAT29 à FAT38), à partir du moment où elle est présente sur le tombolo. Dans cette partie, le volume sédimentaire et la largeur du cordon dunaire sont en décroissance assez constante jusqu'à la Pointe aux Loups. Par ailleurs, le taux d'érosion historique calculé pour ce secteur est plus faible ($-0,51$ m/an) que la moyenne de l'ensemble de la cellule ($-0,79$ m/an).

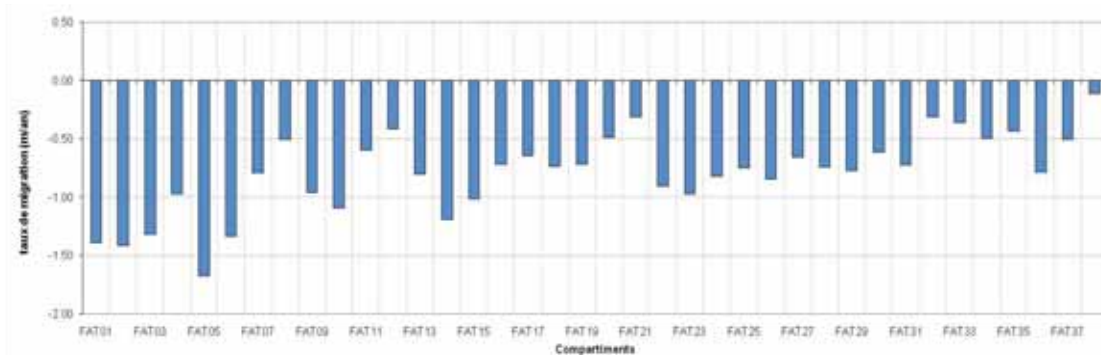


Figure 99. Taux de migration historique de la ligne de rivage (1963-2008) par compartiment de 500 m pour la cellule hydrosédimentaire de Fatima

6.2.2 Cellule hydrosédimentaire de *Pointe-aux-Loups*

6.2.2.1 Largeur des plages de la cellule hydrosédimentaire de *Pointe-aux-Loups*

Les largeurs des plages de la cellule hydrosédimentaire de *Pointe-aux-Loups* ont été mesurées à un intervalle de 50 m, pour un total de 335 transects (figure 100). La moyenne pour les 35 compartiments d'une largeur de 500 m a été calculée. Pour l'ensemble de la cellule hydrosédimentaire, la largeur de la plage minimale est de 2,3 m, la largeur maximale est de 63,9 m et la largeur moyenne est de 33,5 m. L'écart type de l'ensemble de la cellule de *Pointe-aux-Loups* est de 10,07. À l'instar de la cellule de *Fatima*, la dynamique de ce secteur est aussi influencée par des courants de retour donnant un aspect en dents de scie au graphique illustré dans la figure 100.

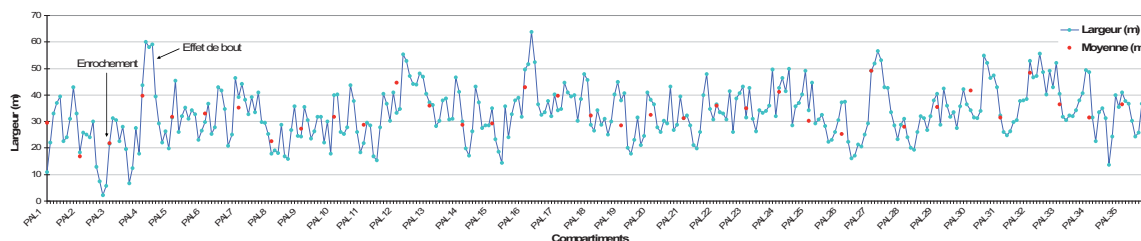


Figure 100. Largeur des plages au 50 m et moyenne par compartiment de 500 m pour la cellule hydrosédimentaire de *Pointe-aux-Loups*

Les largeurs de plage mesurées les plus faibles (2,3 m, 5,6 m et 6,7 m) se situent devant l'enrochement, dans la partie située le plus au sud-ouest de la cellule hydrosédimentaire, dans le compartiment PAL2. Aussi, une augmentation marquée de la largeur de la plage est visible aux deux extrémités du secteur enroché, principalement au nord-est, où la différence de la largeur entre le secteur enroché et le secteur naturel est marquée. Une augmentation de la largeur de la plage est visible juste à l'est de ce secteur enroché. La largeur moyenne passe de 16,8 et 21,1 m, pour les compartiments PAL2 et PAL3, à une moyenne de 39,7 m pour PAL4 (figure 101). Par ailleurs, dans ce même secteur, il est possible d'observer une accumulation en amont des deux épis transversaux en raison du sens de la dérive littorale. Cette observation est plus visible sur l'épi situé le plus au sud sur la figure 101, puisqu'il couvre l'ensemble du profil transversal sur le haut estran, contrairement à l'épi situé le plus au nord qui couvre environ la moitié du profil.

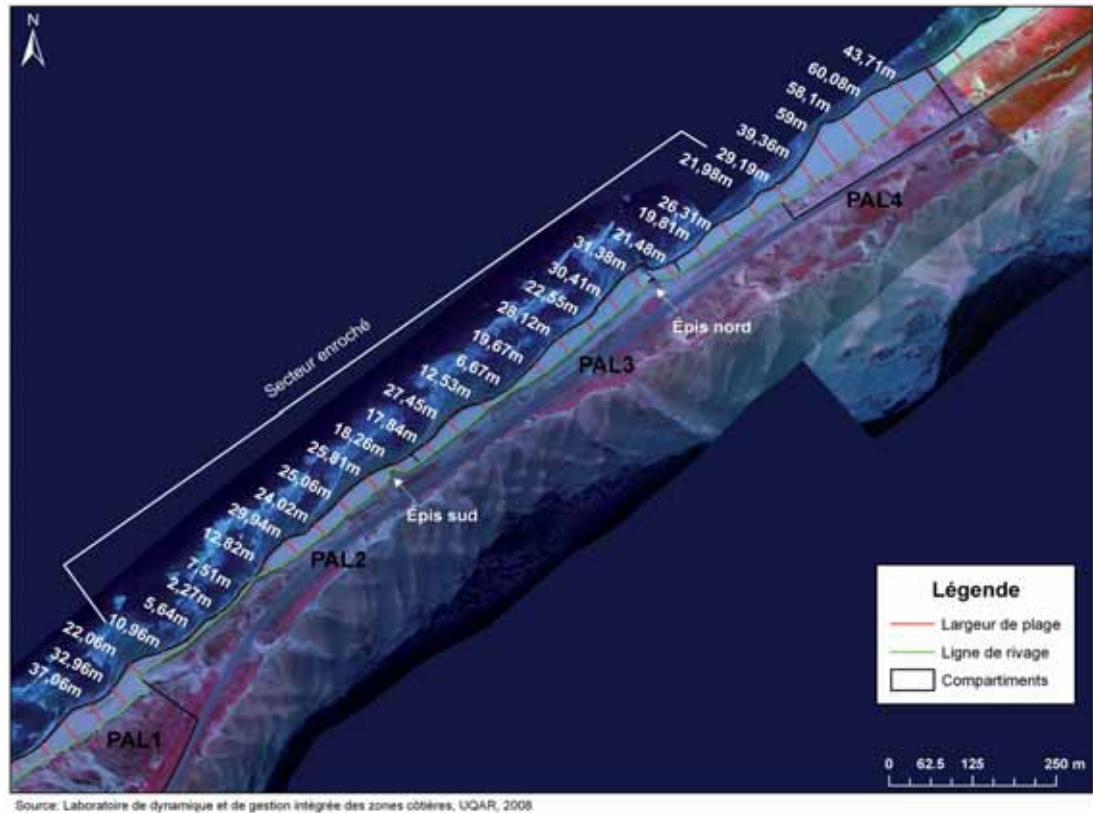


Figure 101. Largeur des plages du secteur enroché de Pointe-aux-Loups

6.2.2.2 Indice du budget sédimentaire des plages pour la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

L'indice du budget sédimentaire des plages de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups a été calculé pour un total de 336 transects. La répartition spatiale de l'indice ainsi que le volume sédimentaire de la plage sont présentés dans la figure 102. L'indice et le volume les plus faibles sont ceux du secteur enroché (PAL2 et PAL3) en raison de la plage très étroite ainsi que de la faible altitude de la ligne de rivage qui correspond à la base de l'enrochement. Les fortes valeurs de l'IBSP pour le compartiment PAL4 correspondent au secteur adjacent à l'enrochement où les largeurs de la plage sont les plus élevées. Les autres valeurs d'indice élevées correspondent à des secteurs ponctuels où l'altitude de la ligne de rivage est élevée et la plage est large.

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

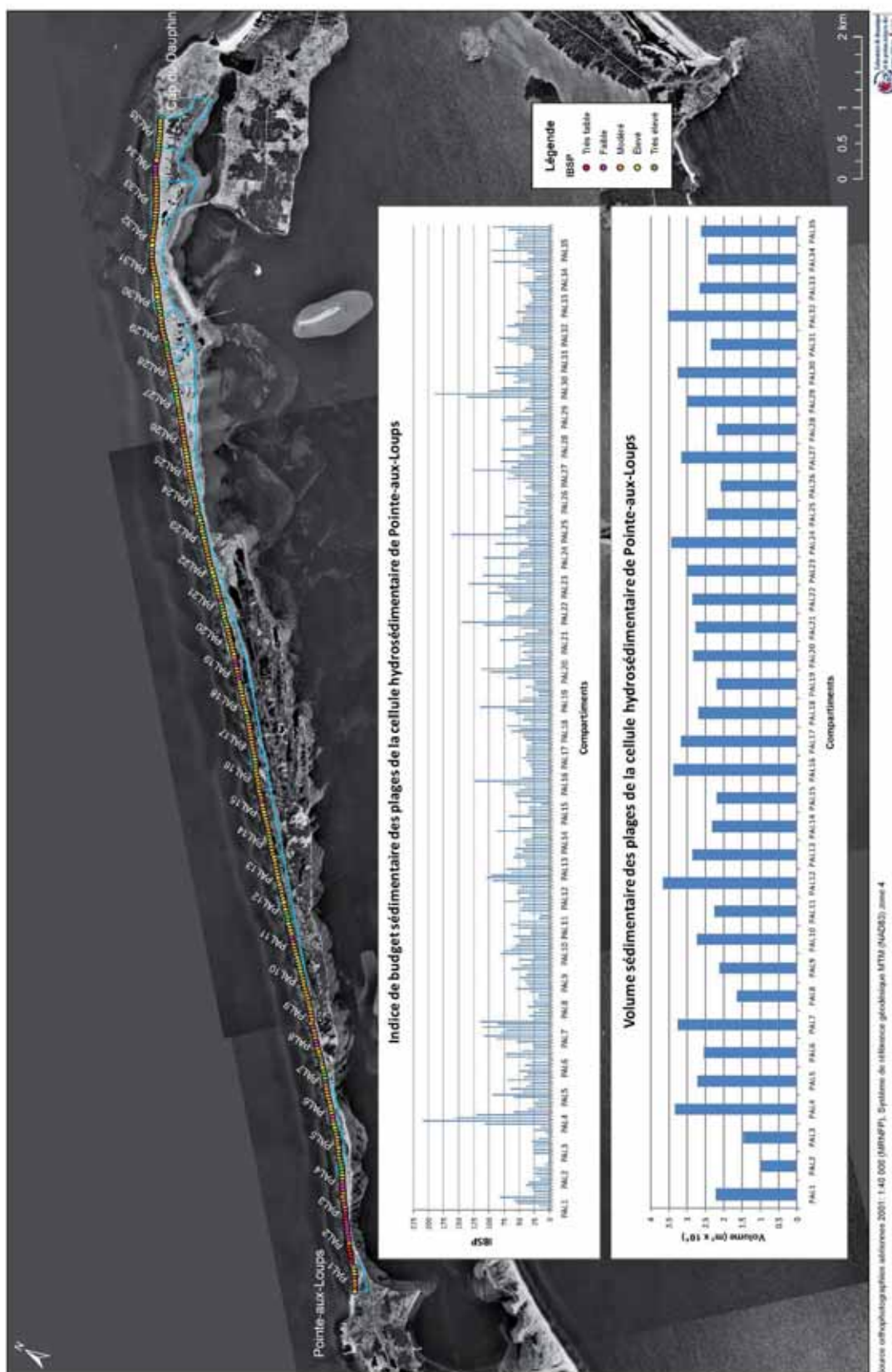


Figure 102. Indice du budget sédimentaire des plages et volume sédimentaire des plages de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

Plus de 50 % des transects calculés font partie de la classe *modérée* et sont distribués spatialement sur l'ensemble de la cellule (tableau 20). La totalité des transects faisant partie de la classe *très faible* ainsi que plus de la moitié de ceux classés *faible* sont situés dans le secteur enroché. Les autres segments où l'IBSP est faible sont situés en zone naturelle et correspondent à des zones où les courants de retour sont importants. Les classes *élevée* et *très élevée* totalisent environ 35 % des transects et sont aussi distribuées sur l'ensemble de la cellule, excepté pour le secteur enroché qui indique plutôt un déficit.

Tableau 20. Indice du budget sédimentaire des plages pour la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

	Très faible	Faible	Modéré	Élevé	Très élevé	Total
N^{bre} de transects	7	33	172	89	35	336
Pourcentage (%)	2,08	9,82	51,19	26,49	10,42	100

6.2.2.3 Volume sédimentaire et largeur du cordon dunaire de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

La distribution spatiale du volume sédimentaire et de la largeur du cordon dunaire est présentée dans la figure 103. Le volume et la largeur sont nuls pour le secteur enroché (PAL2 et PAL3). La réduction du volume de sédiments du cordon dunaire pour les compartiments PAL30 à PAL32 s'explique par un rétrécissement du cordon dunaire à cet endroit. La largeur pour ces trois compartiments varie de 131,7 m à 258,2 m, alors que la largeur des deux compartiments adjacents (PAL29 et PAL33) varie de 280,6 m à 545,8 m.

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

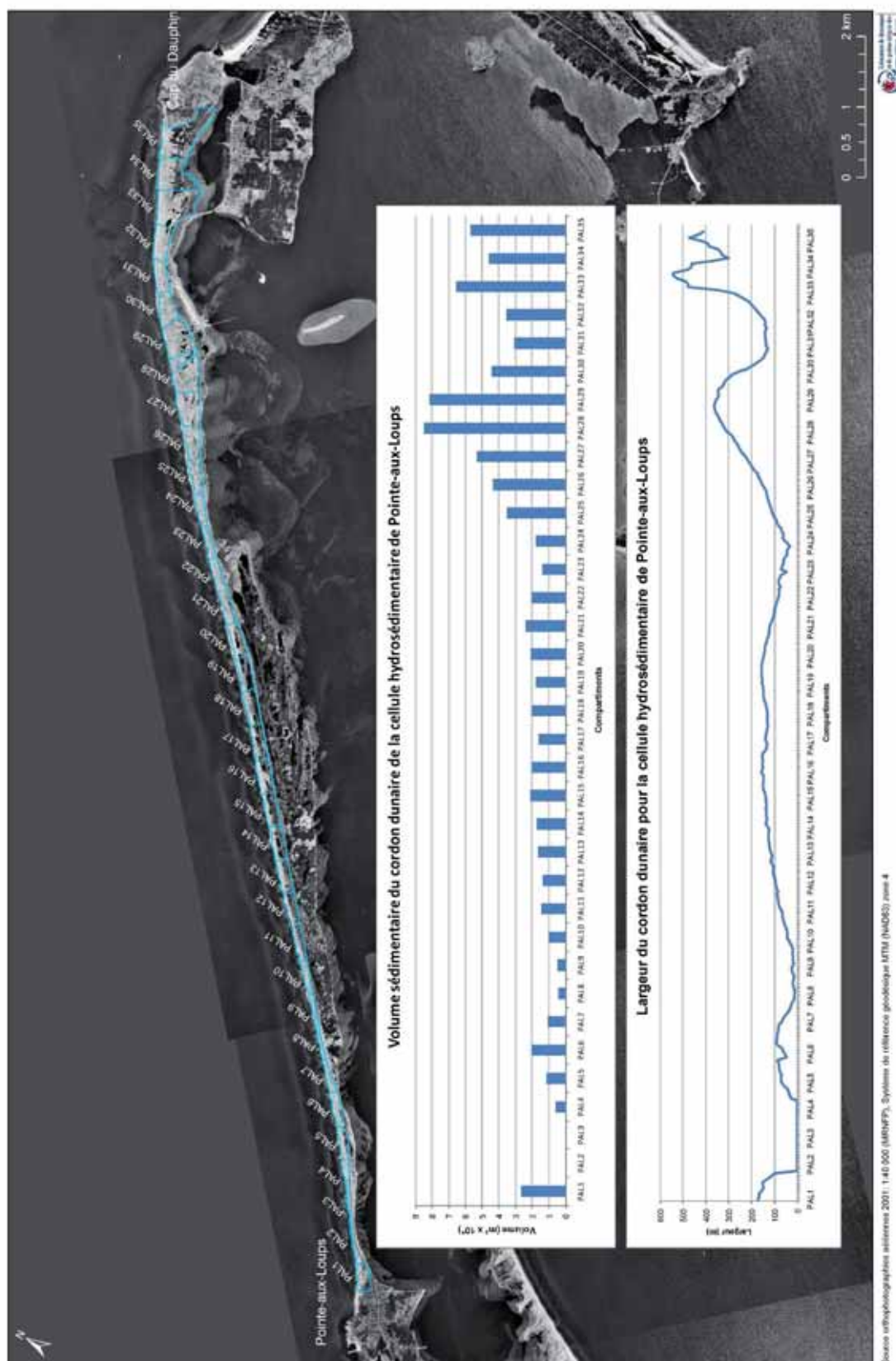


Figure 103. Volume sédimentaire et largeur du cordon dunaire de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

Dans l'ensemble, les compartiments de Pointe-aux-Loups présentent un taux de migration de la ligne de rivage négatif. Les compartiments PAL2 et PAL3 ont les taux de migration les plus faibles, puisqu'ils correspondent au secteur qui est enroché depuis 1998 et qui a connu une recharge en sable de 2 900 t au cours de l'année 2008 (figure 104).

Par ailleurs, les quatre compartiments situés le plus au nord-est présentent plutôt une avancée du système. Cette avancée n'est pas visible à partir de la largeur des plages, puisqu'elle n'affiche pas d'augmentation significative dans ce secteur. En effet, la moyenne de ces quatre compartiments (PAL32 à PAL35) est de 38,25 m, alors que la moyenne globale de la cellule hydrosédimentaire est de 33,5 m. D'autre part, le volume du cordon dunaire est sensiblement plus élevé pour ces quatre compartiments (PAL32 à PAL35), avec une moyenne de 510 850 m³, comparativement à une moyenne globale de la cellule de 265 522 m³, ce qui correspond presque au double du volume. La largeur du cordon dunaire est aussi élevée dans ce secteur. Considérant le budget sédimentaire des plages et du cordon dunaire, la distance entre la ligne de rivage et la route 199, ainsi que les valeurs des taux de recul, la route est davantage vulnérable devant les compartiments PAL2, PAL3, PAL8, PAL9, PAL23 et PAL24.

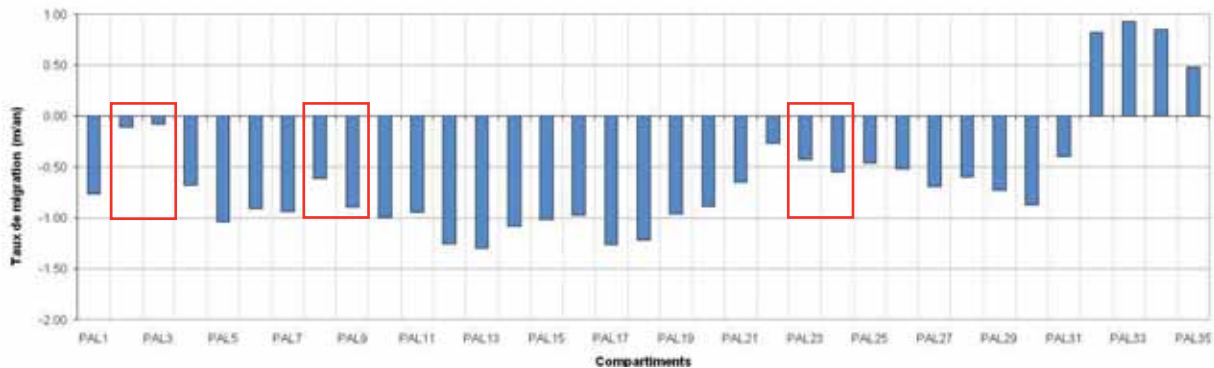


Figure 104. Taux de migration historique de la ligne de rivage (1963-2008) par compartiment de 500 m pour la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

6.3 Comparaison de l'IBSP pour les unités hydrosédimentaires de la baie de Plaisance et de Pointe-aux-Loups

La comparaison des deux unités hydrosédimentaires a été réalisée à partir de l'indice du budget sédimentaire des plages, puisque la cartographie de cet indice permet de bien illustrer sa variabilité spatiale sur l'ensemble de la zone d'étude (figure 105). Des histogrammes de fréquence montrent la variabilité inter et intra cellule hydrosédimentaire de l'IBSP. Les tableaux 21 et 22 contiennent les valeurs utilisées dans ces histogrammes.

Le tableau 21 présente la variabilité inter-cellule hydrosédimentaire pour chacune des classes. La somme des classes et des cellules équivaut à 100 % de la zone d'étude. Ces résultats montrent que, dans l'ensemble, le budget sédimentaire de l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups est plus élevé que celui de l'unité de la baie de Plaisance. Les secteurs de La Martinique et du Cap sont surtout représentés dans la zone d'étude totale par la classe *faible* avec 7,65 % et 9,5 %, respectivement. Les cellules de Fatima et de Pointe-aux-Loups sont quant à elles représentées par les classes *modérée* (18,24 % et 14,26 %) et *élevée* (9,84 % et 9,37 %). Il est important de noter que ces résultats n'indiquent pas nécessairement que la baie de Plaisance est en déficit, mais plutôt que le budget sédimentaire de Pointe-aux-Loups est plus élevé. Cette constatation est aussi appuyée par les largeurs de plage et le volume sédimentaire moyen plus grands dans l'unité de Pointe-aux-Loups. Par ailleurs, bien que le budget sédimentaire de Pointe-aux-Loups soit élevé, donc que la quantité de sédiments dans cette unité soit plus élevée, les taux de migration historiques de la ligne de rivage montrent qu'elle est en érosion, alors que l'unité de la baie de Plaisance présente plutôt une tendance à l'accumulation. Ces résultats montrent le caractère très dynamique de l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups où la quantité de sédiments impliqués est importante et, par conséquent, décrit un milieu soumis à une plus grande énergie.

Tableau 21. Variabilité inter-cellule hydrosédimentaire de l'IBSP

	Très faible	Faible	Modéré	Élevé	Très élevé	Total
Martinique	2,95	7,65	2,73	0,79	0	14,12
Du Cap	0,64	9,5	1,7	0	0	11,84
Fatima	0,38	6,62	18,24	9,84	2,98	38,06
Pointe-aux-Loups	1,21	7,36	14,26	9,37	3,78	35,98
Total	5,18	31,129	36,93	20	6,76	100

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

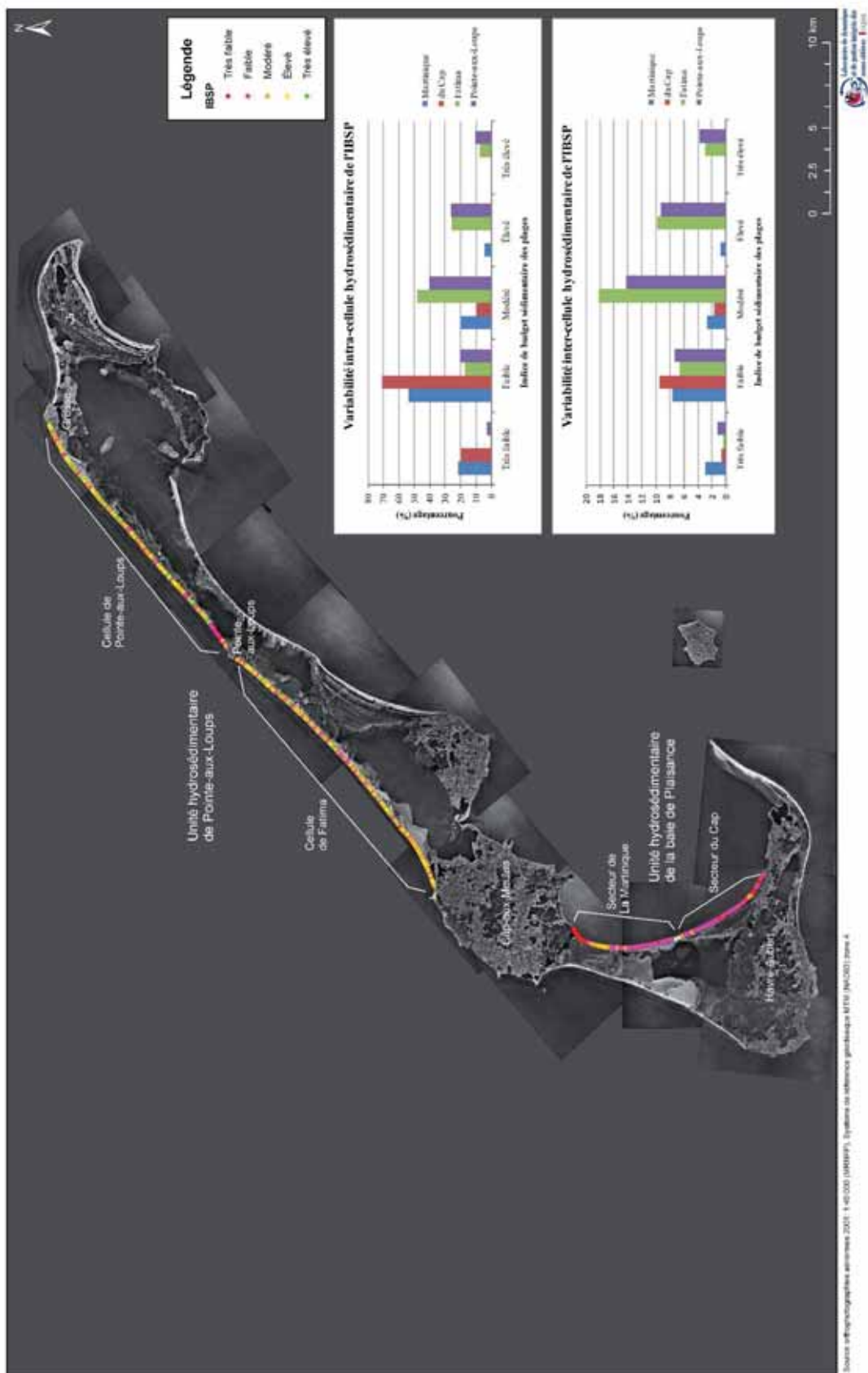


Figure 105. Indice du budget sédimentaire des plages des unités hydrosédimentaires de la baie de Plaisance et de Pointe-aux-Loups

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

Le tableau 22 présente la variabilité intra-cellule hydrosédimentaire pour chacune des classes. La somme des classes équivaut à 100 % par cellule, la fréquence est donc calculée pour chacune des cellules individuellement. Plus des trois quarts des plages des secteurs de La Martinique et du Cap présentent un IBSP *faible* ou *très faible*. Tous les transects de la classe *très faible* du secteur de La Martinique sont situés au nord, dans le secteur enroché. Aucun transect n'a été catégorisé comme ayant un IBSP *très élevé* et seulement 5 % des transects du secteur de La Martinique appartiennent à la classe *élevée*. Près de la moitié des transects de ces deux secteurs ont été classés comme ayant un indice *modéré*. Les deux classes extrêmes (*très faible* et *très élevé*) sont plus faiblement représentées. À Pointe-aux-Loups, les transects présentant un IBSP *très faible* sont situés en majeure partie dans le secteur enroché.

Tableau 22. Variabilité intra-cellule hydrosédimentaire de l'IBSP

	Très faible	Faible	Modéré	Élevé	Très élevé	Total
Martinique	21,54	53,84	20	4,62	0	100
Du Cap	19,84	70,63	9,53	0	0	100
Fatima	0,83	17,45	48,19	25,76	7,77	100
Pointe-aux-Loups	2,97	20,17	40,06	26,41	10,39	100

7. SYNTHÈSE DES FACTEURS ET DES CAUSES RESPONSABLES DE LA DYNAMIQUE DE L'ÉVOLUTION DU LITTORAL DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE LA BAIE DE PLAISANCE ET DE POINTE-AUX-LOUPS

L'analyse de l'évolution historique de la côte fait ressortir différents rythmes d'évolution, parfois cycliques, parfois graduels, et certains présentant des vitesses extrêmes de migration du littoral. La compréhension du rythme d'évolution côtière à long terme, combinée à l'analyse de l'évolution récente du littoral, des profils de plage et du budget sédimentaire de la zone côtière permettent de mettre en évidence certains facteurs et causes qui conditionnent l'évolution côtière des deux unités hydrosédimentaires étudiées. Il s'agit notamment des événements de tempête, de la relation entre les processus éoliens et les processus hydrodynamiques, de l'effet de la dérive littorale et des courants de retour, de l'influence de la morphologie de l'avant-plage, de l'effet des mouvements gravitaires et, finalement, des effets de l'artificialité sur le bilan sédimentaire des plages.

7.1 Rythme d'évolution côtière

7.1.1 Alternances de cycles de progradation et d'érosion de la ligne de rivage

Tant dans l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance que dans celle de Pointe-aux-Loups, on peut observer des cycles d'érosion et d'accumulation pour les côtes à tombolo et à terrasse de plage. Ainsi, les pics d'érosion sont souvent suivis par des pics d'accumulation durant la période qui suit ou vice-versa. Par exemple, dans la figure 106, il est possible de voir que, de 1963 à 1977, une accumulation s'est produite à un rythme d'environ 1 m/an sur 1 km de littoral de la baie de Plaisance (entre les kilomètres 18,4 et 19,4 à partir du nord de la zone d'étude, figure 50), puis la tendance s'est inversée durant la période suivante de 1977 à 1983, avec une érosion variant de 1 à 2 m/an. D'autres cycles similaires peuvent être constatés sur toutes les côtes meubles. Ces cycles, naturels, durent environ 10 ans et peuvent s'expliquer par les conditions environnementales variables. À Pointe-aux-Loups, la côte offre une variabilité naturelle de recul et d'avancée selon un cycle de 10 à 20 ans. Par exemple, entre les kilomètres 0,5 et 0,75, une accumulation de près de 2 m/an, avec un maximum à 4 m/an, s'est produite de 1977 à 1983 puis, durant la période qui a suivi, une érosion supérieure à 4 m/an a été constatée (figure 107). Ce même type de cycle d'érosion et d'accumulation a aussi été observé sur les côtes à terrasse de plage dans la région de Sept-Îles, sur la Côte-Nord (Bernatchez et coll., 2008a). Ainsi, même si un secteur de côte est en phase d'accumulation durant une longue période, rien n'empêche une réactivation et une reprise de l'érosion.

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

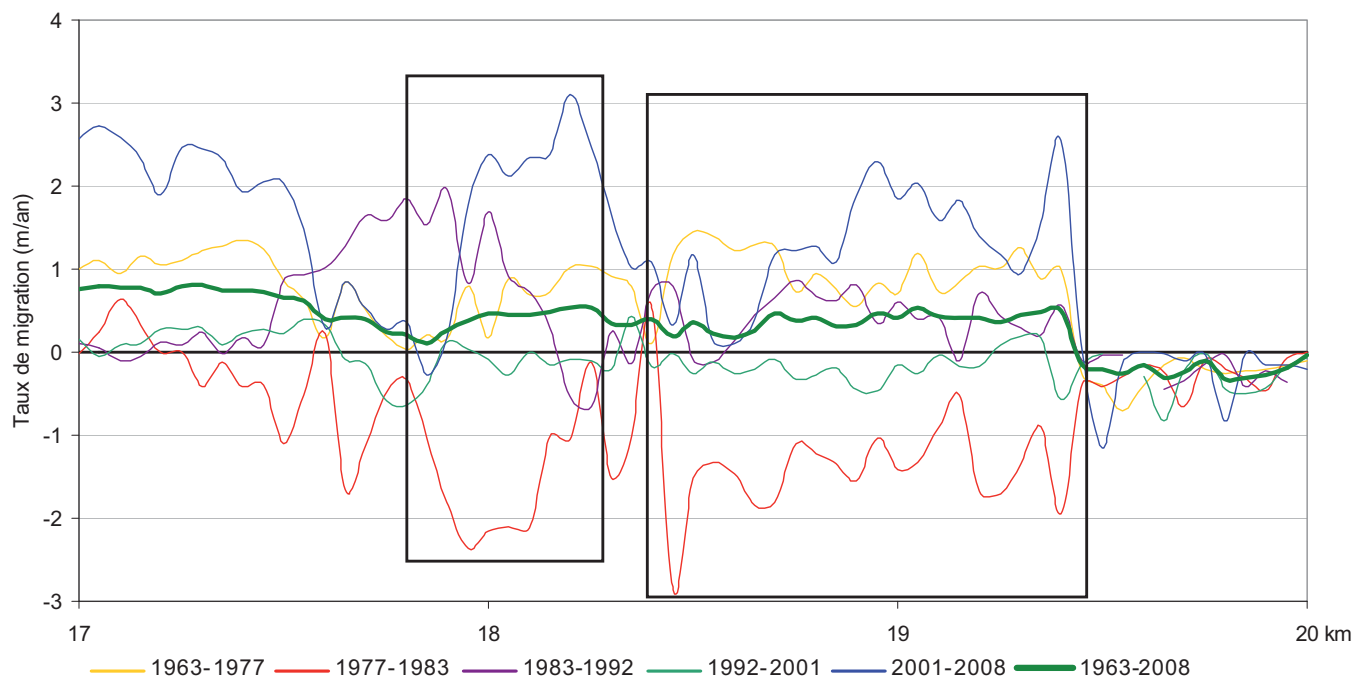


Figure 106. Exemple de cycles accumulation/érosion pour un secteur de côte à tombolo (au sud de la baie de Plaisance)

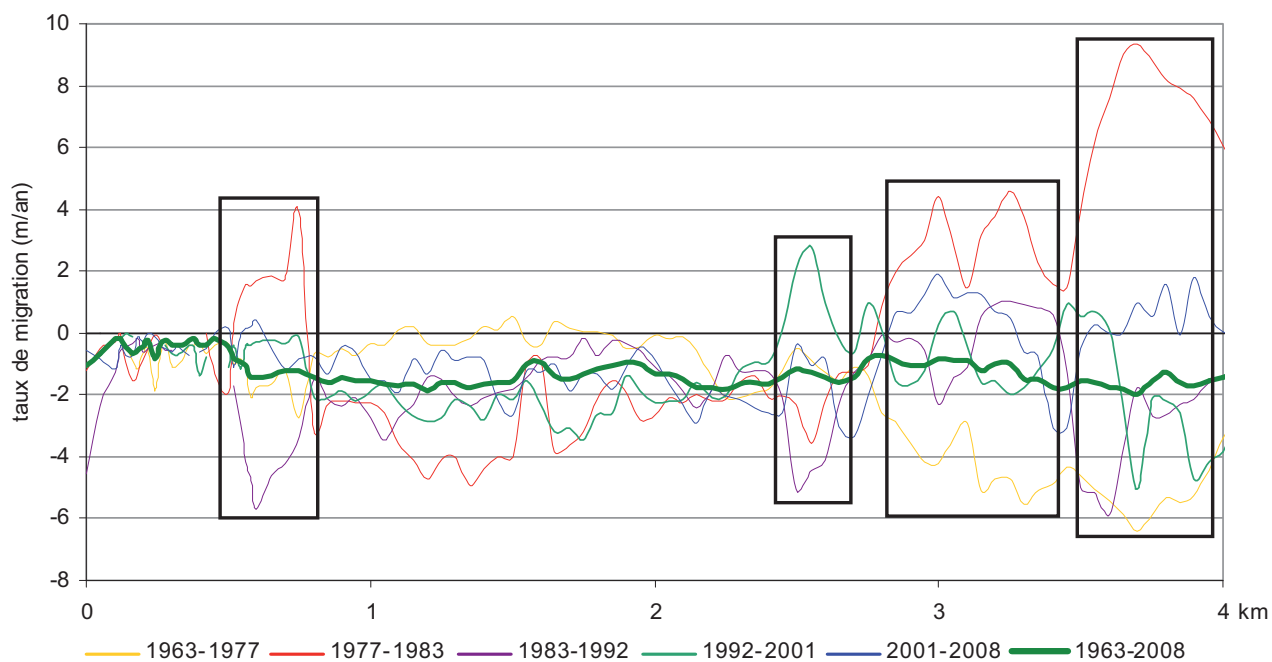


Figure 107. Exemples de cycles accumulation/érosion sur le tombolo de la cellule de Fatima (à l'est du cap de l'Hôpital)

7.1.2 Relation entre la largeur des plages et les taux d'érosion

La figure 108 permet de mettre en lumière la relation entre la largeur des plages et la vitesse de recul de la ligne de rivage. La grande majorité des zones de fort recul pour la période de 1983 à 1992 correspond à des plages étroites (moins de 20 m de largeur) mesurées en 1983. Le même phénomène est observé pour les taux de 1992 à 2001, relativement aux plages de 1992. Inversement, plusieurs zones stables et en accumulation sont caractérisées par de larges plages (plus de 40 m de largeur) pour l'intervalle correspondant. La largeur de la plage joue un rôle prédominant dans la vitesse de déplacement de la ligne de rivage. Lorsque la plage devient étroite, l'énergie des vagues est moins dissipée, entraînant un recul de la falaise sableuse. Lorsque la plage est large, les vagues déferlent sur le bas de plage et l'énergie est davantage dissipée avant que les vagues atteignent le haut de plage. L'engraissement d'une plage entraîne l'atténuation de la vitesse de recul de la falaise dunaire. La largeur de la plage constitue donc un bon indicateur de la sensibilité potentielle d'une côte sablonneuse à l'érosion par les vagues.

Cette relation entre la largeur de la plage et les taux d'érosion met ainsi en évidence l'importance que pourraient prendre les recharges en sable dans une gestion globale de l'érosion. Par exemple, au pied des enrochements ou devant les portions de route 199 vulnérables, ce type d'action pourrait reconstruire une large plage et contribuer ainsi à limiter l'impact des vagues sur la côte et donc l'intensité de l'érosion.

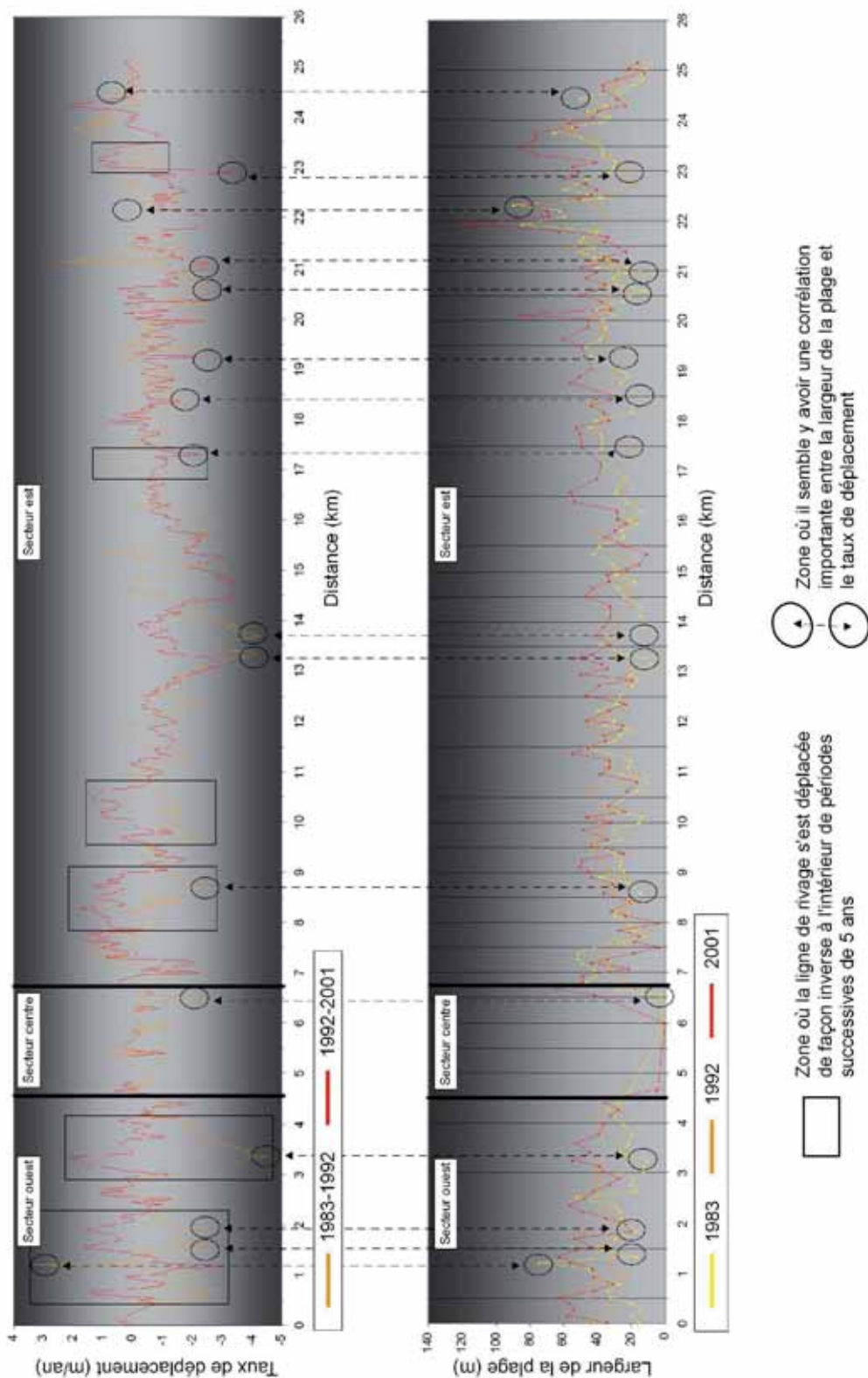


Figure 108. Relation entre la largeur des plages et le taux de déplacement de la ligne de rivage pour la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups (Bernatchez et coll., 2008).

7.1.3 Grandes fluctuations dans la migration de la ligne de rivage en raison d'événements géomorphologiques extrêmes

7.1.3.1 Unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

Les deux secteurs qui présentent les plus grandes fluctuations dans la migration de la ligne de rivage sont localisés aux extrémités de l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups, soit près du cap de l'Hôpital et à proximité du cap du Dauphin (figure 53 et 54). L'évolution de ces secteurs est conditionnée par les processus hydrodynamiques et la déflation éolienne. La période couvrant la fin des années 50 et les années 60 est caractérisée par une très forte fréquence de violentes tempêtes qui culmine en 1963 avec six tempêtes, dont trois ouragans (Lewis et Morgan, 1984; Grenier, 1993). Ces événements ont provoqué d'énormes brèches dans le tombolo, détruit en bonne partie le système dunaire et formé des lobes de débordement de tempête dans la lagune du Havre aux Maisons et celle du Havre de la Grande Entrée. La dérive littorale a par la suite progressivement colmaté les brèches alors que la déflation éolienne a reconstitué les dunes. Cette période de reconstruction sédimentaire s'est traduite par une phase d'accumulation et de progradation importante de la ligne de rivage. Ces événements géomorphologiques extrêmes rappellent que les tombolos sont des systèmes très vulnérables aux événements de tempête.

7.1.3.2 Unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance : intervention humaine et dynamique sédimentaire particulière d'évolution de l'ancien goulet

Avant 1954, un goulet, situé à la jonction des deux secteurs (cercle bleu sur la figure 48), assurait le transit d'eau et de sédiments entre la baie de Plaisance et la lagune de la baie du Havre aux Basques. Les calculs de taux d'érosion n'ont pas été effectués immédiatement pour le goulet, car l'absence de ligne de rivage dans ces années rendait le calcul difficilement comparable. Depuis la construction de la route, cette brèche a été fermée, ce qui a profondément changé la dynamique hydrosédimentaire de ce secteur. Depuis, ce secteur connaît une migration côtière importante (figure 109) et l'ancien chenal tend à se combler. La géomorphologie du site de l'ancien goulet est donc très particulière à cause à la fois de la confluence des dérives littorales et du comblement du goulet à la suite de sa fermeture artificielle. Ce secteur connaît une évolution côtière particulière où la dynamique de la ligne de rivage connaît à la fois une progradation de la côte (due à un apport sédimentaire qui fait avancer les dunes vers le large) et une migration latérale de la côte (due à la dérive littorale qui forme et déplace latéralement des cordons littoraux) (figure 109). Des taux d'accumulation de 19 m/an ont même été constatés localement, de 1977 à 1983, à cause de la migration latérale de la côte et de la formation puis de la migration d'un cordon littoral (figure 109). Dans ce secteur, la flexure de la plage a également été tracée et son évolution, calculée

(figure 109-A). Cette évolution montre que, après une migration très importante de 1963 à 1977 qui a conduit à la fermeture de la trouée dans la plage, la migration de la flexure a été relativement faible de 1977 à 2008 ($-0,12$ m/an).

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

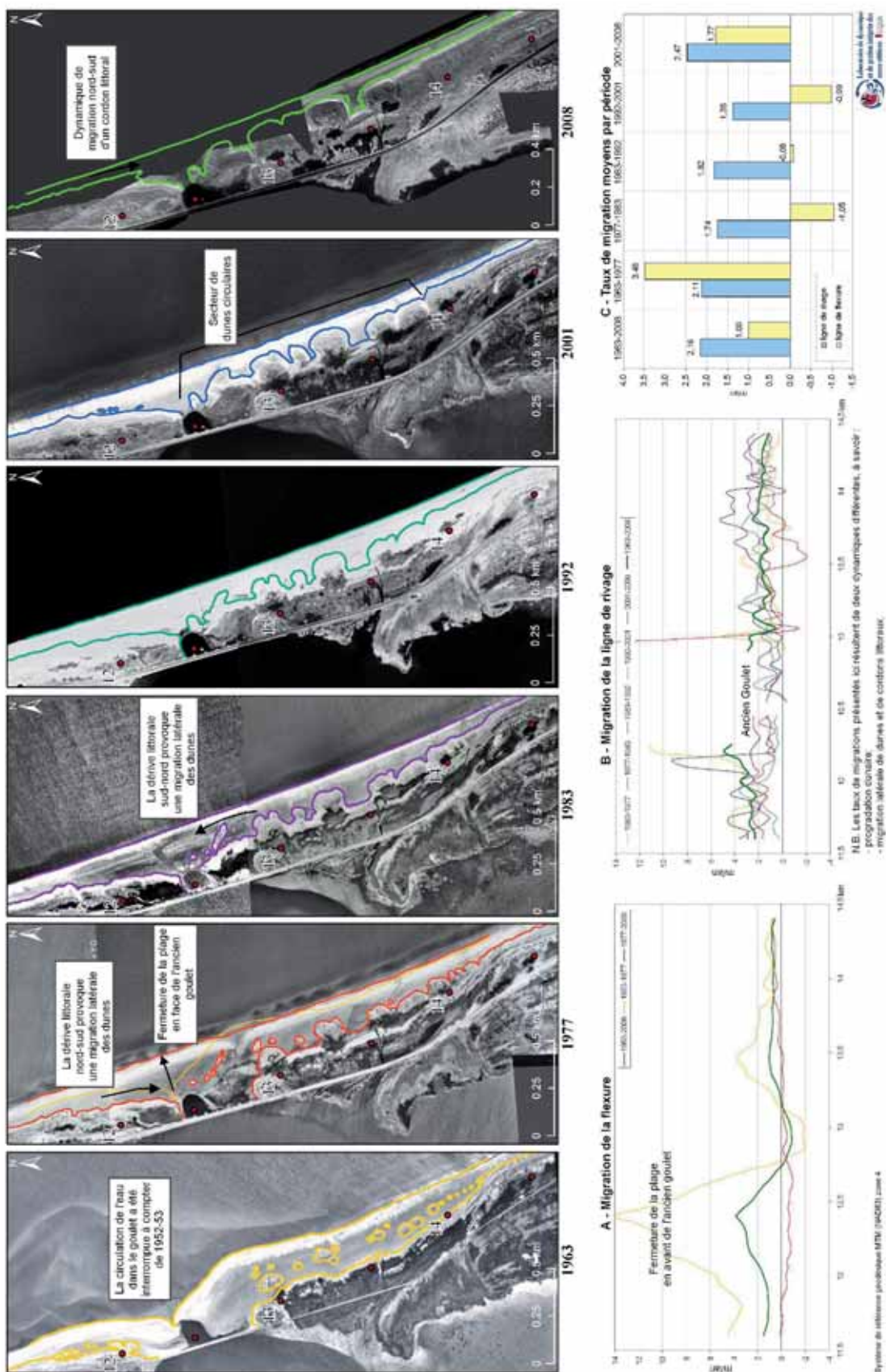


Figure 109. Dynamique de l'ancien goulet de la baie de Plaisance

7.2 Événements de tempête

Les tempêtes et les vagues qu'elles génèrent constituent un processus clé dans l'évolution et la migration des tombolos dunifiés (Bernatchez et coll., 2008a). Dans le secteur de Pointe-aux-Loups, la côte évolue principalement en fonction de la fréquence et de la force des tempêtes soufflant du nord-ouest qui sont très nombreuses et frappent directement la côte dans ce secteur (Bernatchez et coll., 2008a). Les périodes de forte érosion correspondent d'ailleurs aux deux périodes où la fréquence des tempêtes du nord-ouest a été la plus importante, soit de 1977 à 1983 et de 1983 à 1992, avec des taux respectifs de $-0,69$ et $-1,41$ m/an. De plus, la glace peut protéger la côte des tempêtes hivernales. Or, la période de 1977 à 1983 est caractérisée par une réduction importante du couvert de glace (Bernatchez et coll., 2008a). Cela peut ainsi expliquer que le secteur de Pointe-aux-Loups ait connu une érosion importante de 1977 à 1983. Pour les tombolos de la baie de Plaisance, la période de 1977 à 1983 correspond aussi à une période d'érosion importante. C'est, en effet, la période où la proportion de côtes en érosion est la plus forte (35,5 %) et où le taux d'accrétion des tombolos est le plus faible (0,57 m/an), surtout pour le secteur du Cap où le taux d'accrétion a été de seulement 0,25 m/an. La période récente (2001 à 2008) ne connaît pas d'érosion majeure dans le secteur de la baie de Plaisance malgré l'absence de glace. Cela peut s'expliquer par le fait que cette période a également connu peu de tempêtes du nord-est (celles qui affectent ce secteur, Bernatchez et coll., 2008a) et a connu son plus faible taux de ce type de tempêtes hivernales depuis 1963. L'analyse des événements ayant eu un impact sur la côte, saisis à l'aide des caméras de suivi, montre aussi que les vagues de tempête produisent les reculs ayant la plus grande intensité. Pendant la période du 16 novembre 2008 au 31 août 2009, 26 événements de sapement basal de la côte à tombolo ont été inventoriés, dont plusieurs avaient des niveaux d'eau supérieurs aux marées moyennes de pleines mers supérieures (> 1 m; figure 110). La tempête du 22 décembre 2008 a été particulièrement importante avec des niveaux d'eau extrêmes relevés de l'ordre de 130 cm par rapport au niveau moyen de la mer. Les niveaux d'eau mesurés pour cet événement en fait l'un des plus importants observés depuis 1964. Les importants reculs mesurés pour la période de juin 2008 à janvier 2009 sont en bonne partie les conséquences de cet événement de tempête (tableau 23). L'orientation de la côte et l'exposition aux vents dominants et aux vents de tempêtes jouent aussi un rôle majeur sur les niveaux d'eau qui sont réellement atteints par les vagues sur la côte et sur l'évolution des deux unités hydrosédimentaires. La figure 111 montre clairement cette distinction entre les deux secteurs pour l'événement du 27 août 2009. Au même moment, le déferlement des vagues atteint la base de la falaise à Pointe-aux-Loups, alors que, dans la baie de Plaisance, la plage est pratiquement entièrement émergée.

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

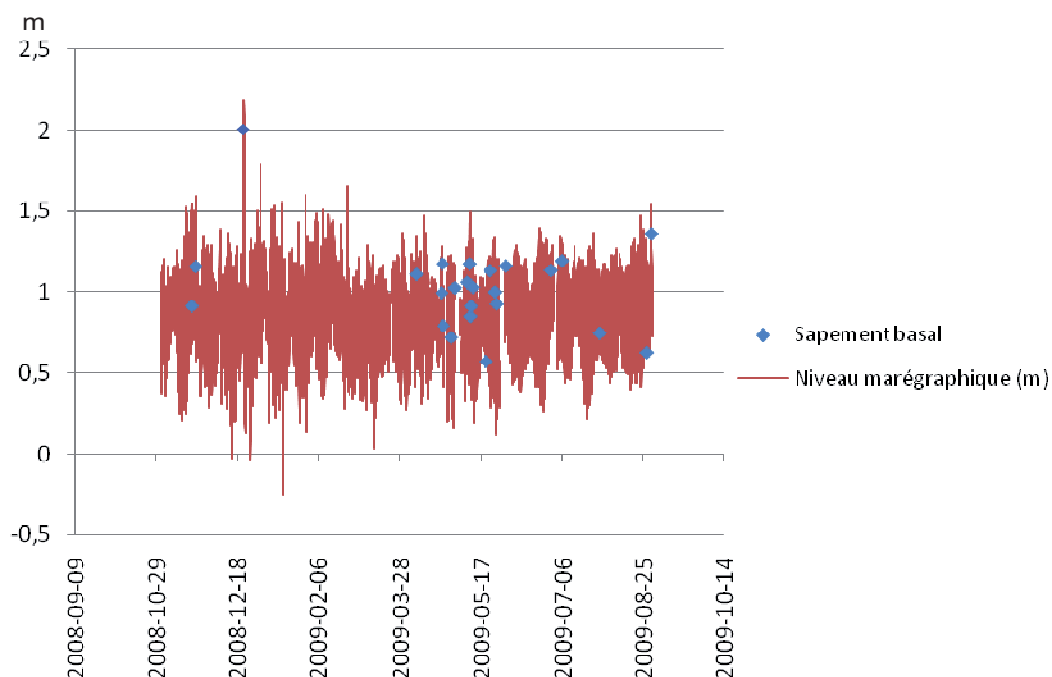


Figure 110. Événements de sapement basal inventoriés du 16 novembre 2008 au 31 août 2009 selon les niveaux d'eau mesurés (modifié de Boutin-Miller, 2010).

Tableau 23. Évolution saisonnière du trait de côte en bordure des caméras de suivi (m)

Sites	Bornes	Été/Automne	Hiver/Printemps	Été	Annuelle
		Juin 2008 à janvier 2009	janvier 2009 à juin 2009	juin 2009 à sept. 2009	Juin 2008 à sept. 2009
Pointe-aux-Loups	PAL-09	-0,25	0,2	-0,15	-0,2
	PAL-10	-0,7	0,4	-0,4	-0,7
	P1	-0,3	0,25	-0,45	-0,5
	P2	-1,3	-0,37	-0,33	-2
	P3	-3,25	-0,35	0	-3,6
	P4	-3,6	-0,24	-0,16	-4
	Bilan saisonnier	-1,57	-0,02	-0,25	-1,83
Baie de Plaisance	HAB-121	-3,5	0,1	0	-3,4
	HAB-120	-2,1	-0,65	0	-2,75
	HAB-119	-0,4	-0,4	0	-0,8
	Bilan saisonnier	-2	-0,32	0	-2,32
Bilan saisonnier moyen		-1,78	-0,17	-0,12	-2,08



Figure 111. Effets de l'orientation de la côte sur les niveaux d'eau atteints lors d'un même événement, 27 août 2009 à 17 h 45.

À gauche, le secteur de Pointe-aux-Loups et à droite, le secteur de la baie de Plaisance

7.3 Relation entre les processus éoliens et hydrodynamiques

La déflation éolienne aux îles de la Madeleine constitue un processus important dans le transport et la répartition des sédiments, comme nous avons pu l'observer et le quantifier avec les profils de plage. En fonction de la direction dominante des vents, les processus éoliens peuvent provoquer le démaigrissement de la plage comme ils peuvent favoriser son engraissement. Il est difficile actuellement, sans étude spécifique sur les processus éoliens, de déterminer avec précision leur influence sur la dynamique à long terme des tombolos des îles de la Madeleine. Cependant, la figure 112 montre l'effet de la succession de la déflation éolienne et du sapement par les vagues dans la dynamique de l'évolution saisonnière de la côte dans la baie de Plaisance. La déflation éolienne a provoqué un engraissement de la partie supérieure de la plage à l'automne 2009, comme en témoigne l'ensablement de l'accès à la plage et les profils de plage effectués à l'été et à l'automne 2009. Il se forme alors une rampe de sable au pied du talus qui vient parfois complètement masquer la falaise. Durant la tempête des 2 et 3 janvier 2010, le sapement basal a provoqué l'érosion du pied de talus du tombolo et un démaigrissement de la plage. Ce cycle accumulation éolienne / érosion par les vagues de tempête semble assez fréquent et typique dans la baie de Plaisance. En fonction de la fréquence des tempêtes, la rampe formée par les processus éoliens peut ensuite être colonisée par les plantes, ce qui favorise subséquemment une migration vers la mer de la ligne de rivage. Enfin, à Pointe-aux-Loups, les vents dominants soufflant de l'ouest favorisent plutôt un démaigrissement de la plage et une accumulation sur l'arrière-plage, d'où la hauteur beaucoup plus élevée des crêtes de dunes bordières, comparativement à celles de la baie de Plaisance. De plus, les caoudeyres

sont beaucoup plus nombreuses sur le tombolo de l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups. Lorsque situées près du trait de côte, ces cuvettes de déflation éolienne constituent aussi des points de faiblesse lors du recul du trait de côte causé par l'attaque des vagues. Par conséquent, il peut se produire un recul accéléré vis-à-vis des caoudeyres lors d'un événement de tempête. Mais il faut noter que, par la suite, un comblement et une relative linéarisation de la ligne de rivage se produiront, même si ce comblement peut prendre plusieurs années.



A) Ensablement au pied de la falaise (photo 23 octobre 2009)



B) Formation d'une rampe de sable par les processus éoliens et ensablement de l'escalier (photo 2 janvier 2010)



C) Érosion de la rampe de sable et de la falaise à la suite de la tempête des 2 et 3 janvier 2010 (photo 4 janvier 2010)

Figure 112. Accumulation éolienne et érosion par les vagues dans la baie de Plaisance

7.4 Effet de la dérive littorale

De manière globale, à l'échelle de toute la baie de Plaisance, la dynamique de l'évolution côtière est fortement influencée par les dérives littorales convergentes, d'où une accumulation au centre du tombolo et une érosion à la jonction avec les unités rocheuses des îles du Havre Aubert et du Cap aux Meules. Le transit sédimentaire s'effectue des îles rocheuses vers le centre du tombolo (figure 21 et 48). Une hausse significative ($p < 0,0001$) de l'accumulation est constatée plus on se dirige vers la confluence des deux dérives littorales (au kilomètre 12,5). Les secteurs de côtes se rattachant aux falaises rocheuses sont soit en érosion (au sud de la pointe de La Martinique, entre les kilomètres 5,5 et 7,35; figure 49), soit sont l'objet d'une accumulation plus faible et, localement, d'une certaine érosion (dans l'anse au Plâtre, entre les kilomètres 17,9 et 19,4; figure 50). À la confluence des deux dérives littorales principales de la baie de Plaisance, le taux d'accumulation est supérieur à 1 m/an sur 5,7 km de 1963 à 2008 (ligne rouge dans la figure 48, kilomètres 9,25 à 14,95). Au sud du goulet, des dunes circulaires se sont formées au cours des 45 dernières années (entre les kilomètres 12,5 et 14,5). La convergence des dérives littorales a fourni un apport sédimentaire important qui a permis la mise en place de cette forme géomorphologique particulière à partir de dunes embryonnaires.

La dérive littorale étant le moteur principal du déplacement sédimentaire parallèle à la côte, il est intéressant de constater que, pour les deux cellules hydrosédimentaires de Fatima et de Pointe-aux-Loups, plus l'on se situe en aval dans la cellule plus le taux d'érosion est faible, voire même le sens de la migration s'inverse, engendrant des taux d'accumulation. Pour la cellule de Fatima, plus on se dirige vers l'aval, plus le taux d'érosion diminue, cela de manière significative (figure 113). Pour la cellule de Pointe-aux-Loups, plus on se situe vers la fin de celle-ci, plus le taux de migration augmente de manière significative (figure 114), d'où l'importance d'une gestion à une échelle minimale équivalant à une cellule hydrosédimentaire.

Une gestion des voies de communication à l'échelle des cellules hydrosédimentaires s'insérerait dans une gestion à long terme et contribuerait à connaître les endroits déficitaires et les plus vulnérables de la côte. De plus, comme les impacts de toute intervention anthropique se répercutent dans toute la cellule et particulièrement en aval de l'ouvrage, cela permettrait de les anticiper et de les intégrer à la planification. Une telle gestion permettrait également de connaître où les réserves en sédiments sont suffisantes pour permettre des prélèvements en vue de futures recharges en sable ou encore pour bien localiser les infrastructures routières dans les zones les moins vulnérables.

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

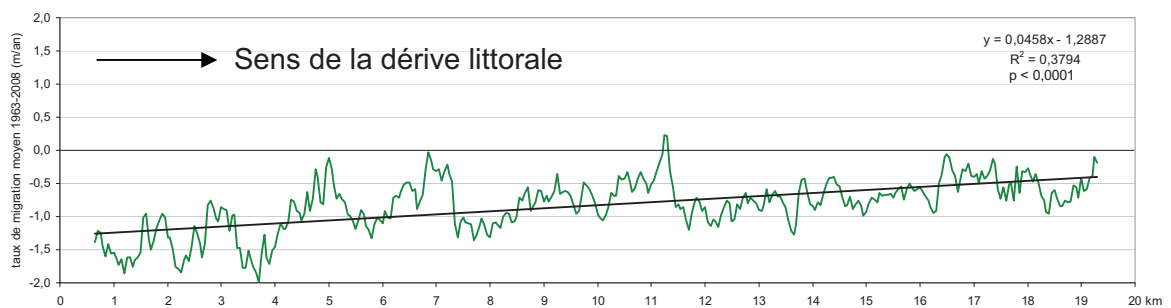


Figure 113. Tendence d'évolution du tombolo de la cellule hydrosédimentaire de Fatima



Figure 114. Tendence d'évolution du tombolo de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups (exclusion faite du secteur artificialisé)

Au nord-est de la cellule de Pointe-aux-Loups, juste en amont de la zone rocheuse du cap du Dauphin, 1,8 km de côte à tombolo est en accrétion. C'est le seul secteur naturel de la cellule qui connaît une accrétion depuis les 45 dernières années, avec un taux moyen de 0,8 m/an depuis 1963. Cela s'explique par le fait que l'on se situe en fin de transit sédimentaire. La dérive littorale principale vient du sud-ouest (figure 115) et transporte donc les sédiments vers le cap du Dauphin. Ceux-ci sont ensuite partiellement bloqués dans ce tronçon par une pointe rocheuse et le cap du Dauphin qui agissent comme un épi naturel.

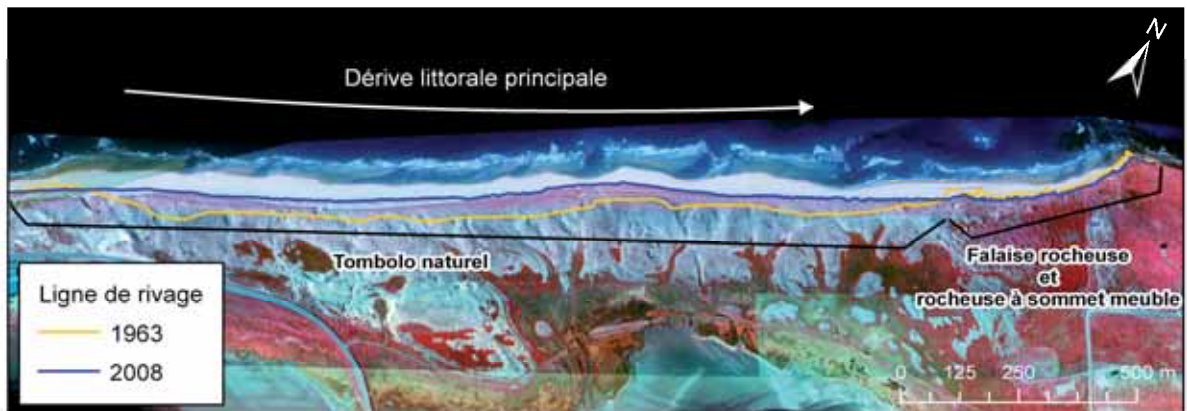


Figure 115. Accumulation à la fin de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

7.5 Effet des courants de retour

Les nombreux courants de retour le long de l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups sont en grande partie responsables de la variabilité de la géomorphologie et de la largeur des plages. L'abaissement ponctuel du niveau de la surface de plage en raison des courants de retour fait en sorte que le trait de côte sera davantage sensible à l'attaque des vagues dans ces zones de déficit sédimentaire. Il en résulte par conséquent un tracé en dents de scie dans la vitesse de migration de la ligne de rivage sur l'ensemble de l'unité hydrosédimentaire. Ces courants de retour alimentent en sédiments les cordons pré littoraux qui, à leur tour, peuvent alimenter la plage lors d'événements de tempête (figure 115).



Figure 116. Effet des courants de retour sur les plages des tombolos de Pointe-aux-Loups

7.6 Effets de la morphologie de l'avant-plage

La morphologie de l'avant-plage peut également jouer un rôle important dans l'évolution des plages. Les relevés bathymétriques ont révélé la présence de cordons pré littoraux le long des plages de Pointe-aux-Loups. Il ne semble pas y avoir de telles structures naturelles dans la baie de Plaisance. Dans ce dernier secteur, il n'y a que des cordons de bas estran. L'effet des cordons pré littoraux dans le secteur de Pointe-aux-Loups s'est notamment fait ressentir après le passage de la tempête Danny, où un élargissement du haut estran a été mesuré. Ces structures naturelles peuvent jouer un rôle protecteur durant la tempête, en atténuant l'énergie des vagues avant leur déferlement sur la plage, mais constituent aussi une source en sédiments qui viennent alimenter les plages.

7.7 Effets des mouvements gravitaires en bordure des tombolos

L'analyse des événements de recul réalisée à l'aide des caméras de suivi a permis d'établir que les mouvements gravitaires dans les falaises de sable des tombolos constituaient un mode de recul à forte fréquence (Boutin-Miller, 2010). En effet, près de 89 % des événements de recul répertoriés correspondent à des mouvements gravitaires, principalement à des coulées de

sable (tableau 24 et figure 117). Ceux-ci se produisent majoritairement en avril (figure 118). L'intensité de ce mode de recul est cependant négligeable par rapport au sapement par les vagues. Il est reconnu que les mouvements gravitaires se produisent à la suite du sapement par les vagues, qui a pour conséquence d'augmenter la pente de la surface de la falaise. Toutefois, l'analyse des images a permis de constater une relation entre la température et le déclenchement des mouvements gravitaires. Ainsi, plus de 75 % des événements se produisent en mars et en avril, lorsque la température oscille autour de 0 °C, et surtout lorsque celle-ci connaît une forte augmentation (figure 119; Boutin-Miller, 2010). Il semble que les cycles de gel-dégel soient aussi favorables au déclenchement de ces mouvements gravitaires.

Tableau 24. Nombre d'événements de recul répertoriés à l'aide des images des caméras installées sur les sites de Pointe-aux-Loups et de la baie de Plaisance

Mouvement gravitaire		207
	Chute de débords organiques	52
	Coulée de sable	153
	Coulée de sable gelé	2
Sapement basal		26
Total		233



Figure 117. Coulées de sable au pied de la falaise, secteur de Pointe-aux-Loups, 18 mars 2010

CARACTÉRISATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE
DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DE POINTE-AUX-LOUPS ET DE LA BAIE DE PLAISANCE,
ROUTE 199, ÎLES-DE-LA-MADELEINE.

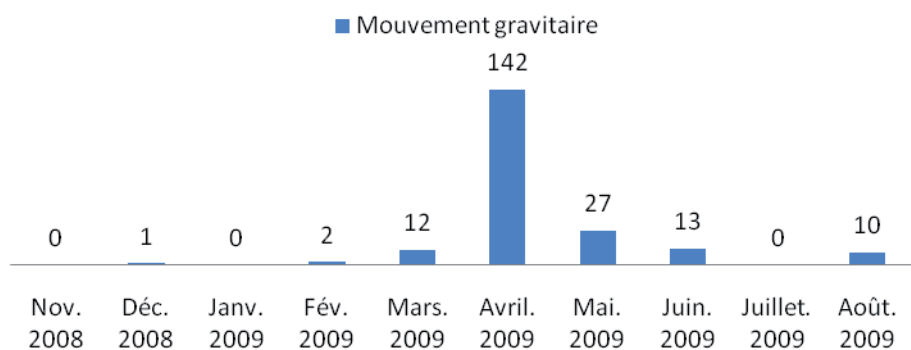


Figure 118. Nombre d'événements de mouvements gravitaires répertoriés par mois

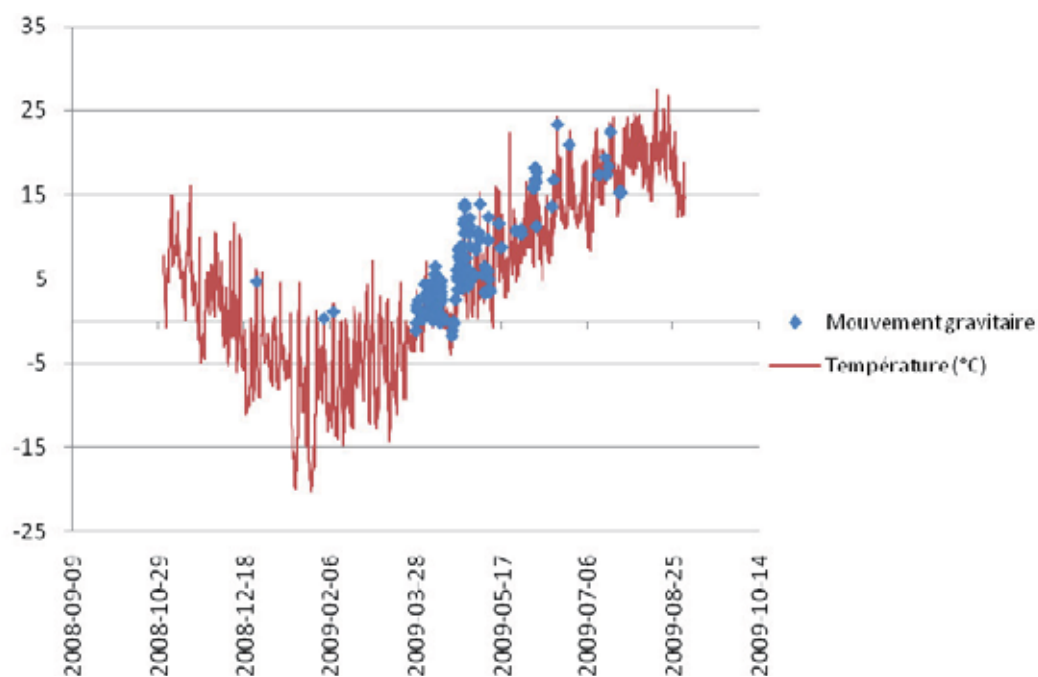


Figure 119. Répartition des mouvements gravitaires en fonction de la température.

7.8 Effets de l'artificialité sur l'évolution côtière

7.8.1 Unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance

Les principales perturbations anthropiques dans l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance sont la fermeture de l'ancien goulet vers 1952-1953 (Dubois et Grenier, 1993), l'enrochement visant à protéger la route 199 à La Martinique et la mise en place d'un remblai au kilomètre 5,5.

Le principal effet des ouvrages de protection en enrochement sur le bilan sédimentaire des plages de la baie de Plaisance est la réduction de la largeur des plages et l'abaissement du niveau de plage. Par conséquent, le déficit sédimentaire est très important au pied des enrochements, voire critique quant à la résilience du système côtier en ce qui a trait aux événements de tempêtes extrêmes. Sur plus des deux tiers du secteur enroché, la plage a disparu ou est plus étroite que pour l'ensemble de la cellule. D'après les mesures générées à partir des levés LiDAR, la moyenne de la largeur des plages du secteur enroché est de 4,3 m, alors que la moyenne de la largeur des plages du secteur naturel est de 41,8 m (et de 52 m selon les profils DGPS) pour le secteur de La Martinique. De plus, le volume sédimentaire des plages est considérablement plus faible (8 402 m³ pour BP3), voire nul (BP1 et BP2), comparé au volume moyen de la plage de 207 970 m³ par compartiment pour l'ensemble du secteur de La Martinique. Selon les profils de plage réalisés de 2008 à 2009, le niveau moyen de la surface de la partie supérieure de la plage a été de 1,2 m par rapport au niveau moyen de la mer pour les plages naturelles, alors qu'il a été seulement de 0,03 m devant les enrochements. Cette faible valeur indique clairement l'absence ou presque de haut estran au pied des enrochements. Des valeurs aussi faibles que -0,63 à -0,72 m ont été mesurées directement au pied des enrochements devant les profils MAR2 et MAR3. Des valeurs négatives ont été mesurées pour les profils MAR2 à MAR5. Un abaissement du niveau moyen de la plage de 0,4 m a été observé au pied de l'enrochement durant l'automne-hiver 2008, conséquence de l'affouillement qui se produit au pied des enrochements en période de tempêtes. Il y a également des crêtes de plage sur les plages naturelles, alors qu'elles disparaissent devant et en bordure des enrochements. En bordure de l'enrochement, on constate aussi une modification de la largeur de la plage, engendrée par un effet de bout (MAR7 à MAR10). La largeur moyenne de la plage est de 32 m et la hauteur de la plage au pied de la microfalaise est de 1,06 m. Il est intéressant de noter que l'effet de bout se fait sentir sur une distance beaucoup plus importante en ce qui a trait à l'érosion de la côte, comparativement à la diminution de la largeur des plages. Par exemple, en aval de l'enrochement de La Martinique, plus de 600 m de ligne de rivage sont en érosion en 2008 avec un taux récent de -0,65 m/an (2001-2008), alors que, en ce qui concerne la largeur des plages, l'effet est principalement perceptible en avant même des structures et seulement sur une distance de 75 m en aval de la structure.

Ces résultats révèlent que la surface de la plage s'est généralement abaissée significativement devant les enrochements. En effet, en comparant les secteurs naturels et artificiels, cet abaissement est évalué en moyenne à 1,2 m pour la baie de Plaisance. La réflexion des vagues sur les structures rigides en est la cause principale. De plus, l'impossibilité pour le trait de côte de se réajuster lors des événements de tempête provoque une érosion importante de la plage. En raison de l'abaissement du niveau de la plage, la base de l'enrochement est envoyée à chaque marée. La fonction naturelle de la plage qui consiste à absorber l'énergie des vagues en est fortement limitée. L'énergie est alors principalement dissipée directement au contact de l'enrochement durant les tempêtes. Ce contexte contribue à augmenter le risque de submersion de l'arrière-côte lors des événements de tempête en raison du jet de rive. Étant donné que le niveau de la plage est sous le niveau moyen de la mer, une attention particulière devrait être portée à l'enrochement et à l'évolution de la plage de la baie de Plaisance.

7.8.2 Unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups

Dans l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups, les jetées au quai, les enrochements, les épis et les remblais pour protéger la route 199, et une épave formant un brise-lame, sont les principales perturbations anthropiques dressés directement sur la côte.

Les ouvrages visant à protéger la route 199 sont localisés dans la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups. Le déficit sédimentaire au pied des enrochements de Pointe-aux-Loups est moins important que pour la baie de Plaisance. La largeur moyenne des plages, basée sur les profils DGPS, est de 21 m au pied des enrochements, comparativement à 4 m pour la baie de Plaisance. Mentionnons cependant que les largeurs de plage les plus étroites (2 à 7 m) ont été mesurées au pied des enrochements. La largeur moyenne des plages en zone naturelle pour la cellule est de 34 m, ce qui fait tout de même en moyenne une réduction de 38 % de la largeur des plages devant les enrochements. De plus, le niveau moyen de la plage au pied des enrochements est de 1,52 m par rapport au niveau moyen de la mer. Cependant, devant l'enrochement situé vis-à-vis des profils PLOU9 et PLOU11, le niveau moyen de plage est seulement de 0,38 et 0,74 m. Le niveau moyen de la partie supérieure de la plage en zone naturelle est de 2,05 m, ce qui fait une différence de 50 cm en moyenne par rapport aux zones artificielles et, au pire, une différence de 1,7 m. La hauteur du niveau de la plage où il y a de la recharge en sable est similaire à la zone naturelle avec une valeur moyenne de 2,13 m. Par ailleurs, l'effet de l'enrochement sur le volume sédimentaire de la plage est considérable devant l'enrochement, avec un volume de 9 945 m³ pour PAL2 et de 14 633 m³ pour PAL3, alors que la moyenne par compartiment pour cette cellule hydrosédimentaire est de 26 373 m³. Cette différence devant le secteur enroché est due à l'affouillement sur la plage, provoqué par la réflexion des vagues sur la structure de

protection rigide. Par ailleurs, les plages naturelles présentent généralement un profil convexe avec une crête de plage très bien définie, alors que le profil devant les zones artificielles est plutôt concave et sans crête de plage. On remarque également qu'en bordure des enrochements la crête de plage est aussi absente ou très peu développée. Mentionnons aussi que les profils de plage devant la falaise rocheuse et à proximité de celle-ci (PLOU1 et 2) présentent une topographie qui se rapproche de celle des secteurs enrochés (figure 20). Pour le secteur de falaise rocheuse, la largeur moyenne de la plage est de 14,5 m et la hauteur moyenne de la surface de la plage au bas de la falaise est de 1,1 m. Cette morphologie est directement liée au type de côte qui est beaucoup plus réfléchissant devant les enrochements et les falaises rocheuses. Mentionnons que la hauteur des plages naturelles est plus élevée en moyenne de 1 m par rapport aux plages des zones naturelles de la baie de Plaisance.

Les ouvrages de protection ont tout de même limité le recul de la ligne de rivage. Autour des kilomètres 21 et 22, la côte a très peu reculé (figure 120 et entouré en rouge sur la figure 52). Sur 800 m, il n'y a presque pas de changement dans la ligne de rivage de 1963 à 2008, et le taux de migration moyen y est de $-0,05$ m/an avec des valeurs locales extrêmes variant seulement de $-0,16$ m/an à $0,07$ m/an. Ce secteur comporte actuellement deux épis et est enroché. Les ouvrages de protection de la route ont ainsi modifié les conditions naturelles qui auraient dû prévaloir dans ce secteur et qui sont observables dans les secteurs environnants. En effet, ce secteur est situé au début de la cellule hydrosédimentaire, de sorte qu'en théorie la dynamique sédimentaire devrait y provoquer une érosion plus importante. Alors que de 1963 à 1992 il y avait bel et bien de l'érosion (de $-0,13$ à $-0,26$ m/an), par la suite, une accumulation (de $0,23$ à $0,09$ m/an) a été mesurée. Des épis ont été construits de 1977 à 1983 et un enrochement s'est ajouté en 1988-1989. Les épis peuvent expliquer une accumulation de sédiments et l'enrochement, une relative fixation de la ligne de rivage. De plus, les recharges en sable, d'un volume total de 2 900 t, qui ont eu lieu au début de 2008 ont également contribué à cette récente accrétion locale.

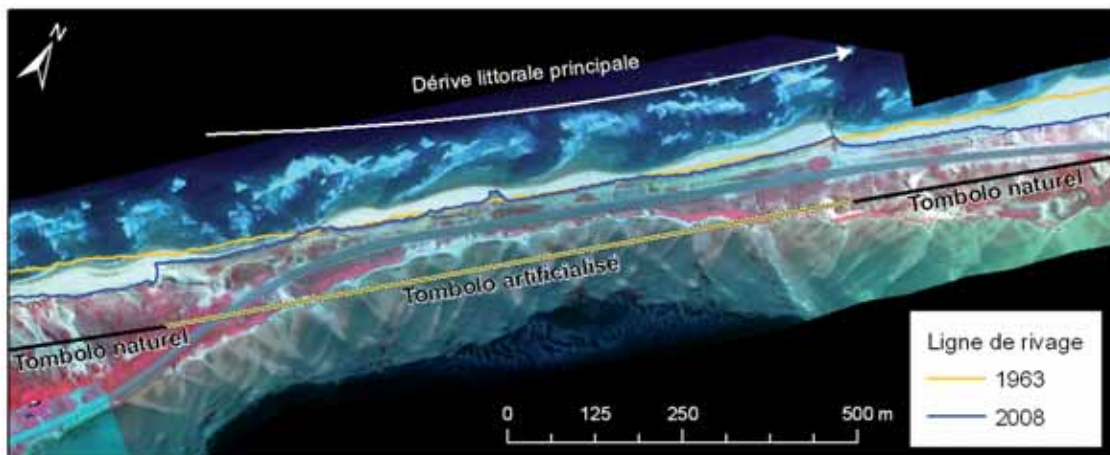


Figure 120. Secteur artificialisé pour la protection de la route 199

Pour la cellule hydrosédimentaire de Fatima, la largeur moyenne de la plage et le niveau moyen de la partie supérieure de la plage mesurés sur les profils de plage levés au DGPS sont respectivement de 41 m et de 2,13 m. Il est intéressant de mentionner que, malgré la différence supérieure de 1 m dans le niveau moyen de la partie supérieure de la plage pour l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups par rapport à celle de la baie de Plaisance, la fréquence d'inondation et de sapement par les vagues du pied de la falaise du tombolo est supérieure dans l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups. Cette différence marquée est directement associée au degré d'exposition aux vents dominants qui produisent des surcotes plus importantes à Pointe-aux-Loups où la hauteur des vagues provoque un jet de rive qui atteint des niveaux beaucoup plus élevés.

Certaines interventions anthropiques peuvent expliquer diverses tendances d'évolution positives ou nulles observées localement, qui contrastent avec le reste des côtes meubles de cette cellule qui sont en érosion importante. Tout d'abord, le brise-lame que forme une épave de navire a créé un secteur propice à l'accumulation de 1963 à 2008, alors que le reste de la côte à tombolo de cette cellule est en érosion durant cette même période (figure 121). L'échouage de ce bateau a réduit l'érosion sur quelques centaines de mètres et provoqué une accréation sur environ 110 m derrière l'épave. Les mesures de largeurs de plage montrent que, vis-à-vis de l'épave, la largeur de la plage est deux fois plus importante (75,2 m) que la largeur moyenne de l'unité hydrosédimentaire (36,9 m). Alors que l'on constatait une érosion jusqu'en 1983, l'arrivée de cette épave en 1988 renverse la tendance et engendre une accumulation semblable à celle provoquée par les brise-lames.

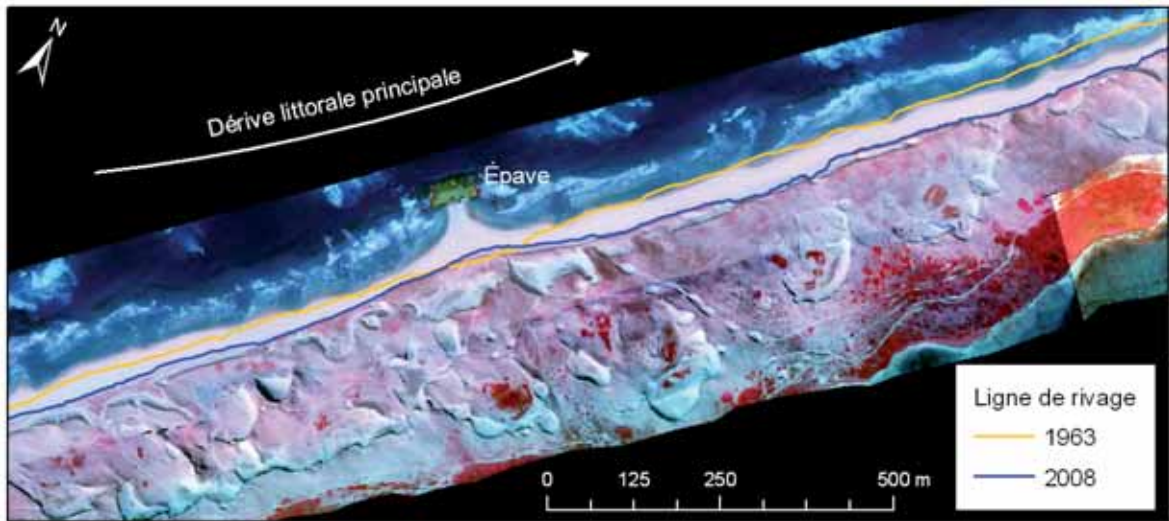


Figure 121. Épave ayant créé un phénomène local d'accrétion (cellule de Fatima)

La terrasse de plage qui se situe sur l'île de la Pointe aux Loups connaît, elle aussi, globalement une accumulation depuis 1963. Celle-ci se trouve en fin de cellule hydrosédimentaire (en amont d'une jetée) et depuis 1984 elle se situe même entre deux jetées. Les sédiments de dragage du quai de Pointe-aux-Loups y sont temporairement déposés, ce qui peut favoriser la progradation de la terrasse de plage.

8. CONCLUSION

L'analyse de la dynamique côtière a permis de délimiter deux unités hydrosédimentaires très distinctes, soit celles de la baie de Plaisance et de la Pointe-aux-Loups. Cette différence entre les deux unités se reflète tant sur le plan des caractéristiques sédimentologiques et géomorphologiques que de l'évolution historique et récente de la côte.

La baie de Plaisance est caractérisée principalement par une prédominance de sable moyen à fin tant sur le haut que sur le bas estran, alors que le sable fin prédomine dans la zone pré littorale, parfois accompagné par le sable très fin ou par du sable moyen. Les sédiments sont bien classés à modérément bien classés. De manière générale, l'analyse temporelle de la taille granulométrique des échantillons montre une faible variabilité dans la texture des sédiments. Les caractéristiques sédimentologiques et la morphologie de la zone pré littorale indiquent un milieu plutôt calme où l'énergie des vagues est grandement dissipée sur la longue plate-forme littorale à l'intérieur de la baie. De plus, l'extension sous-marine de la flèche littorale Sandy Hook et l'île d'Entrée contribuent aussi à protéger la baie des vagues provenant du sud-est et de l'est. Les résultats de l'évolution historique de la ligne de rivage sont aussi conséquents de cette dynamique sédimentaire, puisque le bilan de l'évolution historique (1963 à 2008) montre une progradation de la côte à tombolo selon une vitesse moyenne de 0,84 m/an.

Pour l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups, les sédiments sont plus grossiers avec une prédominance de sable moyen à grossier, tant sur le haut que sur le bas estran, alors que le sable moyen prédomine dans la zone pré littorale. Les sédiments sont bien classés à très bien classés. Tout comme pour la baie de Plaisance, la taille granulométrique des échantillons montre une faible variabilité temporelle dans la texture des sédiments. Ces caractéristiques sédimentologiques associées à la présence de cordons pré littoraux bien développés indiquent un milieu hydrodynamique de forte énergie. La présence de nombreux croissants de plage implique des courants de retour et un milieu réfléchissant qui suggèrent aussi des conditions hydrodynamiques de forte énergie. Le bilan de l'évolution historique de la ligne de rivage (1963 à 2008) confirme le même constat avec une érosion généralisée et un recul moyen pour la côte à tombolo de -0,73 m/an.

L'analyse du budget sédimentaire des plages et des profils de plage montrent clairement deux modes d'évolution morphodynamique, l'un conditionné par des processus naturels et l'autre, par la présence des ouvrages de protection de la route 199. Tout d'abord, il existe une variabilité spatiale naturelle dans la largeur et la hauteur des plages, qui s'observe entre autres par une évolution de la côte et de la plage en dents de scie. Ce modelé qui est particulièrement prononcé du côté de l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups se superpose à une tendance observée dans les deux unités hydrosédimentaires qui montre un engraissement graduel de la plage dans le sens de la dérive

littorale. Cette variabilité est donc conditionnée par les courants de retour et le sens de la dérive littorale principale. Dans l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups, un transfert bidirectionnel des sédiments entre la plage et les cordons pré littoraux est conditionné par les courants de retour et les vagues de tempête. D'autre part, l'ensemble des mesures effectuées indique une nette différence dans la morphologie et le budget sédimentaire des plages naturelles et celles localisées au pied des enrochements. Le déficit sédimentaire est plus élevé pour le secteur enroché de la baie de Plaisance. Lorsque l'on compare les plages naturelles aux plages situées au pied des enrochements, le niveau de la partie supérieure de la plage artificielle est plus bas de 1,2 m et de 0,6 m, respectivement, pour les unités hydrosédimentaires de la baie de Plaisance et de Pointe-aux-Loups. La différence de la largeur de la plage entre les secteurs enrochés et naturels est en moyenne de 47 m et de 14 m, respectivement, pour la baie de Plaisance et la cellule de Pointe-aux-Loups. Pour la baie de Plaisance, la réduction de la largeur des plages depuis la mise en place des premiers enrochements a été de 80 %. Le déficit sédimentaire des plages est donc significatif et constitue une réduction de la résilience du système côtier face aux événements de tempête et augmente le risque de submersion de la route 199.

Par ailleurs, malgré des niveaux de plage généralement plus hauts de 1 m pour l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups, la fréquence de submersion du pied du talus de la côte à tombolo est plus importante en raison des vents dominants de l'ouest et du niveau des vagues. Ces résultats révèlent la pertinence de réaliser une analyse des niveaux d'eau réellement atteints sur la côte à l'aide des caméras de suivi, qui serait couplée à une analyse des niveaux d'eau mesurés aux marégraphes ainsi qu'une analyse du climat des vagues. Ces données seront essentielles dans l'identification des solutions d'adaptation et leur déploiement. Il serait aussi opportun de poursuivre les relevés des profils de plage et de réaliser une analyse plus poussée des conditions climatiques et océanographiques responsables de la variabilité spatiale et temporelle observée pour la topographie des plages. En l'absence ou en période de réduction de glace, ces relevés devraient aussi être faits pendant la période hivernale. De plus, il existe très peu de données sur les processus éoliens et des lacunes sérieuses existent concernant le rôle du transport et de la déflation éolienne sur la dynamique côtière. Les quelques observations réalisées à l'hiver 2010 semblent indiquer, du moins pour le secteur de Pointe-aux-Loups, un transport sédimentaire important par le vent de la plage vers l'arrière-côte. La réduction du couvert de glace sur la plage pourrait, peut-être, favoriser le démaigrissement des plages. Ce transport éolien en l'absence de glace provoque aussi un ensablement de la route 199. Cet ensablement pourrait devenir plus fréquent en raison du réchauffement climatique. Des solutions devront être envisagées pour réduire l'ensablement des infrastructures routières afin de s'adapter à ce nouveau contexte.

Le calcul du budget sédimentaire des plages et du cordon dunaire obtenu à partir des données LiDAR, couplé à l'évolution historique de la côte, a permis d'identifier préliminairement les secteurs les plus vulnérables à l'érosion

côtière. Cette approche pourrait être utilisée pour développer un indice de vulnérabilité et pour cartographier le degré de vulnérabilité des infrastructures routières dans un contexte de changements climatiques. Enfin, l'évolution historique a révélé la formation de brèches de tempête importantes aux extrémités de l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups. Malgré un colmatage effectué par les processus éoliens et la dérive littorale et la reconstruction du système dunaire, ces événements rappellent que les côtes à tombolo demeurent des systèmes précaires sensibles aux événements météorologiques et océanographiques extrêmes. Dans le contexte de la hausse du niveau marin relatif en cours depuis plusieurs siècles aux îles de la Madeleine et de l'accélération récente de la hausse du niveau marin, l'ensemble du système à tombolo et des cordons pré-littoraux de l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups continuera à migrer vers les lagunes à une vitesse relativement rapide de plus de 1 m/an.

Les résultats de cette recherche peuvent contribuer à améliorer d'éventuelles interventions du MTQ visant à protéger la route 199 dans les deux portions étudiées, mais aussi de manière plus générale. Tout d'abord, toute gestion devrait être menée à l'échelle de l'intégralité de la cellule hydrosédimentaire, notamment en ce qui a trait aux conséquences des interventions telles que l'enrochement. Bien que les ouvrages de protection en enrochement aient permis de limiter le recul de la côte, l'abaissement du niveau de la plage et la réduction de sa largeur qu'ils ont provoqués entraînent une augmentation du risque de submersion de la route 199. Ces ouvrages ont aussi amplifié l'érosion à leurs extrémités. Les prochaines interventions pour limiter le recul de la côte devraient tenir compte de ces constatations. Afin d'atténuer ces effets, la recharge en sable semble être une solution à envisager dans le contexte madelinot, puisqu'elle permet d'augmenter la résilience de la côte par l'élargissement de la plage et l'augmentation du budget sédimentaire. Le niveau de la plage postrecharge devra toutefois être assez haut pour soustraire la base des enrochements à l'action des vagues. Des solutions devront aussi être envisagées pour atténuer les effets de bout qui peuvent se faire sentir en aval des ouvrages sur une distance de 600 m pour le trait de côte et de 75 m pour la morphologie de la plage. L'élargissement et l'accrétion de la plage ainsi que la progradation du trait de côte à la suite de l'échouage d'une barge dans l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups permettent d'évaluer la possibilité d'implanter des brise-lames comme solutions d'adaptation.

Enfin, l'étude de l'évolution historique de la côte et du budget sédimentaire a permis de cartographier les zones sensibles à l'érosion, ce qui permettra de planifier à long terme toute nouvelle construction d'infrastructure afin de limiter leur vulnérabilité aux aléas côtiers. Il est aussi essentiel dans la planification de l'implantation des infrastructures routières ou des interventions de prendre en considération la dynamique naturelle des dunes qui peuvent être sujettes à des cycles d'érosion et d'accumulation successifs importants. Ces milieux naturels servent de tampons contre l'érosion et la submersion, et devraient

être protégés afin de maintenir leur résilience, puisqu'ils limitent la vulnérabilité des tronçons routiers situés en arrière.

9. RÉFÉRENCES

ALLISON, I. (dir.) (2009). *The Copenhagen Diagnosis, 2009: Updating the world on the Latest Climate Science*, The University of New South Wales Climate Change Research Centre, Sydney, Australia, 60 p.

ANTHONY, E. J. (1994). "Natural and Artificial Shores of the French Riviera: An Analysis of Their Interrelationship", *Journal of Coastal Research*, vol. 10, no. 1, p. 48-58.

BERNATCHEZ, P. (2003). *Évolution littorale holocène et actuelle des complexes deltaïques de Betsiamites et de Manicouagan-Outardes : synthèse, processus, causes et perspectives*, thèse de doctorat, Université Laval, 460 p.

BERNATCHEZ, P. (2006a). *Bilan de l'érosion côtière sur la Côte-Nord (2000-2005)*, Québec, rapport de recherche remis au ministère des Affaires municipales et des Régions du Québec, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Module de géographie, Université du Québec à Rimouski, février 2006, 36 p.

BERNATCHEZ, P. (2006b). *Implantation d'un réseau de suivi de l'érosion côtière et bilan de l'érosion pour le Bas-Saint-Laurent, la Gaspésie et les Îles-de-la-Madeleine*, Québec, rapport de recherche remis au ministère des Affaires municipales et des Régions du Québec, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Module de géographie, Université du Québec à Rimouski, 65 p.

BERNATCHEZ, P. et J.-M. M. DUBOIS (2004). « Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien », *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 58, n° 1, p. 45-71.

BERNATCHEZ, P., C. FRASER, S. FRIESINGER, Y. JOLIVET, S. DUGAS, S. DREJZA et A. MORISSETTE (2008a). *Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques*, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, rapport de recherche remis au Consortium OURANOS et au FACC, 256 p.

BERNATCHEZ, P., C. FRASER et D. LEFAIVRE (2008b). *Effets des structures rigides de protection sur la dynamique des risques naturels côtiers : érosion et submersion*, 4^e Conférence canadienne sur les géorisques, Université Laval, 20-24 mai 2008, 8 p.

BERNATCHEZ, P. et S. FRIESINGER (2009). *Caractérisation côtière et effets de l'artificialité sur les plages des secteurs de Pointe-aux-Loups et de la baie de Plaisance, îles de la Madeleine. Rapport préliminaire, relevés 2008*, rapport

présenté au ministère des Transports du Québec, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, 88 p.

BIRD E. C. F. (ed.) (1985). *Coastal changes, a global review*, Wiley, Chichester, 219 p.

BLOTT, S. J. and K. PYE (2001). "Gradistat: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments", *Earth Surf. Process. Landforms*, no. 26, p. 1237-1248.

BONN, F. et G. ROCHON (2000). *Précis de télédétection : Principes et méthodes*, Volume 1, Presses de l'Université du Québec, 485 p.

BOUTIN-MILLER, T. (2010). *Application de l'imagerie à la quantification et à l'identification de la dynamique côtière des Îles-de-la-Madeleine : variation interannuelle (2008-2009) du trait de côte de Pointe-aux-Loups et de la baie de Plaisance*, essai de maîtrise, Département de géographie, Université Laval, 103 p.

CANON CANADA (2009). EOS-1Ds Mark II [<http://www.canon.ca/>].

CAZENAVE A., A. LOMBARD, W. LLOVEL (2008). "Present-day sea level rise: a synthesis", *C.R. Geoscience*, no. 340, p. 761-770.

DAIGLE, R., (dir.) (2006). *Les impacts du changement climatique et de l'élévation du niveau de la mer sur la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick*, Environnement Canada, 646 p.

DUBOIS J. M. M. and A. GRENIER (1993). *The Magdalen Islands, Gulf of Saint Lawrence. Coastlines of Canada*, 8th Symposium on Coastal and Ocean Management, 19-23 July 1993, p. 170-182.

FICHAUT, B. et S. SUANEZ (2008). « Le rechargement de la plage de Sainte-Anne-du-Portzic (Brest-Finistère) : quand la recherche fondamentale se met au service d'une gestion cohérente du littoral », *Noréis*, n°208, 2008/3 [<http://norois.revues.org/index2175.html>] (Consulté le 22 janvier 2009).

GEOSPATIAL SYSTEMS, INC. (2006). MS4100 High Resolution 3-CCD Digital Multispectral Camera.

GRENIER, A. (1993). *Évolution littorale récente et impact des structures artificielles aux Îles de la Madeleine, golfe du Saint-Laurent, Québec*, mémoire de maîtrise, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, 275 p.

GRENIER, A. et J.-M. M. Dubois (1992). « Évolution des côtes aux Îles-de-la-Madeleine », p. 59-64, in Dubois, J.-M.M. et J. Gagnon, (éd.), *Les Îles-de-*

la-Madeleine : un pays à découvrir, Info GéoGraphes numéro spécial, n° 1, 126 p.

HILL, H. W., J. T. KELLEY, D. F. BELKNAP and S. M. DICKSON (2004). "The effects of storms and storm-generated currents on sand beaches in southern Maine, USA", *Marine Geology*, no. 210, p. 149-168.

HOLGATE, S. J. and P. L. WOODWORTH (2004). "Evidence for enhanced coastal sea level rise during the 1990's", *Geophysical Research Letters*, no. 31, p. 1-4.

JOLICOEUR, S. and S. O'CARROLL (2007). "Sandy barriers, climate change and long-term planning of strategic coastal infrastructures, Îles-de-la-Madeleine, Gulf of St. Lawrence (Québec, Canada)", *Landscape and urban planning*, vol. 81, p. 287-298.

LEWIS P. J., M. D. MORGAN (1984). *Severe storms of Canada's East coast: a catalogue summary for the period 1957 to 1983*, Report n° 84-13, Canadian Climate Centre, Atmospheric Environment Service, Canadian Climate Program, 322 p.

MORNEAU, F., M. MICHAUD, F. LECOURS, L. CÔTÉ et D. ROY (2001). *Étude d'impact sur l'environnement : projets de protection des berges le long de la route 132 autour de la péninsule gaspésienne*, ministère des Transports du Québec, 84 p. et annexes.

PASKOFF, R. (2003). *Les littoraux, impact des aménagements sur leur évolution*, 3^e édition revue et corrigée, Paris, Armand Colin éditeur, Collection U, série Géographie, 260 p.

PASKOFF, R. et C. CLUS-AUBY (2007). *L'érosion des plages : les causes, les remèdes*, Paris/Monaco, Institut Océanographique, coll. « Propos », 184 p.

PIERRE, G. et P. BERNATCHEZ (2009). *Vulnérabilité à l'érosion côtière et à la submersion des étangs aérés du secteur de Fatima (Îles-de-la-Madeleine)*, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, rapport de recherche remis à la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, 24 p.

RIEGL (2004). Short-Range Airborne Laser Scanner LMS-Q140i-60/80, RIEGL Laser Mirror Scanner LMSQ140i, 3 p.

SAMAT, O. (2007). *Efficacité et impact des ouvrages en enrochement sur les plages microtidales*, thèse de doctorat, Université de Provence, UFR des sciences géographiques et de l'aménagement, France, 342 p.

SÁNCHEZ-BADORREY, E., M. A. LOSADA and J. RODERO (2006). "Sediment transport patterns in front of reflective structures under wind wave-dominated conditions", *Coastal Engineering*, no. 55, p. 685-700.

SUMER, B. M., R. J. S. WHITEHOUSE and A. TØRUM (2001). "Scour around coastal structures: a summary of recent research", *Coastal Engineering*, no. 44, p. 153-190.

THIELER, E. R., E. A. HIMMELSTOSS, J. L. ZICHICHI and T. L. MILLER (2005). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 3.0: An ArcGIS extension for calculating shoreline change*, U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1304.

VERMEER, M. and F. RAHMSTORF (2009). "Global sea level linked to global temperature", *PNAS*, no. 106, p. 21527-21532.

VIRTUALDB 1.9.6 (2009). [<http://www.virtualdub.org/>].

Annexe 1 A
Fiche de caractérisation côtière

Région	CARACTÉRISATION CÔTIÈRE 2008 (FICHE DE SEGMENTATION)
--------	---

Date et heure : _____ Observateurs _____

CARACTÉRISATION DU SEGMENT

N° de segment _____ Latitude _____ Longitude _____ Sens : *vers* : _____

Type de côte		# photos
Configuration	convexe, concave, fortem. indenté, légèrement. indenté , rectil.	

1. BAS ESTRAN / CHENAL / SLIKKE	
<i>Indices : l'avant flexure, dégagé à marée basse et masqué à marée montante</i>	
a. Lithologie	Meuble Rocheux
b. Infra. (artificialité)	
c. État de l'infra.	b pe te ce
d. Éléments morpho.	
e. Notes :	

2. HAUT ESTRAN / PLAGESCHORRE INFÉRIEUR	
<i>Indices : l'après flexure, masqué à marée haute, limite = parfois végétatio /do</i>	
a. Lithologie/strati.	
b. Largeur	qa te e m l tl
c. Végétation	a arb her t
d. Infra. (artificialité)	
e. État de l'infra.	b pe te ce
f. Éléments morpho.	
g. Notes :	

3. LIGNE DE RIVAGE / LIMITE ENTRE SCHORRE INF. ET SUP.	
<i>Indices : limite de végétation dense ,débris organiques, micro-t. falaises,</i>	
a. Lithologie/strati. (encercler litho. dominante)	
b. Hauteur	sf mf b m h th
c. Végétation	a arb her t
d. État ligne de riv.	a sv v acc
e. Infra. (artificialité)	
f. État de l'infra.	b pe te ce
g. Processus actifs	
h. Aléas	sub ino ér mou chb su
i. Notes :	

4. HAUT DE PLAGESPLAINESCHORRE SUP.	
<i>Indices : Limite = début végét.; n'est pas touché par les marée haute moy.</i>	
a. Lithologie/strati.	
b. Largeur	qa te e m l tl
c. Végétation	a arb her t
d. Infra. (artificialité)	
e. État de l'infra.	b pe te ce
f. Éléments morpho.	
g. Aléas	sub ino ér mou chb su
h. Notes :	

5. ARRIÈRE-PLAGE / CRUE EXEPTIONNELLE	
<i>Indices : souvent végétalisée à 100 %, quelques débris de tempête</i>	
a. Lithologie/strati.	
b. Largeur	qa te e m l tl
c. Végétation	a arb her t
d. Infra. (artificialité)	
e. État de l'infra.	b pe te ce
f. Éléments morpho.	
g. Aléas	sub ino ér mou chb su
h. Notes :	

6. TRAIT-DE CÔTE / VERSANT	
<i>Indice s: falaise, limite entre la côte et l'arrière-côte, végétation</i>	
a. Lithologie/strati. (encercler litho. dominante)	
b. Hauteur	sf mf b m h th
c. Végétation	a arb her t
d. État trait de côte	a sv v acc
e. Infra. (artificialité)	
f. État de l'infra.	b pe te ce
g. Processus actifs	
h. Aléas	sub ino ér mou chb su
i. Notes:	

7. REMARQUES ET COMMENTAIRES
a. Activités (utilisation du sol) : b. Remarques : Croquis au verso

Annexe 1 B
Légende de la caractérisation côtière

a. Lithologie et stratigraphie

argile (< 4 microns)	ag
silt (limon) (entre 4 et 62 microns)	si
sable fin (entre 62 microns et 0,25 mm)	sf
sable moyen (0,25 à 0,5 mm)	sm
sable grossier (0,5 à 2 mm)	sg
sable (indifférencié) (63 microns à 2 mm)	s
gravier (2 à 64 mm)	g
galets (64 à 256 mm)	ga
bloc (256 mm et +)	bl
roc cristallin	r
roc sédimentaire	rs
coquillage	coq
matière organique	mo
vase (marais)	v
dépôt de versant	dv
remblais	rem
résidus de bois (anthropique)	rbo

b. Largeur

quasi absente (moins de 5 m)	qa
très étroite (5 à 10 m)	té
étroite (10 à 15 m)	é
moyenne (15 à 20 m)	m
large (20 à 30 m)	l
très large (+ de 30 m)	tl

c. Hauteur

sans falaise	sf
microfalaise (- de 1,5 m)	mf
basse (1,5 à 5 m)	b
moyenne (5 à 10 m)	m
haute (10 à 20 m)	h
très haute (+ de 20 m)	th

e. État de l'infrastructure

bon (75-100 %)	b
partiellement endommagée (50-75 %)	pe
très endommagée (25-50 %)	te
complètement endommagée (0-25 %)	ce

d. Infrastructure (artificialité)

aboiteau	a
blocs déversés	bd
brise-lame	blam
caissons	c
calvette	cal
écran organique	éo
enrochement	enr
épis de bois	épb
épis rocheux	épr
escalier	es
jetée rocheuse	jr
muret de béton	mbt
muret de bois	mbo
muret de pierres	mpi
portuaire multiple	pnu
quai	q
rampe de mise à l'eau	rme
remblais	rem

f. Activités, utilisation du sol

agricole	agr
boisé (petite étendue de bois)	b
camping	cam
champs	ch
commercial	co
forestier	for
industriel	ind
milieu humide (marécage)	mh
récréatif	réc
résidentiel	rés
routes (incluant chemins)	rte
tourbière	t
villégiature	vil

g. Processus actifs

canal de drainage	cd
coulée argileuse (+ de 10 m de prof.)	ca
coulée boueuse (- de 10 m de prof.)	cb
coulée de sable sec	css
coulée en ravin (méga)	cr
cours d'eau	ce
cryogénique	cry
déflation éolienne	de
dessiccation	dec
éboulement/éboulis	éb
effet de bout	efb
effond. de débord organique	efdo
effond./disjonction en bloc(gel)	edb
effond./disjonction en dalle(gel)	edd
effondrement ortstein	orst
effondrement/encoche (vagues)	efe
éolien (transport ou accumulation)	éol
gélifraction	géli
glaciel	gl
glissement décroch./superficiel	gds
glissement en plan (roc/roc)	gpl
glissement pelliculaire (meubles/roc)	gp
glissement rotationnel (+ de 10 m)	gr
courant de marée	cm
nichage (trou)	nich
picorage	pic
piétinement	pi
prélèvement (anthro pique)	pr
ravinement (pluies)	rav
ruissellement concentré (résurgence)	rc
submersion des terres	sub
suffosion	su
vagues	vg
véhicule tout-terrain	vtt

h. Ressources biolo/habitats

bancs de mollusques	bm
colonie d'oiseaux	co
frayère	f
herbier (zostère)	hz
marécage	ma
site de nidification	sn
tourbière	t
marais maritime	mm

i. Éléments morphologiques

affleurements rocheux	aroc
bancs de débordements	bd
blocs glaciels	bg
bancs longitudinaux (axiaux) (rivière)	blon
bancs transversaux (rivière)	bt
cayoudere	c
cone de déjection	cd
cicatrices glacielles	cg
chenal d'eau douce	ched
chenaux de marée	chm
crêtes et sillons	cs
cordon transgressif	ct
cuvette intertidale	cu
débris organiques (laisse)	do
delta subaquatique	ds
dune	du
écueil (+de 1m haut)	écu
île	île
lobe transgressif	lt
mouille (estuaire)	moui
plage soulevée	ps
queue de comète	qc
seuil (estuaire)	se

i. Aléas

submersion	sub
inondation (rivière)	ino
érosion (vagues)	èr
mouvement de masse	mou
chute de blocs	chb
suffosion	su

k. État de la cote

active ou vive (- de 25% végé.)	a
semi-végétalisée (entre 25 et 75% végé.)	sv
stable ou végétalisée (+ de 75% végé.)	v
accumulation (progradation)	acc

I. Type de végétation

herbacé	her
arbuste	arb
arbre	a
tourbière	t

m. Type de côte*

deltaïque	d
dunaire	du
exutoire d'un cours d'eau	ece
falaise rocheuse	fr
flèche littorale	fl
glaciaire rocheux	gr
glaciaire till	gt
glacio-marin	gm
falaise argileuse intertidale	fai
falaise argileuse marine	fam
marais maritime	mm
rocheuse sans falaise	rsf
terrasse de plage	tp
tombolo	to

* lorsque base rocheuse $\geq 50\%$ de hauteur = Ex. "fr-d"

* lorsque sommet meuble > 50% de hauteur = Ex. "d-br"

*préciser hauteur de la base rocheuse et du sommet meuble

* préciser lorsque les côtes sont jumelées. Ex: fl-mm

* lorsque base rocheuse > 1 m. on ajoute "-br"

* lorsque sommet meuble (som) > 1m, on ajoute le type de dépôt (ex: deltaïque) ou "som" lorsque le dépôt est indéterminé

