



Université du Québec
à Rimouski

**INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES
MORPHOSÉDIMENTOLOGIQUES DE L'ESTRAN SUR
L'ÉROSION DES CÔTES DE LA RIVE SUD DE
L'ESTUAIRE MARITIME DU SAINT-LAURENT, QUÉBEC**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en géographie
en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences

PAR

© CAROLINE PINSONNAULT

Août 2017

Composition du jury :

Thomas Buffin-Bélanger, président du jury, Université du Québec à Rimouski

Guillaume Marie, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Pascal Bernatchez, codirecteur de recherche, Université du Québec à Rimouski

**Pierre Stéphan, examinateur externe, Centre National de la Recherche Scientifique
(CNRS - France) - Université de Bretagne Occidentale**

Dépôt initial le 16 janvier 2017

Dépôt final le 7 août 2017

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

*« Croyez en vos rêves et ils se
réaliseront peut-être. Croyez en vous
et ils se réaliseront sûrement. »*

- Martin Luther King

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier mon directeur de recherche Guillaume Marie, qui m'a supervisée et soutenue au cours des dernières années. Je le remercie de m'avoir confié ce projet, qui constitue le plus grand défi que j'ai eu à relever dans ma vie (jusqu'à maintenant... !). Son expérience et ses conseils tout au long du projet ont permis de l'élever à un haut niveau pour le rendre des plus intéressant, jumelant recherche fondamentale et pratique. Même lorsque j'ai rencontré des obstacles importants dans ma vie personnelle, il a toujours été compréhensif et n'a cessé de m'encourager, et je l'en remercie beaucoup.

Je tiens également à remercier Pascal Bernatchez, mon codirecteur de recherche. Même si nous ne nous sommes pas rencontrés aussi souvent que nous l'aurions souhaité, il m'a donné de précieux conseils lors de nos rencontres pour l'avancement du projet. Chaque fois, nos échanges ont été des plus enrichissants pour le développement mes connaissances en géomorphologie côtière.

Je souhaite aussi remercier toutes les personnes qui m'ont aidée sur le terrain, bravant vents et marées : Jean-Pierre Bélanger-Castonguay, David Didier, Laurent Gosselin, Myriane Houde-Poirier, Marie Maillot, Stéphanie Van Wiertz. Je remercie également Adrien Lambert de m'avoir écrit un script essentiel pour le calcul des données morphométriques, Nicolas Casajus et Thomas Buffin-Bélanger pour m'avoir guidée à travers les analyses statistiques, ainsi que tous les membres du laboratoire de recherche en dynamique et gestion intégrée des zones côtières pour leur conseils et leur soutien lorsque j'en avais le plus besoin.

La réalisation de ce projet a été possible grâce au financement de la Chaire de recherche en géoscience côtière et du gouvernement du Québec avec son Cadre de

prévention des principaux sinistres, qui m'a permis de me consacrer entièrement à mon projet pendant plusieurs années, ainsi que la Fondation UQAR et des Caisses Populaires Desjardins du Centre-Sud gaspésien et du Littoral gaspésien pour les bourses qu'ils m'ont attribuées.

En terminant, un immense merci est adressé à mon meilleur ami et conjoint, Laurent Gosselin, sans qui je n'aurais jamais pu mener à terme ce projet. Il m'a fourni une aide inespérée et un soutien en or à chaque étape du projet, et ce jusqu'à la toute fin. Merci d'avoir cru en moi et de m'avoir encouragée tous les jours. Un merci tout spécial à mes parents qui ont cru en moi et qui ont toujours été présents pour m'aider et me soutenir, beau temps, mauvais temps.

RÉSUMÉ

L'estran est une composante côtière qui a rarement été considérée dans l'évaluation des risques côtiers au Québec. La présente étude vise à déterminer si les caractéristiques géomorphologiques de l'estran influencent le taux de déplacement de la ligne de rivage, principalement sur les côtes naturelles à terrasse de plage de la côte sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent, entre Pointe-au-Père (Rimouski) et Matane, puis à les identifier. Cette étude constitue également la première à quantifier leur influence, et ce, à plusieurs échelles spatiales. Pour ce faire, une typologie d'estran adaptée au Québec maritime a été développée et appliquée en vue de caractériser l'ensemble des estrans du site d'étude par photo-interprétation et validation sur le terrain. Ensuite, les caractéristiques morphométriques ont été calculées à partir de données LiDAR sur 2176 profils d'estran, puis, mis en relation avec le taux de déplacement du TDC des périodes 1993-2009 et 2009-2012. Les résultats révèlent qu'il existe une relation entre le taux de déplacement et les caractéristiques morphométriques de l'estran, soit : la pente moyenne, la rugosité et la largeur de l'estran, ainsi que l'altitude de la ligne de rivage. La force des relations identifiées varie en fonction du type d'estran et de l'échelle spatiale analysée. La tendance générale indique qu'un estran étroit ayant une pente forte et une rugosité élevée est associé à un recul de la côte plus important pour la période 1993-2009. Toutefois, on observe la tendance inverse pour la période 2009-2012, marquée par la tempête exceptionnelle de décembre 2010. La morphométrie et la composition de l'estran semblent constituer les facteurs clés de la géomorphologie de l'estran expliquant en partie les variations du taux de déplacement mesuré sur le site d'étude. Le type de plate-forme rocheuse semble également

jouer un rôle sur le déplacement de la côte où l'estran est de type mixte ou à dominante rocheuse. À la lumière des résultats de la présente étude, il serait pertinent d'intégrer ces paramètres de l'estran dans la méthode de cartographie de l'aléa érosion dans le cadre des travaux sur la gestion du risque d'érosion côtière.

Mots clés : Géomorphologie côtière, Estran, Aléa érosion côtière, Estuaire du Saint-Laurent, Typologie d'estran.

ABSTRACT

The foreshore is a coastal component rarely considered in coastal hazard evaluations in the Quebec province. The purpose of this study is to determine if the foreshore geomorphological characteristics influences the shoreline movement rate, more specifically on beach terraces of the St-Lawrence marine estuary south shore, between Pointe-au-Père (Rimouski) and Matane, and identify them. This study is also the first to quantify their influence on multiple spatial scales. In order to characterize all the foreshores types found on the study site, a foreshore classification adapted to the maritime Quebec has been developed and applied by photointerpretation and validated by field data. Afterwards, the morphological characteristics have been calculated based on LiDAR data on 2176 foreshore transects, and then linked to the shoreline annual movement for the 1993-2009 and 2009-2012 periods. The results show an existing relation between the shoreline movement and the main morphometric characteristics, which are: slope, roughness and width of the foreshore and the shoreline altitude. The force of these relations varies according to foreshore type and spatial scale. The general trends indicate that short and steep foreshores with high roughness are associated to a more important shoreline retreat for the 1993-2009 period. However, we observe reverse trends for the 2009-2012 period marked by an exceptional storm in 2010. The foreshore morphometric and composition seems to be the key factors of the foreshore geomorphology that explains best the shoreline movement rate measured on the study site. The platform type also seems to play an important role on shoreline movement rates where the foreshore has a mixt composition or mostly rocky. In the light of this study's results, it would be relevant to include these foreshore parameters in the erosion hazard cartography method for the next researches on coastal erosion hazard management.

Keywords: Coastal geomorphology, Foreshore, Coastal erosion hazard, Saint-Lawrence Estuary, Foreshore classification

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	xi
RÉSUMÉ	xiii
ABSTRACT	xv
TABLE DES MATIÈRES	xvii
LISTE DES TABLEAUX	xxv
LISTE DES FIGURES	xxxii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xxxix
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 Revue de littérature sur les estrans et leur potentiel d'influence sur l'aléa érosion	5
1.1. LE SYSTEME COTIER.....	5
1.2. LES GRANDS GROUPES D'ESTRAN	7
1.2.1. Estrans rocheux.....	7
1.2.1.1. Classifications des plates-formes rocheuses.....	9
1.2.1.2. Morphologie subtidale d'une plate-forme rocheuse	13
1.2.1.3. Facteurs et processus influençant l'évolution d'une plate-forme	14
1.2.2. Estrans meubles non cohésifs	22
1.2.2.1. Classification des plages.....	23
1.2.2.2. Facteurs et processus influençant l'évolution des plages	26
1.2.3. Estrans meubles cohésifs	33

1.2.3.1. Classifications et composantes des estrans meubles cohésifs	34
1.2.3.2. Facteurs et processus influençant l'évolution des marais maritimes.....	37
1.3. POTENTIEL D'INFLUENCE DES ESTRANS SUR L'ÉROSION DE LA CÔTE	44
1.3.1. Composition de l'estran.....	44
1.3.1.1. Présence d'écueils rocheux sur un estran à dominante sableuse	44
1.3.1.2. Présence d'un cordon littoral sur un estran à dominance rocheuse	45
1.3.2. Morphologie de l'estran.....	45
1.3.2.1. Largeur et pente de l'estran	46
1.3.2.2. Rugosité de l'estran	47
1.3.2.3. Élévation	48
1.3.3. Végétation sur l'estran et en zone subtidale	48
CHAPITRE 2 Présentation du site d'étude	51
2.1. LOCALISATION.....	51
2.1.1. Site global	51
2.1.2. Sites spécifiques	52
2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE.....	56
2.3. CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE	57
2.3.1. Composantes générales du littoral de l'estuaire maritime	57
2.3.2. Types de côtes présents sur le site d'étude	58
2.3.3. Diversité d'estran.....	60
2.3.4. Dynamique côtière.....	63
2.3.4.1. Dynamique hydrosédimentaire.....	63
2.3.4.2. Processus côtiers.....	63
2.3.4.3. Facteurs influençant les processus côtiers	65
2.4. CONDITIONS METEO-MARINES	67
2.4.1. Couvert de glace	68
2.4.2. Événement de tempête extrême en 2010	68

CHAPITRE 3 Méthodologie	71
3.1. TYPOLOGIE DES ESTRANS	71
3.1.1. Familiarisation avec le terrain	72
3.1.1.1. Imagerie aérienne	72
3.1.1.2. Campagne de terrain	73
3.1.2. Critères et paramètres retenus.....	74
3.1.3. Limites et conditions	74
3.2. CARTOGRAPHIE DE LA ZONE COTIERE	75
3.2.1. Délimitation de l'estran	75
3.2.1.1. Ligne de rivage	75
3.2.1.2. Ligne de flexure.....	76
3.2.1.3. Limite inférieure du bas-estran.....	76
3.2.2. Segmentation de la côte à l'étude	81
3.3. CARACTERISATION DES ESTRANS.....	83
3.3.1. Données acquises via les bases de données existantes	84
3.3.2. Données acquises par photo-interprétation.....	84
3.3.3. Données acquises par mesures et calculs.....	88
3.3.3.1. Données morphométriques	89
3.3.3.2. Données d'orientation.....	91
3.3.4. Limites et conditions	91
3.4. CALCUL DES TAUX DE DEPLACEMENT DE LA COTE.....	92
3.4.1. Données	92
3.4.2. Méthode de calcul.....	95
3.4.3. Limites et conditions	97
3.5. ANALYSES STATISTIQUES ET COMPARATIVES	97
3.5.1. Regroupement des données	98
3.5.2. Analyses exploratoires.....	100

3.5.2.1. Variables quantitatives	100
3.5.2.2. Variables qualitatives	102
3.5.3. Analyses avancées	104
3.5.4. Analyses comparatives	106
3.5.5. Limites et conditions	107
CHAPITRE 4 Les estrans de la rive sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent :	
typologie et caractéristiques	109
4.1. TYPOLOGIE DEVELOPPEE	109
4.1.1. Types d'estran.....	109
4.1.1.1. Estrans à dominante rocheuse.....	112
4.1.1.2. Estrans à dominante meuble non cohésif	112
4.1.1.3. Estrans à dominante meuble cohésif	112
4.1.1.4. Estrans mixtes (sans composante dominante)	113
4.1.2. Nomenclature.....	118
4.2. CARACTERISATION DES ESTRANS ET DEPLACEMENT DU DE LA COTE	119
4.2.1. Vue d'ensemble du site d'étude.....	120
4.2.1.1. Géomorphologie	120
4.2.1.2. Taux de déplacement sur l'ensemble de la côte	124
4.2.1.3. Degré de l'anthropisation des côtes.....	126
4.2.2. Par type de côte.....	127
4.2.2.1. Composition.....	127
4.2.2.2. Morphologie	128
4.2.2.3. Végétation aquatique	129
4.2.2.4. Taux de déplacement de la côte.....	129
4.2.3. Par combinaison	131
4.2.3.1. Composition.....	131
4.2.3.2. Morphologie	131

4.2.3.3. Végétation aquatique	133
4.2.3.4. Taux de déplacement	133
4.2.4. Par cellule hydrosédimentaire	135
4.2.4.1. Composition.....	135
4.2.4.2. Morphologie	136
4.2.4.3. Déplacement de la côte et degré d'anthropisation.....	137
4.2.5. Par site spécifique	139
4.2.5.1. Sous-groupe 1 : les sites 1, 7 et 9	139
4.2.5.2. Sous-groupe 2 : les sites 2 et 3	143
4.2.5.3. Sous-groupe 3 : les sites 4 et 10	146
4.2.5.4. Site 5	150
4.2.5.5. Site 6	152
4.2.5.6. Site 8	154
CHAPITRE 5 Analyses statistiques	157
5.1. ANALYSES EXPLORATOIRES.....	158
5.1.1. Distribution des données quantitatives	158
5.1.2. Résultats des ACP et des matrices de corrélation de Spearman	161
5.1.3. ANOVA.....	163
5.1.3.1. Ensemble des données	164
5.1.3.2. Analyses par combinaison	166
5.2. ANALYSES AVANCEES.....	171
5.2.1. Résultats à l'échelle de l'ensemble du site d'étude	172
5.2.1.1. Résultats avec l'ensemble des données	172
5.2.1.2. Résultats par type de côte	174
5.2.1.3. Résultats par combinaison	177
5.2.2. Résultats à l'échelle des cellules hydrosédimentaires	190
5.2.2.1. Pour l'ensemble des profils de chaque cellule.....	191

5.2.2.2. Pour chaque combinaison de chaque cellule	196
5.2.3. Résultats à l'échelle des sites spécifiques.....	205
5.3. ANALYSES COMPARATIVES.....	216
5.3.1. Couplage des caractéristiques descriptives et morphométriques.....	217
5.3.1.1. Relation avec le degré d'anthropisation	218
5.3.1.2. Relation avec la formation géologique substrat	220
5.3.1.3. Relation avec l'orientation de la côte	223
5.3.1.4. Relation entre les caractéristiques morphométriques	224
5.3.2. Analyses comparatives des échelles spatiales	227
5.3.3. Analyse comparative des périodes 1993-2009 et 2009-2012.....	232
5.3.3.1. Sens des relations.....	232
5.3.3.2. Force et nombre de relations plus importantes entre 1993 et 2009.....	236
5.3.4. Tests comparatifs avec les taux d'érosion et d'accrétion	237
CHAPITRE 6 Discussion.....	241
6.1. INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES GEOMORPHOLOGIQUES SUR L'HYDRODYNAMIQUE DES VAGUES	241
6.1.1. Rugosité de l'estran	242
6.1.2. Pente de l'estran.....	246
6.1.3. Largeur de l'estran.....	248
6.1.4. Présence et type de plate-forme rocheuse.....	252
6.1.5. Différence d'orientation entre la côte et les strates de la plate-forme	255
6.1.6. Autres caractéristiques géomorphologiques à évaluer dans de futures recherches	257
6.1.6.1. Pendage des strates de la plate-forme.....	257
6.1.6.2. Élévation de la plate-forme.....	257
6.1.6.3. Topographie de la plate-forme en avant-côte	258
6.1.6.4. Pied de glace	259

6.2. INFLUENCE DE LA TEMPETE DE 2010 SUR LE SENS ET LA FORCE DES RELATIONS.....	261
6.3. SYNTHESE.....	262
CONCLUSION GÉNÉRALE	267
BIBLIOGRAPHIE	271
ANNEXES	283
ANNEXE I	285
ANNEXE II	297
ANNEXE III.....	303
ANNEXE IV	307
ANNEXE V	311
ANNEXE VI	313
ANNEXE VII.....	327
ANNEXE VIII.....	333
ANNEXE IX	343
ANNEXE X.....	357
ANNEXE XI	361
ANNEXE XII.....	367
ANNEXE XIII.....	369
ANNEXE XIV.....	371
ANNEXE XV.....	375
ANNEXE XVI.....	379

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. 1 : Processus de dynamique morphosédimentaire présent dans la région à l'étude	27
Tableau 1. 2 : Principaux facteurs favorisant l'érosion des estrans sableux	28
Tableau 1. 3 : Facteurs influençant l'impact des événements de fortes tempêtes sur une côte sableuse	31
Tableau 2. 1 : Localisation et caractéristiques générales des sites spécifiques à l'étude. Source des données géologiques	54
Tableau 2. 2 : Composition de chaque suite stratigraphique de la géologie régionale présente sur le site d'étude	56
Tableau 2. 3 : Types de côtes retrouvés dans la région à l'étude	59
Tableau 2. 4 : Facteurs influençant l'impact des processus d'érosion de la ligne de rivage	65
Tableau 3. 1 : Critères de détermination de la limite inférieure du bas-estran.....	80
Tableau 3. 2 : Caractéristiques qualitatives recueillies.....	84
Tableau 3. 3 : Description des segments classés selon leur degré d'anthropisation	86
Tableau 3. 4 : Description des classes pour les caractéristiques qualitatives ordinales.	88
Tableau 3. 5 : Équations utilisées pour le calcul des pentes et des indices de rugosité.....	90

Tableau 3. 6 : Vue d'ensemble de la base de données où N = nombre de groupes par ensemble de données, et n = nombre d'individus (profils) par groupe.	99
Tableau 4. 1 : Caractéristiques spécifiques de chaque type d'estran	110
Tableau 4. 2: Nomenclature des « combinaisons »	118
Tableau 4. 3 : Statistiques descriptives des caractéristiques morphométriques des estrans sur l'ensemble du site d'étude	122
Tableau 4. 4 : Statistiques descriptives des mesures de déplacement de la ligne de rivage pour l'ensemble du site d'étude	125
Tableau 4. 5 : États de la côte entre 1993-2009 et 2009-2012	126
Tableau 4. 6 : Taux de déplacement annuel moyen (m/an) pour 1993-2009 et 2009-2012 par degré d'anthropisation.....	127
Tableau 4. 7 : Taux de déplacement annuel moyen de la ligne de rivage selon le type de côte.....	130
Tableau 4. 8 : Taux de déplacement annuel moyen de la ligne de rivage selon la combinaison.....	134
Tableau 4. 9 : Taux de déplacement annuel moyen et degré d'anthropisation par cellule hydrosédimentaire.....	138
Tableau 4. 10 : Statistiques descriptives sur le déplacement de la côte au site 1.	142
Tableau 4. 11 : Statistiques descriptives sur le déplacement de la côte au site 7.	142
Tableau 4. 12 : Statistiques descriptives sur le déplacement de la côte au site 9.	143
Tableau 4. 13 : Statistiques descriptives sur le déplacement de la côte au site 2.	146
Tableau 4. 14 : Statistiques descriptives sur le déplacement de la côte au site 3.	146
Tableau 4. 15 : Statistiques descriptives sur le déplacement de la côte au site 4.	149

Tableau 4. 16 : Statistiques descriptives sur le déplacement de la côte au site 10.	150
Tableau 4. 17 : Statistiques descriptives sur le déplacement de la côte au site 5.	151
Tableau 4. 18 : Statistiques descriptives sur le déplacement de la côte au site 6.	153
Tableau 4. 19 : Statistiques descriptives sur le déplacement de la côte au site 8.	156
Tableau 5. 1 : Caractéristiques morphométriques ciblées par les ACP, regroupées en cinq classes selon la méthode des seuils observés.....	163
Tableau 5. 2 : Résultats des ANOVA entre le taux de déplacement 1993-2009 et les caractéristiques descriptives analysées pour chaque combinaison des côtes à terrasse de plage pour l'ensemble du site d'étude. S/O : absence de la caractéristique, NA : 1 seul groupe présent.	167
Tableau 5. 3 : Régressions linéaires concluantes pour les données de l'ensemble du site d'étude avec le taux de déplacement 1993-2009. N = 2176 profils.	173
Tableau 5. 4 : Régressions linéaires concluantes pour les données du secteur Baie-des-Sables – Matane avec le taux de déplacement 1993-2009. N = 1006 profils.	173
Tableau 5. 5: Régressions linéaires concluantes pour les côtes à terrasse de plage avec le taux de déplacement 1993-2009. N = 1999 profils.	175
Tableau 5. 6 : Régressions linéaires concluantes pour les côtes à falaise meuble avec le taux de déplacement 1993-2009. N = 42 profils.	175
Tableau 5. 7 : Régressions linéaires concluantes pour les côtes à falaise rocheuse. N = 37 profils.	176
Tableau 5. 8 : Régressions linéaires concluantes pour les côtes rocheuses sans falaise. N = 91 profils.....	176
Tableau 5. 9 : Régressions linéaires concluantes pour les estrans de la combinaison A1. N = 47 profils.....	179

Tableau 5. 10 : Régressions linéaires concluantes pour les estrans de combinaison A2. N = 714 profils.....	180
Tableau 5. 11 : Régressions linéaires concluantes pour les estrans de combinaison A3. N = 395 profils.....	182
Tableau 5. 12 : Régressions linéaires concluantes pour les estrans de combinaison A4. N = 33 profils.....	182
Tableau 5. 13 : Régressions linéaires concluantes pour les estrans de combinaison A5. N = 96 profils.....	183
Tableau 5. 14 : Régressions linéaires concluantes pour les estrans de combinaison A7. N = 79 profils.....	183
Tableau 5. 15 : Régressions linéaires concluantes pour les estrans de combinaison A8. N = 638 profils.....	184
Tableau 5. 16 : Régressions linéaires concluantes pour les estrans de combinaison A2 pour le secteur Baie-des-Sables – Matane. N = 371 profils.	187
Tableau 5. 17 : Régressions linéaires concluantes pour les estrans de combinaison A3 pour le secteur Baie-des-Sables – Matane. N = 197 profils.	188
Tableau 5. 18 : Régressions linéaires concluantes pour les estrans de combinaison A5 pour le secteur Baie-des-Sables – Matane. N = 69 profils.	188
Tableau 5. 19 : Régressions linéaires concluantes pour les estrans de combinaison A8 pour le secteur Baie-des-Sables – Matane. N = 275 profils.	189
Tableau 5. 20 : Régressions linéaires concluantes pour les données de la cellule de l’Anse-aux-Coques. N = 253 profils.	191
Tableau 5. 21 : Régressions linéaires concluantes pour les données de la cellule de Saint-Ulric - Matane. N = 251 profils.	192
Tableau 5. 22 : Régressions linéaires concluantes pour les données de la cellule de Tartigou. N = 790 profils.....	192

Tableau 5. 23 : Régressions linéaires concluantes pour les combinaisons la cellule de l'Anse-aux-Coques	196
Tableau 5. 24 : Régressions linéaires concluantes pour les combinaisons la cellule de Tartigou.	199
Tableau 5. 25 : Régressions linéaires concluantes pour le site spécifique #1 (A3). N = 30 profils.....	207
Tableau 5. 26 : Régressions linéaires concluantes pour le site spécifique #2 (A2). N = 47 profils.....	208
Tableau 5. 27 : Régressions linéaires concluantes pour le site spécifique #3 (A2). N = 27 profils.....	209
Tableau 5. 28 : Régressions linéaires concluantes pour le site spécifique #4 (A8). N = 46 profils.....	209
Tableau 5. 29 : Régressions linéaires concluantes pour le site spécifique #5 (A2). N = 22 profils.....	210
Tableau 5. 30 : Régressions linéaires concluantes pour le site spécifique #6 (A8). N = 36 profils.....	210
Tableau 5. 31 : Régressions linéaires concluantes pour le site spécifique #7 (A8). N = 43 profils.....	211
Tableau 5. 32 : Régressions linéaires concluantes pour le site spécifique #8(A2). N = 28 profils.....	211
Tableau 5. 33 : Régressions linéaires concluantes pour le site spécifique #9 (A3). N = 27 profils.....	212
Tableau 5. 34 : Régressions linéaires concluantes pour le site spécifique #10 (A2). N= 25 profils.....	212
Tableau 5. 35 : Comparaison des coefficients de détermination obtenus les 2176 profils.....	237

Tableau 5. 36 : Comparaison des coefficients de détermination obtenus pour les estrans de combinaison A2	238
Tableau 5. 37 : Comparaison des coefficients de détermination obtenus pour les estrans de combinaison A2 de la cellule hydrosédimentaire de l'Anse-aux-Coques.	238
Tableau 5. 38 : Comparaison des coefficients de détermination obtenus pour le site 6 (A2).....	239
Tableau 5. 36 : Contribution des variables (%) pour les trois premiers facteurs expliquant la variabilité des données pour le site 1	341
Tableau 6. 1 : Formulations pour le calcul de l'indice "R" testé avec les taux de déplacement annuels sur le site 1.	244

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Profil d'une côte meuble sableuse (d'après Open University, 1999 ; Davis et Fitzgerald, 2004 ; Boak et Turner, 2005 ; Bird, 2008)	5
Figure 1. 2 : Classification des plates-formes rocheuses selon Sunamura (1992).	9
Figure 1. 3 : Classification des types de côtes rocheuses selon Bird (2008).....	11
Figure 1. 4 : Exemple d'un estran rocheux de type « strandflat », situé au Spitsbergen, Svalbard (photo: S. Etienne, 2007, retrouvé dans Hansom <i>et al.</i> , 2014, p. 266).....	12
Figure 1. 5 : Estran rocheux de type "boulder-strewn", situé à l'Anse à la Croix, Québec (photo : C. Pinsonnault, 2013)	13
Figure 1. 6 : Modèle morphologique des trois types de morphologie de la zone subtidale de la plate-forme et la pente moyenne de leur profil (Kennedy, 2016, p. 157)	14
Figure 1. 7 : Catégories de pendage et orientation des plates-formes rocheuses (Trenhaile, 1987)	16
Figure 1. 8 : Corrélation positive entre le gradient de pente de la plate-forme rocheuse et l'amplitude des marées (Trenhaile, 1997).....	17
Figure 1. 9 : Types de plage en fonction de l'énergie des vagues, selon Komar (1998)	24
Figure 1. 10 : États d'une plage avec caractéristiques principales, classées selon l'amplitude des marées et leur capacité réfléchive ou dissipative (Masselink et Short, 1993).....	24
Figure 1. 11 : Types de plage définis par les vagues et la granulométrie présentée dans Reading (1996).....	26

Figure 1. 12 : Évolution d'une plage suite à la construction d'un muret ayant pour objectif de stabiliser une falaise ; érosion et abaissement progressif de la plage jusqu'à la disparition de l'estran (Bird, 2008).....	30
Figure 1. 13: Classification des marais maritimes selon leur emplacement sur la côte (Woodroffe, 2003).....	34
Figure 1. 14 : Illustration d'un marais maritime en climat tempéré (Paskoff, 2006). 1) Cuvette ou marelle. 2) Schorre. 3) Microfalaise. 4) Slikke. 5) Chenal de marée. 6) Haute slikke.....	36
Figure 2. 1 : Carte de localisation du site d'étude.....	51
Figure 2. 2 : Carte de localisation des sites spécifiques, situés sur des segments de côtes naturels entre Sainte-Flavie et Saint-Ulric.	53
Figure 2. 3 : Illustration d'un dallage de blocs et de placages sédimentaires. A) Dallage de blocs de taille décimétrique, Sainte-Luce-sur-Mer (crédit photo : C. Pinsonnault). B) Cordon de blocs de taille décimétrique à métrique, Sainte-Flavie (crédit photo : C. Pinsonnault). C) Imagerie aérienne présentant un exemple d'un dallage de bloc et d'un placage sédimentaire (imagerie : MERN, 2009).....	62
Figure 3. 1 : Limite utilisée pour mesurer l'évolution historique de la côte (modifié de Daigle <i>et al.</i> , 2006).	93
Figure 3. 2 : Illustration de la méthode de calcul de l'évolution historique de la ligne de rivage (Fond de carte : LiDAR 2009, fourni par le LDGIZC).	96
Figure 3. 3 : Explication des interprétations d'un graphique résultant d'une ACP.....	101
Figure 4. 1 : Exemple d'un estran de type 1 sous différents points de vue. A) Vue aérienne du phare de Mitis.....	113

Figure 4. 2 : Exemple d'un estran de type 2 sous différents points de vue. A) Vue aérienne (près de Tartigou). B) Vue hélicopté (près de Sainte-Flavie). C) Vue de profil (Les Méchins).	114
Figure 4. 3 : Exemple d'un estran de type 3 sous différents points de vue. A) Vue aérienne. B) Vue oblique C) Vue de profil (Grosses Roches).....	114
Figure 4. 4 : Exemple d'un estran de type 4 sous différents points de vue. A) Vue aérienne (Sainte-Luce).....	115
Figure 4. 5 : Exemple d'un estran de type 5 sous différents points de vue. A) Vue aérienne (secteur entre Saint-Ulric et Matane). B) Vue de profil (Les Méchins) C) Vue de profil 2 (Petit-Matane).	115
Figure 4. 6 : Exemple d'un estran de type 6(ici, herbier à zostère de Métis-sur-Mer) sous différents points de vue. A) Vue aérienne. B) Vue oblique C) Vue de profil.	116
Figure 4. 7 : Exemple d'un estran de type 7 sous différents points de vue. A) Vue aérienne (Sainte-Luce). B) Vue oblique (Rimouski-Est). C) Vue de profil (Grand-Métis).....	116
Figure 4. 8 : Exemple d'un estran de type 8 sous différents points de vue. A) Vue aérienne (Baie-des-Sables). B) Vue oblique (Sainte-Félicité). C) Vue de profil (Pointe-au-Père).....	117
Figure 4. 9 : Types de côte retrouvés sur le site d'étude.....	120
Figure 4. 10 : Types d'estran retrouvés sur le site d'étude	121
Figure 4. 11 : Nombre de profils appartenant à chaque combinaison recensée	123
Figure 4. 12 : Effectif de profils pour chaque point cardinaux de <i>Orient_{cote}</i> et <i>Orient_{pfr.}</i> ..	123
Figure 4. 13 : Effectif de profils pour chaque point cardinal de <i>Orient_{cote.}</i>	124
Figure 4. 14 : Exemple de profil d'estran représentant la morphologie moyenne du site 1.	140

Figure 4. 15 : Exemple de profil d'estran représentant la morphologie moyenne du site 7.	141
Figure 4. 16 : Exemple de profil d'estran représentant la morphologie moyenne du site 9.	141
Figure 4. 17 : Exemple de profil d'estran représentant la morphologie moyenne du site 2.	144
Figure 4. 18 : Exemple de profil d'estran représentant la morphologie moyenne du site 3.	144
Figure 4. 19 : Exemple de profil d'estran représentant la morphologie moyenne du site 4.	147
Figure 4. 20 : Exemple de profil d'estran représentant la morphologie moyenne du site 10.	148
Figure 4. 21 : Exemple de profil d'estran représentant la morphologie moyenne du site 5.	151
Figure 4. 22 : Exemple de profil d'estran représentant la morphologie moyenne du site 6.	153
Figure 4. 23 : Exemple de profil d'estran représentant la morphologie moyenne du site 8 là où le profil traverse des écueils rocheux.....	155
Figure 4. 24 : Exemple de profil d'estran représentant la morphologie moyenne du site 8 là où le profil correspond à une plate-forme rocheuse ayant une topographie plus régulière.....	155
Figure 5. 1 : Histogramme de fréquences pour les taux de déplacement annuel (EPR) et le déplacement total (NSM) de la côte, calculés sur l'ensemble du site d'étude (N = 2176 profils).	159
Figure 5. 2 : Histogramme de fréquence pour chacune des caractéristiques morphométriques calculées sur l'ensemble du site d'étude (N = 2176 profils).	160

Figure 5. 3 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la côte 1993-2009 en fonction de l'indice de rugosité "moyenne quadratique" pour la combinaison A1.	178
Figure 5. 4 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la côte 1993-2009 en fonction de l'indice de rugosité "écart-type" pour la combinaison A3.	178
Figure 5. 5 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la côte 1993-2009 en fonction de la pente pour la combinaison A2.	180
Figure 5. 6: Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 1993-2009 en fonction de la largeur émergée pour la combinaison A4.	181
Figure 5. 7 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 1993-2009 en fonction de l'indice de rugosité "moyenne quadratique" pour la combinaison A4.	185
Figure 5. 8 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 1993-2009 en fonction de l'indice de rugosité "écart-type" pour la cellule de l'Anse aux Coques.	193
Figure 5. 9 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 1993-2009 en fonction de l'orientation de la côte pour la cellule de Métis-sur-Mer.	194
Figure 5. 10 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 1993-2009 et la largeur totale de l'estran pour la cellule de Métis-sur-Mer. Deux groupes (« clusters ») distincts sont observables.	195
Figure 5. 11 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 1993-2009 en fonction de l'indice de rugosité "moyenne quadratique" pour la combinaison A2 de la cellule Anse-aux-Coques.	198
Figure 5. 12 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 1993-2009 en fonction de l'altitude de la ligne de rivage pour la combinaison A2 de la cellule Métis-sur-Mer	201
Figure 5. 13 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 1993-2009 en fonction de la pente moyenne de l'estran pour la combinaison A2 de la cellule Anse-aux-Coques.	202

Figure 5. 14: Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 1993-2009 en fonction de la largeur totale de l'estran pour la combinaison A3 de la cellule Anse-aux-Coques.	202
Figure 5.15: Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 2009-2012 en fonction de l'indice de rugosité « écart-type »de l'estran pour la combinaison A3 de la cellule Sainte-Flavie.....	203
Figure 5. 16 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 1993-2009 et la largeur totale de l'estran pour la combinaison A2 de la cellule de Métis-sur-Mer. Deux groupes (« clusters ») distincts sont observables.....	205
Figure 5. 17 : Relation entre la différence d'orientation côte – strate de la plate-forme en fonction de la largeur totale de l'estran le site spécifique #3.....	206
Figure 5. 18 : Relation entre le taux de déplacement annuel du trait de côte 1993-2009 en fonction de l'indice de rugosité « moyenne quadratique » de l'estran pour le site spécifique #1.....	214
Figure 5. 19 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 2009-2012 en fonction de la largeur du haut-estran pour le site spécifique #1.....	215
Figure 5. 20 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 2009-2012 en fonction de l'altitude de la ligne de flexure pour le site spécifique #3.....	215
Figure 5. 21 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 2009-2012 en fonction de la largeur du haut-estran pour le site spécifique #3.....	216
Figure 5. 22 : Illustration de la variable "degré d'anthropisation" avec la relation entre la pente moyenne de l'estran et le taux de déplacement 1993-2009 pour A1.....	219
Figure 5. 23 : Illustration de la variable "degré d'anthropisation" avec la relation entre la pente moyenne de l'estran et le taux de déplacement 2009-2012 pour A2.....	219
Figure 5. 24 : Illustration de la variable "géologie du substrat" avec la relation entre la largeur totale de l'estran et le taux de déplacement 1993-2009 pour A2.....	221

Figure 5. 25 : Illustration de la variable "géologie du substrat " avec la relation entre la pente moyenne de l'estran et le taux de déplacement 1993-2009 pour A3.....	221
Figure 5. 26 : Illustration de la variable "géologie du substrat " avec la relation entre la pente moyenne de l'estran et le taux de déplacement 1993-2009 pour A1.....	222
Figure 5. 27 : Illustration de la variable "orientation de la côte" avec la relation entre l'indice de rugosité « moyenne quadratique » et le taux de déplacement 1993-2009 pour A1.....	223
Figure 5. 28 : Illustration des classes de rugosité « moyenne quadratique » avec la relation entre la pente moyenne et le taux de déplacement 1993-2009 pour A2.....	225
Figure 5. 29 : Illustration des classes de rugosité « moyenne quadratique » avec la relation entre la largeur totale et le taux de déplacement 1993-2009 pour A2.....	225
Figure 5. 30 : Relation linéaire positive entre l'indice de rugosité en fonction de la pente moyenne sur l'ensemble des estrans étudiés.....	226
Figure 5. 31 : Relation de puissance négative entre l'indice de rugosité en fonction de la largeur émergée sur l'ensemble des estrans étudiés.	226
Figure 5. 32 : Comparaison de la relation entre le taux de déplacement 1993-2009 et la largeur émergée de l'estran pour l'ensemble des données de chaque échelle spatiale utilisée.....	228
Figure 5. 33 : Comparaison de la relation entre le taux de déplacement 1993-2009 et la largeur émergée de l'estran pour la combinaison A2 de chaque échelle spatiale utilisée.....	229
Figure 5. 34 : Comparaison de la relation entre le taux de déplacement 1993-2009 et l'indice de rugosité « écart-type » de l'estran de chaque échelle spatiale utilisée.	230
Figure 5. 35 : Comparaison des relations entre les taux de déplacement et l'indice de rugosité « moyenne quadratique » pour la combinaison A1 à l'échelle globale.	233
Figure 5. 36 : Comparaison des relations concernant l'indice de rugosité « moyenne quadratique » pour la combinaison A3 à l'échelle sectorielle.....	233

Figure 5. 37 : Comparaison des relations concernant l'indice de rugosité « moyenne quadratique » pour le site 1, caractérisé par une combinaison A3.	234
Figure 5. 38 : Comparaison des relations entre les taux de déplacement et la pente moyenne pour le site 3.....	235
Figure 5. 39 : Comparaison des relations entre les taux de déplacement et l'indice de rugosité « moyenne quadratique » pour la combinaison A2 à l'échelle globale.	236
Figure 6. 1 : Types de plate-forme rocheuse rencontrés entre Pointe-au-Père et Matane. Basé sur Sunamura (1992) et Ogawa (2013).....	253
Figure 6. 2 : Différence d'orientation entre les strates de la plate-forme rocheuse et la côte en valeur réelle : potentiel d'influence de l'orientation des strates sur la propagation d'énergie des vagues incidentes à la côte. Autres caractéristiques géomorphologiques à évaluer dans de futures recherches. a) La direction des vagues est perpendiculaire aux strates, ce qui peut favoriser leur réfraction. b) La direction des vagues est parallèle aux strates, ce qui peut réduire la dissipation d'énergie.	256
Figure 6. 3 : Synthèse des tendances générales observées pour les estrans de l'ensemble du site d'étude, pour la période 1993-2009. Profil d'estran basé sur les observations de terrain.....	265
Figure 6. 4 : Synthèse des tendances générales observées pour les estrans de l'ensemble du site d'étude, pour la période 2009-2012. Profil d'estran basé sur les observations de terrain.....	266

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

<i>HE</i>	Haut-estran
<i>BE</i>	Bas-estran
<i>D_d</i>	Densité de dallage de blocs sur l'estran (classes)
<i>D_p</i>	Densité de placage sédimentaire sur l'estran (classes)
<i>D_a</i>	Densité des algues en avant-côte et dans la zone inférieure du BE (classes)
<i>A_{pfr}</i>	Surface couverte par une plate-forme rocheuse (classes)
<i>H_{LR}</i>	Altitude de la ligne de rivage (m)
<i>H_{flex}</i>	Altitude de la ligne de flexure (m)
<i>L_{tot}</i>	Largeur totale de l'estran (m)
<i>L_{em}</i>	Largeur de la zone émergée de l'estran à marée basse (m)
<i>L_{HE}</i>	Largeur du haut-estran (m)
<i>L_{BE}</i>	Largeur du bas-estran (m)
<i>S_{moy}</i>	Pente moyenne de l'estran (mesurée sur toute sa longueur) (°)
<i>S_{HE}</i>	Pente du haut-estran (°)
<i>S_{BE}</i>	Pente du bas-estran (°)

R_{sin}	Indice de rugosité « sinuosité » (m)
R_{std}	Indice de rugosité « écart-type » (m)
R_{var}	Indice de rugosité « variance » (m)
R_{rms}	Indice de rugosité « moyenne quadratique » (m)
$Orient_{cote}$	Orientation de la côte (° ; points cardinaux)
$Orient_{pfr}$	Orientation des strates d'une plate-forme (° ; points cardinaux)
$Orient_{diff}$	Différence d'orientation entre les strates et la côte (° ; classes)
$EPR_{1963-2012}$	Taux de déplacement annuel durant la période 1963 à 2012 (m/an)
$NSM_{1963-2012}$	Déplacement total durant la période 1963 à 2012 (m)
$EPR_{1993-2009}$	Taux de déplacement annuel durant la période 1993 à 2009 (m/an)
$NSM_{1993-2009}$	Déplacement total durant la période 1993 à 2009 (m)
$EPR_{2009-2012}$	Taux de déplacement annuel durant la période 2009 à 2012 (m/an)
$NSM_{2009-2012}$	Déplacement total durant la période 2009 à 2012 (m)
LDGIZC	Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

INTRODUCTION

Dans le contexte de changements climatiques, les événements d'érosion et de submersion côtières risquent fortement de s'accroître dans l'Est du Québec, en partie à cause 1) du réchauffement hivernal qui entraîne une réduction de la couverture et de la saison du pied de glace, ainsi que 2) de l'augmentation de la force et de la fréquence des tempêtes (IPCC, 2013 ; Bernatchez *et al.*, 2012). Ces changements auront un impact important sur les communautés littorales (Bernatchez *et al.*, 2012 ; Senneville *et al.*, 2014). En effet, 43 % du littoral du Québec maritime serait potentiellement à risque de submersion, dont 66 % du littoral du Bas-Saint-Laurent (Drejza *et al.*, 2014), et plus de 50 % des côtes de la région maritime du Québec sont sensibles à l'érosion et la population y est essentiellement côtière (LDGIZC, 2009). Il est donc impératif de favoriser les études sur l'identification des facteurs clés influençant l'érosion côtière et de leur degré d'impact afin d'améliorer la gestion des risques dans ces régions.

Au Québec, le taux de recul des côtes meubles varie en moyenne entre 0,5 et 2,0 m/an, ce qui est important considérant le nombre de communautés situées le long du littoral (Bernatchez et Dubois, 2004). De nombreuses études ont d'ailleurs été menées dans différentes régions du Québec pour mieux comprendre les processus d'érosion à l'œuvre et les facteurs amplifiant leur impact sur les côtes, principalement aux Îles-de-la-Madeleine, sur la Côte-Nord et dans la Baie-des-Chaleurs, où les municipalités nécessitent rapidement un plan de gestion des risques côtiers en raison des forts taux de recul de la côte (Bernatchez et Dubois, 2008 ; Bernatchez et Fraser, 2012 ; Boucher-Brossard, 2012). Toutefois, très peu d'études ont été menées sur la dynamique des côtes de la rive sud du Saint-Laurent.

Outre la présente étude, des travaux récents du laboratoire de recherche de dynamique et gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) et de la chaire de recherche en géoscience côtière ont été menés sur les risques naturels côtiers dans ce secteur (Didier, 2014 ; Marie *et al.*, 2014 ; Arsenault, 2016 ; Didier *et al.*, 2016). La majeure partie des côtes de la rive sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent montrent historiquement de faibles taux de recul (Marie *et al.*, 2014). Cependant, dans le contexte des changements climatiques et compte tenu de la sensibilité des côtes basses meubles l'action des tempêtes, les prévisions pour 2060 montrent une augmentation des taux d'érosion pour ce type de côte, avec un recul maximal possible de 42 m dans les terrasses de plage (Marie *et al.*, 2014).

L'aléa d'érosion côtière est un sujet de plus en plus étudié, surtout dans le contexte des changements climatiques. Plusieurs ouvrages décrivent la relation étroite entre le profil de plage, sa granulométrie et l'énergie des vagues présentes (Bird, 2008; Reading, 1996). Par contre, il y a un manque au niveau des connaissances fondamentales sur les relations entre les éléments géomorphologiques de l'estran et les processus d'érosion présents et leur impact sur le rythme de recul de la côte. Quelques études ont été menées sur l'évolution des plates-formes rocheuses au pied des falaises rocheuses de la rive nord de la péninsule gaspésienne et dans l'est du Canada (Trenhaile, 1978 ; Trenhaile *et al.*, 2006 ; Trenhaile et Kanyaya, 2007). Toutefois, aucune étude connue ne s'est intéressée à la quantification et la comparaison de ces relations sur l'ensemble des combinaisons de type de côtes et d'estran que l'on retrouve sur les rives du Québec maritime.

Les principaux paramètres étudiés pour le zonage et la gestion des risques côtiers sont les caractéristiques naturelles du trait de côte, les infrastructures anthropiques présentes ainsi que le climat et les conditions météo-marines (Drejza, 2010). Par contre, les estrans sont rarement pris en compte dans l'évaluation des risques naturels côtiers. Les facteurs d'influence non identifiés restreignent la capacité et la précision des prédictions du rythme de recul des côtes ainsi que des impacts possibles qu'auront les changements

climatiques sur le système côtier. Il est donc essentiel de dresser un portrait détaillé des différents types d'estrans présents dans la région et de déterminer l'importance de leur rôle dans l'évolution de la côte.

L'objectif principal de ce projet consiste à déterminer les caractéristiques géomorphologiques et morphosédimentologiques de l'estran pouvant influencer l'évolution de la ligne de rivage des différents types de côte présents sur la rive sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent, plus précisément entre Rimouski (Pointe-au-Père) et Matane. Cela permettra de déterminer, selon le type de côte, quels sont les types d'estran et leurs principales caractéristiques géomorphologiques jouant un rôle sur les taux de déplacement de la côte afin de pouvoir en tenir compte dans la gestion des risques côtiers. Ce projet sera divisé en trois sous-objectifs.

1. Le premier sous-objectif consiste à établir une typologie d'estran pour la région à l'étude et à caractériser chaque type défini. Cette nouvelle typologie servira ensuite à la segmentation et à la caractérisation des estrans.
2. Le deuxième sous-objectif consiste à relever les traits caractéristiques de la côte (présence ou absence d'un cordon littoral, type de côte, orientation de la côte, exposée ou dans une baie) pour chacun des segments.
3. Le troisième sous-objectif consiste à identifier les relations existantes entre les caractéristiques géomorphologiques et le taux de déplacement pour les périodes de 1993-2009 et 2009-2012, ainsi que mesurer le sens et la force de ces relations.

Il y a là un potentiel d'amélioration de la méthode de calcul des limites des bandes de protection, à l'intérieur desquelles les nouvelles constructions sont interdites pour la sécurité des citoyens, puisque de nouveaux facteurs à considérer y seraient intégrés. L'élaboration d'un bon plan de gestion des risques intégrant le plus de facteurs clés est donc une nécessité d'une importance grandissante pour les communautés côtières.

Ce mémoire de recherche comprend six chapitres. D'abord, le chapitre 1 fait état des connaissances sur la géomorphologie des estrans et de leur potentiel d'influence sur l'aléa côtier. Le chapitre 2 assure la présentation du site d'étude et des échelles spatiales analysées. La méthodologie suivie pour atteindre les objectifs fixés ci-haut est présentée au chapitre 3. Les résultats de recherche sont divisés dans les chapitres 4 et 5. Le chapitre 4 présente la typologie développée ainsi que la caractérisation des estrans pour chaque échelle d'analyse, puis le chapitre 5 détaille les résultats d'analyses statistiques. Ensuite, le chapitre 6 consiste en une discussion sur l'interprétation des résultats d'analyses et le rôle des composantes géomorphologiques de l'estran sur l'aléa érosion. Finalement, la conclusion se trouve dans la dernière section du présent mémoire.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES ESTRANS ET LEUR POTENTIEL D'INFLUENCE SUR L'ALEA EROSION

1.1.LE SYSTEME COTIER

Le système côtier correspond à la « zone délimitée par la limite d'influence du milieu marin jusqu'à la limite d'influence des vagues sur le fond » (Dubois, 1973). De nombreuses composantes physiques, telles que l'hydrodynamique des vagues, la dynamique sédimentaire et la morphologie générale interagissent entre eux et influencent leur évolution dans ce système. Dans le cadre d'études géomorphologiques, la côte est divisée en fonction des différents niveaux marins puisque l'on s'intéresse surtout à l'hydrodynamique (vagues et marées) et à la géomorphologie de la côte (Figure 1.1).

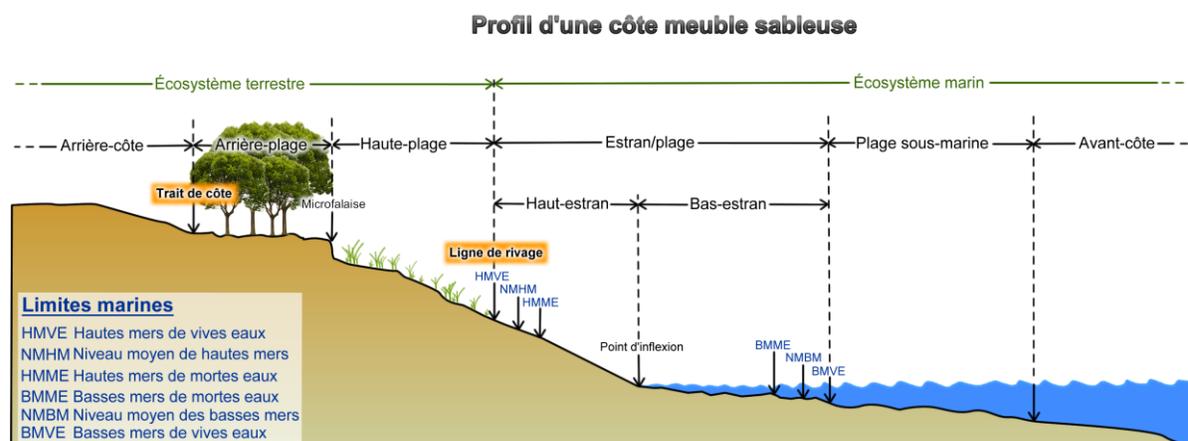


Figure 1.1 : Profil d'une côte meuble sableuse (d'après Open University, 1999 ; Davis et Fitzgerald, 2004 ; Boak et Turner, 2005 ; Bird, 2008)

Il est important de distinguer les termes « ligne de rivage » et « trait de côte ». La ligne de rivage, à proximité de la ligne des hautes mers de vives eaux entre l'estran et la haute-plage végétalisée, correspond à la limite entre les parties aquatique et terrestre de la

zone côtière. Elle correspond également à la limite de la végétation terrestre stable ou à la bordure d'une microfalaise d'érosion (Bernatchez *et al.*, 2008 ; Provencher et Dubois, 2010). Cette limite peut être franchie par les vagues en conditions de tempête. Quant au trait de côte, séparant l'arrière-plage de l'arrière-côte, il correspond à la limite de submersion lors d'événements de tempête extrême (Bernatchez *et al.*, 2008). Étant donné que le trait de côte est souvent difficile à localiser sur les rives du Saint-Laurent, entre autres à cause de l'occupation des terres riveraines, la ligne de rivage est davantage utilisée comme référentiel de la limite terrestre de la côte pour étudier l'évolution des côtes naturelles, hors falaises.

Dans ce mémoire, on entend par cordon littoral « la partie supérieure de l'estran composée de sédiments meubles » (Coque, 1993, p. 356). Il est aussi considéré comme le haut de plage pour Paskoff (2006) ou est décrit de manière plus générale comme une forme de relief correspondant à une accumulation de sédiments par les vagues (Hachette, 1979).

Dans le cadre de la présente étude, la zone d'intérêt correspond à l'estran, aussi appelé « zone intertidale ». Cette zone est délimitée par la limite des hautes mers et basses mers de vives eaux (Figure 1.1). La rive sud du Saint-Laurent est une région très intéressante du point de vue de la diversité des estrans. La largeur de la zone intertidale varie en moyenne d'une centaine à quelques centaines de mètres (Dionne, 2002). La rupture topographique séparant la zone du haut-estran de celle du bas-estran correspond à la ligne de flexure. Ce changement de pente est associé à un changement granulométrique ou à une différence de substrat, souvent de meuble (haut-estran) à rocheux (bas-estran) (Bird, 2008 ; Davidson-Arnott, 2010).

Aussi, les estrans peuvent comporter de nombreux éléments différents variant sur de courtes distances. Par exemple, il est possible de trouver une plage sableuse avec écueils rocheux suivi d'une plate-forme rocheuse et 50 m plus loin, il n'y aurait aucun écueil rocheux et quelques blocs glaciels déposés sur la plate-forme sous-jacente. Cette variation

peut être expliquée par l'hétérogénéité des caractéristiques géomorphologiques locales ainsi que par l'hydrodynamique marine (action des courants, des marées et des glaces) qui affectent localement la morphologie et l'évolution de la zone intertidale. En effet, la réponse des estrans face aux variations des conditions hydrodynamiques et climatiques est très différente dans le temps et l'espace. Étant donné l'hétérogénéité de la géomorphologie des estrans et de leur réponse aux processus, il est nécessaire de développer une typologie des estrans adaptée à la région à l'étude pour les catégoriser et les caractériser dans le but de faciliter l'analyse des relations entre les caractéristiques géomorphologiques des estrans et les taux de déplacement de la côte.

Afin de développer une typologie appropriée pour le terrain d'étude, une revue littéraire préliminaire axée sur les classifications existantes, les processus d'évolution des estrans et leur potentiel d'influence sur l'érosion côtière est nécessaire afin de cibler les caractéristiques géomorphologiques et morphosédimentologiques à analyser dans la présente étude. Dans la littérature, on retrouve trois grands groupes d'estran : 1) rocheux, 2) meubles non cohésifs, associés généralement aux plages et 3) meubles cohésifs, associés aux marais maritimes et aux battures argileuses.

1.2.LES GRANDS GROUPES D'ESTRAN

1.2.1. ESTRANS ROCHEUX

Les estrans rocheux correspondent à un affleurement rocheux, sous forme d'écueils ou de plates-formes rocheuses, constituant la majorité de la zone intertidale. Ils sont généralement associés aux côtes rocheuses.

Les côtes à falaises rocheuses forment trois quarts des côtes océaniques mondiales selon plusieurs chercheurs dans ce domaine (Trenhaile, 1987, p. 169 ; Bird, 2008, p. 67). Toutefois, cette statistique n'est pas unanime à cause des différences de nomenclature et de caractérisation des falaises (Naylor *et al.*, 2010). La vitesse de recul des falaises rocheuses, variant de 1 mm/an (moyenne des falaises de granite) à 1 m/an (moyenne des falaises de craie), est directement liée à la géologie et à la résistance de la roche qui les composent (Sunamura, 1992). Généralement, l'érosion des falaises n'est pas constante et se fait généralement par « à-coup » (Paskoff, 2006). Il se peut alors que la falaise reste inchangée pendant plusieurs années jusqu'à ce que des conditions météorologiques propices aux décrochements occasionnent un recul important.

Sur les côtes rocheuses, il existe plusieurs types d'estrans rocheux, mais ils ne sont pas nécessairement toujours présents. En effet, il y a des falaises rocheuses plongeantes, où il n'y a pas d'estran, et des côtes rocheuses sans falaises que l'on peut décrire comme une « côte de dénudation » ou « d'ennoiement », et où l'estran est peu développé (Bird, 2008). Le type d'estran rocheux le plus commun sur la rive sud du Saint-Laurent correspond aux estrans composés d'une plate-forme rocheuse. La plate-forme est une forme d'érosion qui résulte du recul de la falaise rocheuse et qui constitue le prolongement de la base de la falaise (Bird, 2008). Plusieurs facteurs, dont le relèvement isostatique, les transgressions marines quaternaires, la géologie du substrat, la morphologie de la côte et la présence de glace contribuent au développement hétérogène des côtes rocheuses d'une région à l'autre du globe (Trenhaile, 1987).

On peut également retrouver des formes d'accumulation sédimentaires sur les estrans rocheux (Trenhaile, 2016). Entre autres, des sédiments meubles peuvent s'accumuler dans les anfractuosités sur la zone du bas-estran, ou encore s'accumuler sur le haut-estran et former une « plage de poche » sur les côtes en fond de baie (Trenhaile, 2016). Il peut également s'agir d'une côte contraposée. Dans le cas de la rive sud de l'estuaire maritime

du Saint-Laurent, on retrouve ainsi des dépôts marins (hérités de la dernière transgression marine), formant une terrasse de plage (terrasse Mitis), reposant sur une plate-forme rocheuse relique ou une batture d'argile glacio-marine, dépendamment de la nature du substrat de la falaise morte (falaise Micmac), parfois recouverte par les sédiments (Dionne, 2002). Les composantes géomorphologiques de l'estran à l'étude seront détaillées davantage à la section 2.3.1.

1.2.1.1. CLASSIFICATIONS DES PLATES-FORMES ROCHEUSES

Plusieurs auteurs ont catégorisé les estrans rocheux de différentes manières selon les critères qu'ils considéraient importants pour leur recherche, mais deux se distinguent par leur simplicité. La première, aussi la plus citée dans la littérature, est celle de Sunamura (1992), qui divise les plates-formes rocheuses en deux catégories : le type A et le type B (Figure 1.2). Selon cette classification des plates-formes, le type « A », caractérisé par une plate-forme avec un gradient de pente relativement constant, est considéré comme étant dissipatif (Thornton et Stephenson, 2006 ; Marshall et Stephenson, 2011) puisque la diminution progressive de la profondeur d'eau augmente la dissipation par turbulence et la dissipation par friction (Komar, 1998).

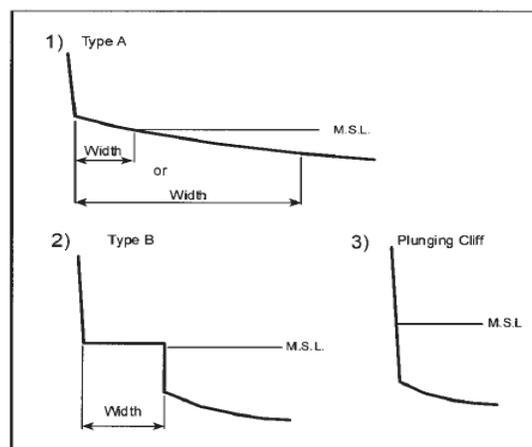


Figure 1. 2 : Classification des plates-formes rocheuses selon Sunamura (1992).

À l'opposé, le type « B », généralement caractérisé par une plate-forme se terminant par une rupture de pente abrupte, est à la fois dissipatif et réfléchissant selon le niveau de la marée (Thornton et Stephenson, 2006 ; Beetham et Kench, 2011 ; Marshall et Stephenson, 2011). Bien que ce type soit généralement considéré comme subhorizontal, c'est principalement la présence d'une rupture de pente abrupte, et non le gradient de pente, qui caractérise les plates-formes de type « B » (Ogawa, 2013). Le type B peut alors être divisé en deux sous-types : 1) type B à gradient de pente et 2) type B subhorizontal (Ogawa, 2013). On le retrouve généralement sur les côtes rocheuses plus résistantes et plus exposées à l'océan. Il est toutefois important de préciser que ces catégories s'appliquent uniquement dans un environnement micro ou mésotidal (Trenhaile, 1987).

La deuxième classification, présentée par Bird (2008), divise les estrans rocheux en quatre principales catégories : 1) les plates-formes à pente douce vers l'océan (Figure 1.3a), qui correspond au type A de Sunamura (1992) ; 2) les plates-formes subhorizontales de haute marée, qui possèdent une pente généralement inférieure à 1° et qui se terminent abruptement vers le large (Figure 1.3b). Elles correspondent au type B de Sunamura (1992) et se développent légèrement au-dessus du niveau moyen des hautes mers ; 3) les plates-formes subhorizontales de basse marée qui correspondent aussi au type B de Sunamura (1992), mais qui sont émergées seulement lorsque la marée est basse (Figure 1.3c) ; 4) les falaises plongeantes, ne comportant aucun estran (Figure 1.3d).

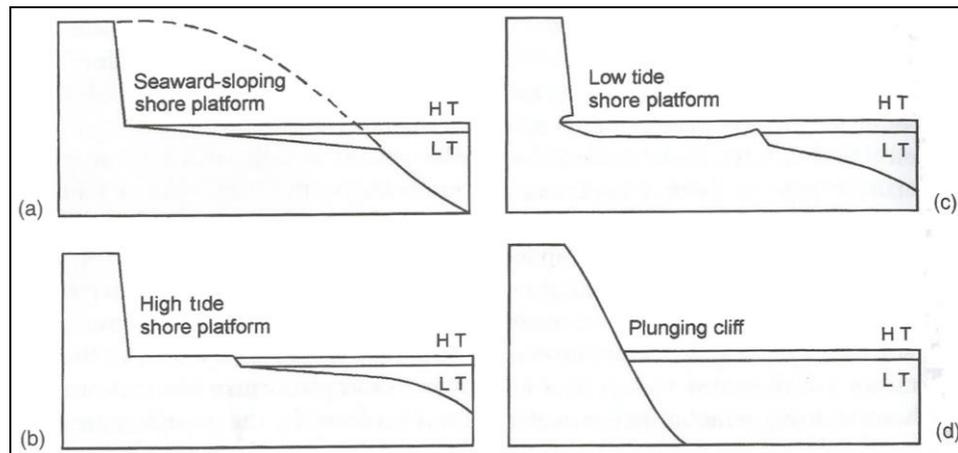


Figure 1. 3 : Classification des types de côtes rocheuses selon Bird (2008).

En plus de cette classification, Bird (2008, p. 129) ajoute trois autres types d'estran rocheux. Le premier est appelé « strandflat », correspondant à une large surface rocheuse pouvant s'étendre jusqu'à 50 km de largeur avec un relief relatif variant de ± 200 m (Hansom *et al.*, 2014). On les retrouve uniquement dans les régions froides, notamment en Norvège, en Islande et dans l'Est du Canada (Bird, 2008 ; Hansom *et al.*, 2014). Ce type d'estran rocheux, situé près du niveau moyen de la mer, peut avoir été formé par l'érosion subglaciaire du substrat rocheux lors des dernières glaciations, mais il est peu probable que tous les estrans de type « strandflat » partagent la même évolution historique commune (Figure 1.4 ; Hansom *et al.*, 2014, p. 265).



Figure 1. 4 : Exemple d'un estran rocheux de type « strandflat », situé au Spitsbergen, Svalbard (photo: S. Etienne, 2007, retrouvé dans Hansom *et al.*, 2014, p. 266)

L'autre type d'estran regroupe les « rocky » et « boulder-strewn shores », qui devrait plutôt être subdivisé en deux sous-types, soit i) les « rocky shores », ou côtes rocheuses irrégulières sans plate-forme, et ii) les « boulder-strewn shores », pouvant être traduit par « estrans rocheux jonchés de gros blocs » (Figure 1.5). Toutefois, ce dernier devrait plutôt être considéré comme un estran meuble puisqu'il est formé de blocs imbriqués et non de la roche mère.



Figure 1. 5 : Estran rocheux de type "boulder-strewn", situé à l'Anse à la Croix, Québec (photo : C. Pinsonnault, 2013)

1.2.1.2. MORPHOLOGIE SUBTIDALE D'UNE PLATE-FORME ROCHEUSE

Bien que la limite inférieure de l'estran corresponde au zéro marégraphique, les plates-formes rocheuses peuvent se prolonger au-delà de cette limite, soit en zone subtidale. Kennedy (2016) a pu définir un modèle de classification comportant trois types de morphologie de plate-forme dans la zone subtidale en se basant sur ses observations des plates-formes de divers sites en Nouvelle-Zélande : 1) une brusque rupture de pente s'apparentant à une falaise (Figure 1.6a), 2) une terrasse ou un récif caractérisé par une forte variation topographique (Figure 1.6b) et 3) une rampe, caractérisée par une large plate-forme avec une pente douce (Figure 1.6c). Cela étant dit, très peu d'études à ce jour ont étudié cette composante de l'avant-côte (Kennedy, 2016).

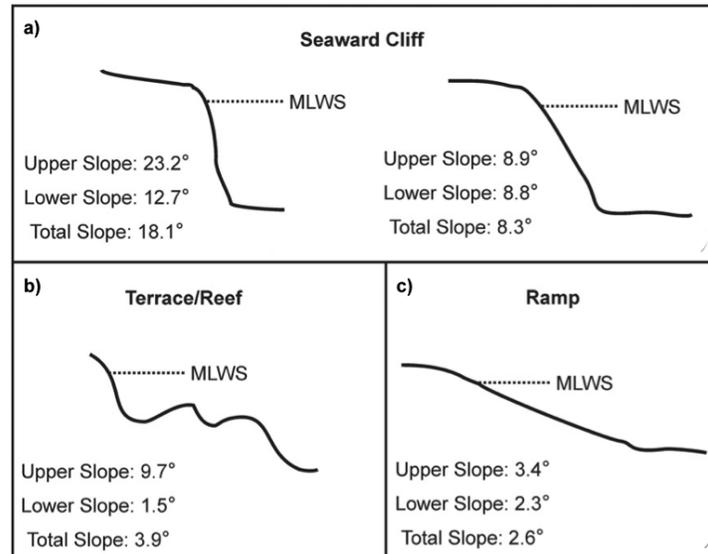


Figure 1. 6 : Modèle morphologique des trois types de morphologie de la zone subtidale de la plate-forme et la pente moyenne de leur profil (Kennedy, 2016, p. 157)

Au meilleur de notre connaissance, il n'existe aucune classification, ni relevé topographique précis des plates-formes en avant-côte de la rive sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Considérant l'importance de cette composante, il serait pertinent d'explorer cette piste dans de futures recherches.

1.2.1.3. FACTEURS ET PROCESSUS INFLUENÇANT L'ÉVOLUTION D'UNE PLATE-FORME

L'érosion des plates-formes rocheuses se produit à des rythmes très différents d'une région à l'autre. Le recul horizontal (« backwearing ») de la plate-forme et de la falaise côtière peut varier entre 0 et 70 m/an dans des cas exceptionnels, alors que l'abaissement de la plate-forme (« downwearing ») varie entre 0,1 et 35 mm/an (Trenhaile, 1997, p. 280 ; Sunnamura, 1992). Les facteurs et les processus jouant un rôle clé dans l'évolution des

plates-formes rocheuses sont regroupés en quatre grandes catégories : 1) géologiques, 2) hydrodynamiques, 3) liés à la météorisation et 4) biologiques.

La réaction des plates-formes rocheuses face aux processus contribuant à leur érosion (abaissement et recul horizontal) est dictée en grande partie par la morphologie et la géologie des plates-formes rocheuses elles-mêmes (Dasgupta, 2010). De plus, le marnage et le niveau marin sont également d'importants facteurs jouant un rôle sur le gradient de pente de la plate-forme (Trenhaile, 1999).

GEOLOGIQUES

La lithologie est l'un des facteurs les plus influents sur l'évolution morphologique de l'estran rocheux (Trenhaile, 1987 ; Dasgupta, 2010). Selon la nature de la roche, elle sera plus ou moins résistante aux processus d'abrasion et de météorisation. La dureté de la roche influence également la bioérosion. Aussi, les recherches de Kennedy *et al.* (2011) ont montré que la résistance du substrat et la profondeur d'eau ont un rôle important à jouer dans leur développement.

Ce facteur influence également l'élévation de la plate-forme, qui est l'une des composantes morphologiques les plus importantes de la plate-forme (Sunamura, 1992 ; Thornton et Stephenson, 2006). L'élévation est très sensible aux différences géologiques, surtout sur les côtes microtidales. L'étude de Thornton et Stephenson (2006) a montré, avec des tests produits sur le terrain, que l'altitude d'une plate-forme était plus élevée là où la résistance du roc était plus grande.

La structure géologique de la roche mère est essentielle à connaître pour mieux comprendre l'évolution de la plate-forme. Trenhaile (1987) a d'ailleurs présenté une classification de huit combinaisons possibles de pendage et d'orientation des plates-formes avec caractéristiques spécifiques et les taux d'érosion relatifs (Figure 1. 7). Les flèches présentent les limites des catégories à partir desquelles une plate-forme est classée.

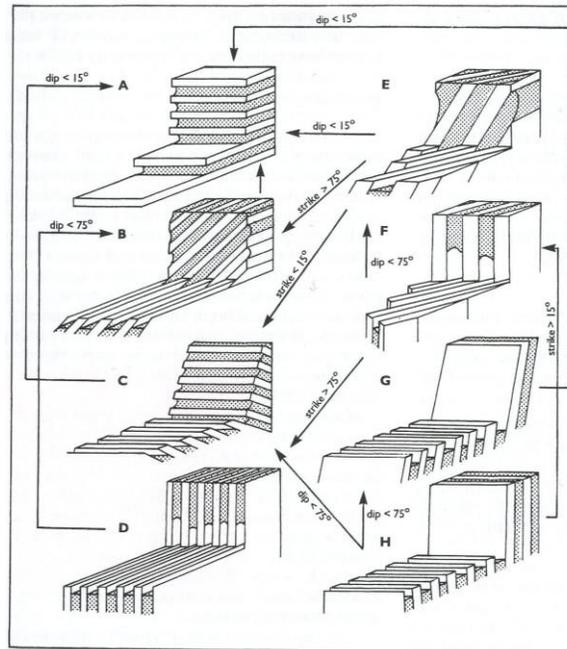


Figure 1. 7 : Catégories de pendage et orientation des plates-formes rocheuses (Trenhaile, 1987)

Sa structure joue un rôle à la fois sur l'action des vagues et sur les processus glaciels et de météorisation. D'abord, le pendage des strates permet entre autres de déterminer le degré de protection fourni aux strates les moins résistantes lorsqu'il y a une alternance de séquences sédimentaires puisque les strates composées de roches plus dures vont protéger les plus tendres du choc des vagues (Trenhaile, 1997). Ces différentes combinaisons affectent donc la manière dont la plate-forme va évoluer et, conséquemment, la rugosité de la surface et l'angle de faiblesse du roc (Trenhaile, 1997). Ensuite, cette rugosité influence à son tour le degré de résistance de la roche à la contrainte de cisaillement ainsi que l'impact des processus de météorisation (Poropat, 2009). La rugosité de la surface rocheuse est aussi intéressante à mesurer puisqu'elle peut indiquer dans certains cas le degré de météorisation du roc, ce qui peut fournir des informations sur les processus et les taux de météorisation de divers environnements (McCarroll et Nesje, 1996).

HYDRODYNAMIQUES

La marée et le niveau marin moyen sont des facteurs très importants dans la formation des plates-formes. En effet, Trenhaile (1999) présente une corrélation positive entre le gradient de pente de la plate-forme et l'amplitude des marées de vives eaux, pour les côtes de l'Atlantique Nord et certaines du Pacifique (Figure 1.8).

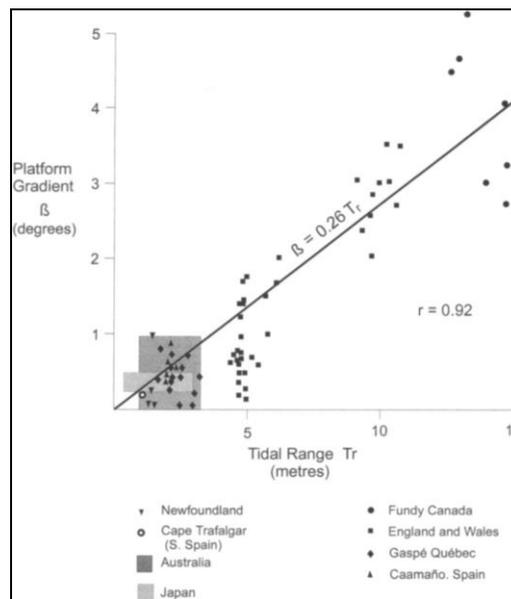


Figure 1. 8 : Corrélation positive entre le gradient de pente de la plate-forme rocheuse et l'amplitude des marées (Trenhaile, 1997)

D'un côté, les marées et le niveau marin déterminent le temps d'exposition de la plate-forme aux processus de météorisation et de bioérosion. De l'autre côté, l'amplitude des marées affecte la vitesse du flot et du jusant. Aussi, les marées contrôlent la hauteur d'eau sur la plate-forme, ce qui affecte le type de vagues et leur vitesse en atteignant la ligne de rivage (Sunamura, 1992). Toutefois, très peu d'études ont été menées sur cette question.

Les vagues affectent les plates-formes de plusieurs manières. Premièrement, il y a la force d'impact des vagues cassantes et la vitesse des vagues déferlantes (Open University, 1999). L'érosion se produit lorsque l'impact des vagues est plus fort que la résistance du roc qui constitue la plate-forme (Trenhaile 1987 ; Sunamura, 1992). Selon Sunamura (1992), les plates-formes rocheuses se développent plus rapidement sous l'effet des coups de boutoir des vagues plutôt que sous l'effet du déferlement des vagues sur le substrat rocheux. De plus, la force des vagues déferlant sur la plate-forme peut arracher les organismes (p. ex. des algues et des balanes) fixés sur le roc, ce qui peut déloger du même coup des portions de roc. D'ailleurs, ce processus d'érosion est influencé par la structure et la lithologie de la roche.

Deuxièmement, le martèlement de l'eau contre la falaise et la plate-forme participe également à l'érosion. Cette pression hydraulique, engendrée par la compression de la nappe d'eau, mais également de l'air emprisonné contre la paroi, peut fragmenter la roche et déloger des blocs lorsque l'eau pénètre dans les fissures de la roche (Trenhaile et Kanyaya, 2007).

Troisièmement, il y a l'action abrasive des vagues qui accentue les capacités d'érosion de la plate-forme et du pied de la falaise lorsqu'elles transportent des débris et des galets (Zenkovich, 1967 ; Bird, 2008). L'efficacité du processus d'abrasion dépend principalement de l'énergie des vagues et de la taille des débris (Reading, 1996). Ces débris proviennent généralement de 1) la falaise rocheuse surplombant la plate-forme, ou bien ont été déplacés par la dérive littorale, et de 2) la plate-forme elle-même. D'ailleurs, l'abrasion est favorisée lorsque la pente des strates tend vers la côte ou lorsque la plate-forme s'érode de manière différentielle puisque les galets et les cailloux sont alors emprisonnés dans les cavités (Bird, 2008).

Les processus glaciels, liés à la glace de mer, se produisent uniquement sur les côtes situées près des hautes latitudes comme en Antarctique, au Québec, au Groenland et à

d'autres endroits autour de l'océan Arctique (Trenhaile, 1987 ; Woodroffe, 2003 ; Bird, 2008). Dans le cadre de la présente recherche, nous nous intéressons principalement au pied de glace, contribuant à la fois à l'érosion, au transport de sédiments et à la sédimentation sur l'estran (Dionne, 1973 ; Drapeau, 1992 ; Forbes et Taylor, 1994), en plus de constituer « une défense naturelle contre l'action des vagues, des courants, de la marée et des processus physico-chimiques et biologiques », protégeant ainsi la côte de nombreux processus d'érosion en période hivernale (Dionne, 1973, p. 247).

Le pied de glace est une forme glacielle, soudée au rivage par le côté intérieur et/ou par le fond, résultant généralement de l'accumulation de frasil et « galettes » de glace s'échouant sur le haut-estran, gelant et grossissant progressivement durant les premières périodes importantes de gels hivernaux (Dionne, 1973). Il peut être divisé en deux parties : 1) le pied de glace du haut-estran, qui est étroit et soudé au substrat sous-jacent, et 2) celui du bas-estran, couvrant une plus grande étendue qui n'est généralement pas soudée au fond (sauf dans le cas des marais maritimes) et qui est soumis au battement des marées (Dionne, 1973). Les variations morphologique et structurelle ainsi que la vitesse de formation dépendent de la topographie côtière et des conditions météo-marines (Forbes et Taylor, 1994). Le pied de glace influence significativement la dynamique sédimentaire via trois processus : érosion, transport et dépôt. En effet, en gelant, le pied de glace demeure fixé au sol à cause du gel, offrant ainsi une protection contre l'action des vagues et la gélifraction pour la plate-forme sous-jacente, mais favorisant du même coup la gélifraction à sa périphérie et de l'érosion à cause de la réflectivité (Woodroffe, 2003 ; Paskoff, 2006).

Lorsque le pied de glace se détache au printemps, des radeaux de glace peuvent déloger et emporter avec eux, sur de longues distances, des blocs provenant de la plate-forme ainsi que des blocs erratiques et/ou glaciels dont la taille varie en moyenne entre 1,5 et 2 m de diamètre (Drapeau, 1992, p. 235). Cela peut éroder la plate-forme et former des bourrelets et des placages de blocs (Trenhaile, 1997). Dans la région de Rimouski, les

dallages de blocs sont très bien développés sur une largeur de 50 à 100 m, généralement en bas d'estran, et sur une distance pouvant atteindre 2 km (Drapeau, 1992, p. 235). Contrairement aux mégablocs erratiques, la taille de ces blocs formant le placage varie en moyenne autour de 40 cm de long par 50 cm de large sur la rive sud de l'estuaire du Saint-Laurent (Dionne, 1962). Cette forme d'accumulation de blocs résulte de leur transport dans la glace poussée par le vent jusqu'à la rive (Dionne, 2004 ; 2009). En contrepartie, le pied de glace empêche les blocs de se rendre sur le haut estran.

PROCESSUS DE METEORISATION

Les processus de météorisation physique dominants comprennent la cryoclastie, l'haloclastie et l'alternance de dessiccation-humectation (Trenhaile, 1987).

Dans les environnements froids, comme au Québec, les processus liés au gel, en particulier la cryoclastie, ont beaucoup d'impact sur la morphologie de la côte (Forbes et Taylor, 1994, Hansom *et al.*, 2014). L'expansion des cristaux de glace agrandit les fissures dans le roc, ce qui le fragilise. La cryoclastie affecte davantage le roc lorsque celui-ci est faillé et/ou poreux et/ou friable, comme le schiste constituant la plupart des plates-formes retrouvées sur le site d'étude, puisqu'il favorise alors l'infiltration d'eau (Trenhaile, 1987).

L'haloclastie est un processus dominant dans les régions tempérées chaudes et tropicales (Trenhaile, 1997). Le principal impact est causé par la croissance de cristaux de sel dans les fissures et les pores de la roche, ce qui l'altère physiquement (Trenhaile 1997). Le site à l'étude se trouvant en région tempérée froide, son influence est moindre, mais il peut participer à la genèse de microformes d'alvéolisation en haut d'estran (Dionne, 1967).

L'alternance dessiccation-humectation sur la plate-forme est directement liée au cycle et à l'amplitude des marées. Ce processus est le plus efficace dans un environnement macrotidal et diminue avec l'élévation de la plate-forme (Kanyaya et Trenhaile, 2005). Il est souvent accompagné du processus d'haloclastie (Bird, 2008). Selon certains auteurs, sa

participation à l'abaissement des plates-formes rocheuses serait importante (Stephenson et Kirk, 2000b), pour d'autres négligeable (Trenhaile, 2002).

Parmi les processus de météorisation chimique pouvant affecter la roche de la plate-forme, on retrouve l'hydrolyse, l'oxydation, la chélation et la dissolution (Trenhaile, 1987 ; Reading, 1996 ; Bird, 2008). Le facteur principal qui affecte l'efficacité des réactions chimiques est la quantité d'eau disponible pour les réactions ainsi que pour le retrait des matières solubles (Trenhaile, 1987). La plupart des réactions sont aussi accélérées lors de températures élevées. Bien que peu importants dans les régions froides comme au Québec, ces processus chimiques contribuent tout de même à l'évolution de la microtopographie des plates-formes, ce qui peut affecter l'environnement des organismes qui y vivent.

BIOLOGIQUES

De nombreux organismes (tels que des algues vertes et brunes, des balanes et autres crustacés, mollusques) colonisent les zones habitables des estrans selon leur niche écologique respective (Chabot et Rossignol, 2003). Dans les régions froides, il est plus difficile pour les organismes de se développer en raison de la glace hivernale et de la baisse de salinité lors de la fonte printanière (Nonn, 1974). Toutefois, plusieurs études ont observé la présence d'une densité substantielle de laminaires en bas d'estran et dans la zone subtidale de plusieurs régions côtières subpolaires (Hansom *et al.*, 2014). D'une part, ces algues protègent la plate-forme contre l'érosion par les vagues (Trenhaile 1987). D'autre part, lorsqu'elles sont arrachées du substrat lors de fortes vagues ou lors du démantèlement du pied de glace, elles arrachent du même coup des portions du substrat rocheux, contribuant ainsi à leur érosion (Hansom *et al.*, 2014). D'après Hansom *et al.* (2014), ce processus, appelé le « kelp-plucking », se produirait partout où il y a une quantité élevée de laminaires. Certains estrans de l'estuaire maritime du Saint-Laurent seraient donc prédisposés à ce processus d'érosion. Toutefois, aucune étude connue n'a évalué l'importance de ce processus dans cette région.

INFLUENCE MULTIFACTORIELLE SUR L'ÉTENDUE DE LA PLATE-FORME

La largeur des plates-formes est très variable d'une région à l'autre en raison des différences géologiques, de l'apport en sédiments, des variations du niveau marin et des conditions météo-océaniques (Sunamura, 1992). Selon Sunamura (1992), la largeur des plates-formes est déterminée par le taux de retrait de la base de la falaise et de la limite marine des plates-formes. Cette caractéristique morphologique est donc influencée par l'exposition à l'action des vagues, la résistance de la roche et la durée pendant laquelle les processus ont affecté la plate-forme au même niveau marin (Trenhaile, 1987). Dans l'estuaire du Saint-Laurent, les plates-formes rocheuses sont polygéniques et anciennes (section 2.3.1).

1.2.2. ESTRANS MEUBLES NON COHÉSIFS

Les estrans meubles non cohésifs englobent les plages de granulométrie allant de sableux (entre 63 μm pour les sables très fins et 2 mm pour les sables grossiers) jusqu'à caillouteux (75 mm à 250 mm). Il existe néanmoins des plages à sédiments très grossiers tels que les grèves de galets ou de blocs.

Par définition, une plage est une zone d'accumulation de sédiments non consolidés. Il s'en forme lorsque la quantité de sédiments disponibles est supérieure au volume que les courants littoraux peuvent prendre en charge (Paskoff, 2006). Ce type de système côtier a été très étudié au fil des dernières décennies en raison du risque important d'érosion de la côte en plus des changements rapides qui peuvent survenir lors de variations d'énergie des vagues ou lors de fortes tempêtes (Open University, 1999 ; Woodroffe, 2003 ; Bird, 2008). D'ailleurs, l'estran sableux est la zone la plus changeante sur les côtes meubles puisque leur morphologie évolue continuellement (Nonn, 1974 ; Short, 1999).

1.2.2.1. CLASSIFICATION DES PLAGES

Les plages sont modelées par l'action combinée des vagues, des marées, de l'action du jet de rive et de la nappe de retrait, ce qui entraîne la dérive littorale (Bird, 2008). Leur morphologie, très dynamique, dépend de l'énergie des vagues, de l'amplitude des marées, de l'intensité et de la direction des vents, des caractéristiques sédimentaires, en plus de l'historique de la plage (Trenhaile, 1997). Leur granulométrie moyenne est contrôlée par trois facteurs dominants : la/les source(s) des sédiments, la vitesse des vagues et la pente générale de l'avant plage (Komar, 1998).

La classification des plages est plus souvent basée sur la morphologie et/ou la granulométrie de la plage adaptée en fonction du type de vagues et des courants littoraux. Plusieurs classifications des plages existent. Généralement, diverses composantes physiques de la plage (ex. : granulométrie, pente) et environnementales (ex. : amplitude des marées, courants, source d'énergie des vagues) sont utilisées comme critères de classification (Short, 1999). Une des classifications les plus simples est celle Komar (1998) basée sur la morphologie de la plage et de l'hydrodynamique des vagues et des courants présents. Elle regroupe les plages en trois classes : plage dissipative, plage intermédiaire et plage réfléchive (Figure 1.9 ; Trenhaile, 1997 ; Komar, 1998 ; Short, 1999). Cette classification montre les différents stades possibles d'une plage selon le type de vagues et de courants présents, sa granulométrie, sa pente ainsi que son relief (Reading, 1996 ; Trenhaile, 1997).

Il est possible d'identifier plus de trois stades de transition entre les plages dissipatives et les plages réfléchives si on veut décrire l'évolution des plages plus en détail. La classification des plages selon la morphologie et l'hydrodynamique de Masselink et Short (1993) représente bien les différents états d'une plage dans le temps (Figure 1.10).

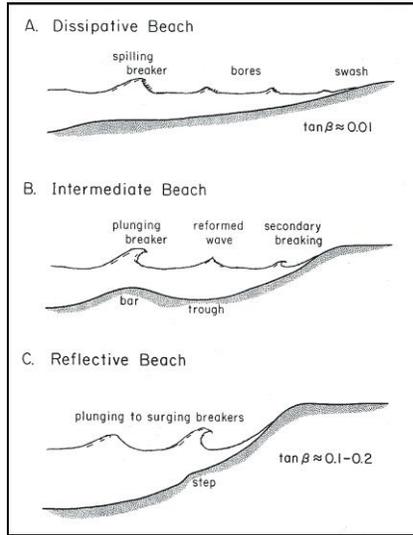


Figure 1. 9 : Types de plage en fonction de l'énergie des vagues, selon Komar (1998)

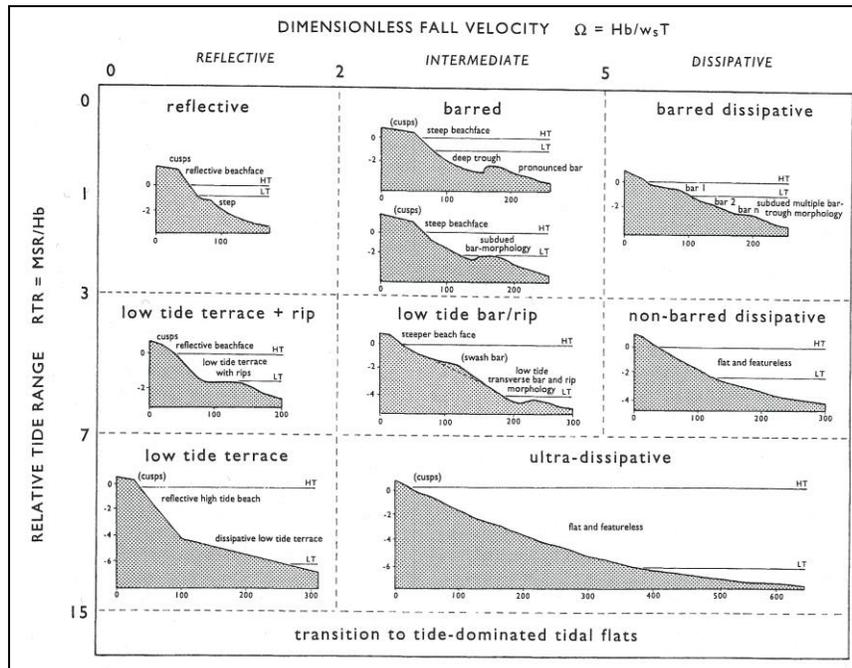


Figure 1. 10 : États d'une plage avec caractéristiques principales, classées selon l'amplitude des marées et leur capacité réfléchive ou dissipative (Masselink et Short, 1993)

Le profil de la plage évolue vers un état dissipatif ou réfléchissant en fonction des changements de régime hydraulique, du niveau de la marée et des déplacements des structures sédimentaires sur le bas et l'avant-plage (Figure 1. 10). De plus, les changements morphologiques varient selon l'amplitude des marées de la région. L'effet du marnage sur la morphologie de la plage est le plus significatif sur les plages réfléchissantes à intermédiaires (Trenhaile, 1997).

Enfin, la classification présentée dans Reading (1996) vient compléter celle de Masselink et Short (1993) en intégrant aussi la granulométrie du substrat. Elle regroupe les plages en quatre classes : 1) mélange de sable et silt ; 2) sable ; 3) mélange de sable et gravier ; 4) gravier (Figure 1. 11). Puisque la granulométrie est très hétérogène le long du littoral de l'estuaire du Saint-Laurent, il est important que ce facteur soit intégré dans la typologie des estrans.

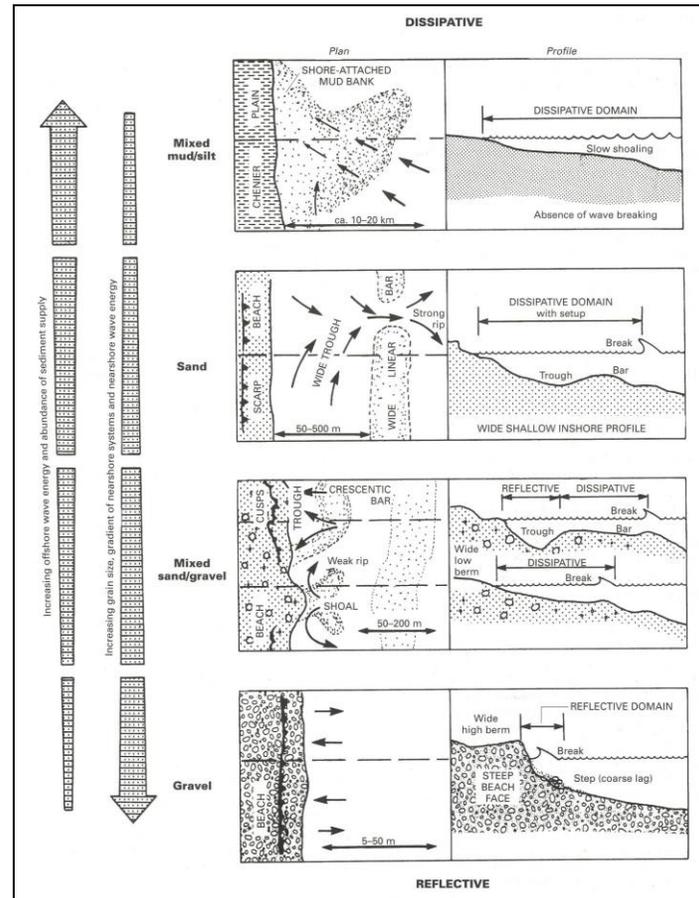


Figure 1. 11 : Types de plage définis par les vagues et la granulométrie présentée dans Reading (1996).

1.2.2.2. FACTEURS ET PROCESSUS INFLUENÇANT L'ÉVOLUTION DES PLAGES

PRINCIPAUX PROCESSUS

La résilience des plages réside dans leur capacité à s'adapter à des changements de régimes hydrauliques pour retrouver un certain équilibre entre les processus présents et le profil de plage (Woodroffe, 2003). Une plage est en équilibre dynamique lorsque son

gradient de pente est suffisamment abrupt pour que les effets du jet de rive annulent ceux de la nappe de retrait (Trenhaile, 1997 ; Paskoff, 2006). À ce moment, il y a la même quantité de sédiments apportés sur la plage et emportés vers la mer. Au fil du temps et au travers des processus physiques qu'elle subit, la plage tendra toujours à retourner à cet état d'équilibre dynamique. Les principaux processus de dynamique morphosédimentaire influençant l'érosion, le transport et le dépôt de sédiments sur la côte meuble, sont identifiés selon l'échelle spatiale et l'échelle temporelle au tableau 1.1.

Tableau 1. 1 : Processus de dynamique morphosédimentaire présent dans la région à l'étude

Échelle	Locale à régionale	Régionale à globale
Court-terme (quotidien à annuel)	Action des vagues	Cycle des marées
	Courants marins le long du littoral	Cycle des marées de vives eaux et de mortes eaux
	Glaciels	Variation saisonnière du climat (été calme et tempêtes hivernales)
Moyen-terme (annuel à centenaire)	Action des vagues Événements de tempête	Variations annuelles du climat (ex. : cycle El Niño / El Niña)
Long-terme (centenaire à millénaire)	N/A	Variation du niveau marin Accélération de la variation du niveau marin Changement dans la circulation atmosphérique Changements climatiques

Source : Dionne, 1973 ; Nonn, 1974 ; Reading, 1996 ; Komar, 1998 ; Short, 1999 ; Bernatchez et Dubois, 2004 ; Paskoff, 2006 ; Bird, 2008 ; Walkden et Dickson, 2008.

Puisque la présente étude porte sur un segment de 83,8 km de côte d'un secteur de l'estuaire maritime du Saint-Laurent pour une période allant de court à moyen terme, les principaux processus considérés pour cette étude sont l'action des vagues, les courants marins, l'action des glaces. Aussi, l'événement de tempête de 2010, décrit à la section 2.4.3 du chapitre 2, est un élément non négligeable à considérer sur ce secteur d'étude.

FACTEURS INFLUENÇANT LES PROCESSUS HYDRODYNAMIQUES

Le tableau 1.2 résume les principaux facteurs internes et externes aux plages influençant les processus hydrodynamiques qui favorisent l'érosion des plages.

Tableau 1. 2 : Principaux facteurs favorisant l'érosion des estrans sableux

LIES AUX CONDITIONS METEO-MARINES	LIES A L'ENVIRONNEMENT COTIER	LIES AUX INTERVENTIONS ANTHROPIQUES
Augmentation de l'intensité et de la fréquence des tempêtes	Abrasion par le bois de grève	Augmentation de l'affouillement par la réflexion des vagues sur les murets de protection
Augmentation de l'énergie des vagues	Altération physique et chimique du matériel de plage	Extraction de sable et gravier sur les plages
Changement dans l'angle d'incidence des vagues	Augmentation des pertes de sédiments vers le large par l'action des vagues et du ruissellement	Interception des sédiments par les brise-lames.
Hausse du niveau marin	Hausse de la nappe phréatique	
Intensification de l'obliquité de l'attaque des vagues incidentes	Interception des sédiments par la dérive littorale	
Faible amplitude des marées	Migration des lobes de plage	
Retrait du pied de glace	Présence d'une falaise rocheuse	
Submersion et augmentation de l'attaque des vagues	Réduction de l'apport sédimentaire par les cours d'eau et par les courants marins	
	Réduction de l'apport sédimentaire des falaises et des dunes	
	Réduction de l'apport biosédimentaire	

Source : Hénaff et Bodéré, 2001 ; Bernatchez et Dubois, 2004 ; Bird, 2008

Sur les rives de l'estuaire du Saint-Laurent, les principaux facteurs d'érosion des plages liés aux conditions météo-marines sont : l'amplitude des marées, la force et la direction des vagues, les formes glacielles (principalement le pied de glace) ainsi que les infrastructures anthropiques (Drapeau, 1992 ; Bernatchez et Dubois, 2004). Les facteurs

liés à la côte concernent en majorité une modification du volume de sédiments sur l'estran. L'érosion de la plage est favorisée lorsqu'il y a un déficit sédimentaire, pouvant être causé par une réduction de l'apport en sédiments ou bien par une augmentation des pertes de sédiments vers le large (Tableau 1.2). De plus, les processus hydrodynamiques vont agir différemment sur la plage en fonction de la granulométrie des sédiments qui la composent ; la plage est plus abrupte et favorise la réflexion des vagues lorsque les sédiments sont plus grossiers (Reading, 1996).

Concernant le pied de glace, en plus des processus de protection, de transport et d'érosion décrits à la section 1.2.1.3, s'ajoute l'érosion des sédiments à la limite externe du pied de glace. En effet, il agit comme une surface rigide qui réfléchit l'énergie des vagues, ce qui occasionne un affouillement des sédiments à la base de la paroi externe du pied de glace (Bernatchez et Dubois, 2004). Aussi, lors du démantèlement du pied de glace, les sédiments encore gelés sous le pied de glace sont déplacés le long de la côte ou vers le large selon le déplacement des radeaux de glaces (Dionne, 1973 ; Forbes et Hansom, 2012, cité dans Hansom *et al.*, 2014).

Un autre facteur lié à la côte, et qui est présent sur plusieurs estrans sableux au Québec, est l'affleurement partiel d'une plate-forme rocheuse ou la présence d'écueils rocheux sur le haut et/ou le bas estran sableux. La présence de ces écueils influencerait la dynamique sédimentaire localement, mais très peu d'études ont été menées sur le sujet.

Enfin, les infrastructures anthropiques comme les brise-lames, les épis, les enrochements et les murets, initialement construits pour empêcher l'érosion de la côte, ont en fait des impacts négatifs importants sur la dynamique sédimentaire. En effet, un des principaux effets observés est ce qu'on appelle « l'effet de bout ». Il s'agit d'un phénomène par lequel la structure rigide favorise l'érosion de la côte à ses extrémités (Baillargeon et Crousset, 2006 ; Bernatchez et Fraser, 2012). L'autre effet principal est l'abaissement de la plage dû à la présence de structures de protection rigides sur la ligne de rivage (Figure

1.12). Ces structures sont beaucoup plus réfléchives que les côtes sableuses naturelles. Par conséquent, il y a une nette augmentation de l'affouillement à la base de ces structures causant la perte de sédiments vers la mer (Bird, 2008 ; Bernatchez et Fraser, 2012).

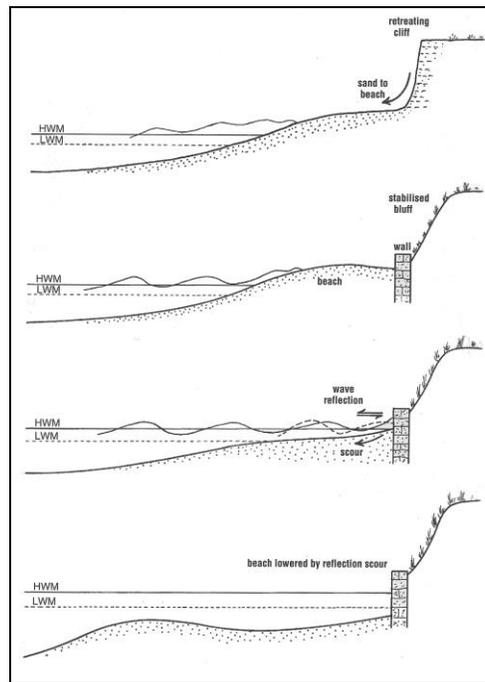


Figure 1. 12 : Évolution d'une plage suite à la construction d'un muret ayant pour objectif de stabiliser une falaise ; érosion et abaissement progressif de la plage jusqu'à la disparition de l'estran (Bird, 2008).

ROLE DES TEMPÊTES SUR L'ÉVOLUTION DE LA PLAGE

Les impacts des facteurs favorisant l'érosion, présentés au tableau 1.2, sont accentués lors des événements de tempêtes durant lesquelles les vents forts et les hauts niveaux d'eau augmentent la hauteur et la force des vagues. D'ailleurs, les tempêtes jouent un rôle majeur dans l'érosion des côtes du Saint-Laurent et entraînent des dommages importants (Bernatchez et Dubois, 2004, Forbes *et al.*, 2004). Plusieurs définitions existent pour

caractériser un événement de tempête. Dans le cadre de la présente étude, nous emploierons la définition de Lessard et Dubois (1986, cité dans Bernatchez *et al.*, 2008), soit : une vitesse des vents supérieure ou égale à 74 km/h pendant une période minimale de trois heures. Les événements de fortes tempêtes ayant une période de récurrence de plusieurs décennies, voire un siècle, peuvent avoir des impacts à moyen et à long terme sur la morphologie des côtes sableuses, selon la force des tempêtes et les facteurs locaux (Morton *et al.*, 1994 ; Morton, 2002). Les facteurs importants contrôlant la portée des impacts des tempêtes sur la morphologie des plages sont présentés dans le tableau 1.3.

Tableau 1. 3 : Facteurs influençant l'impact des événements de fortes tempêtes sur une côte sableuse

Caractéristiques de la tempête	Caractéristiques de la plage	Effets cumulatifs des événements de tempête
Direction des vents dominants	Densité et type de couverture végétale	Coïncidence avec les grandes marées
Durée de la tempête	Degré de confinement des courants	Inondations répétées
Force des courants	Position par rapport au trajet de la tempête	Nombre de tempêtes précédentes dans la même année
Hauteur du niveau d'eau	Structure géologique de la côte	
Hauteur et puissance des vagues	Texture des sédiments	
Orientation de la tempête par rapport au tracé de la côte	Topographie de l'avant-plage (présence/absence de bancs sableux ou d'écueils rocheux) et de la plage (présence/absence de cordons littoraux ou de bois de grève)	
Vitesse des vents dominants	Type et densité du développement côtier	

Source : Morton, 2002

VARIATION SAISONNIERE DE LA MORPHOLOGIE DES PLAGES

Sur les côtes de l'Amérique du Nord, y compris celles de l'estuaire du Saint-Laurent, on retrouve un cycle régulier d'alternance de périodes calmes et de tempêtes. Entre octobre et mars, les tempêtes hivernales (surnommées les « Northeastern » sur la côte ouest américaine) forment des vagues plus hautes et plus fortes qu'en été, ce qui réduit le volume de sédiments sur l'estran et érode l'arrière-plage. Le matériel érodé est ensuite déplacé vers l'avant-plage où il forme des barres de sable qui freinent les vagues (Reading, 1996). Au retour du printemps, les vagues sont plus tranquilles et amènent des sédiments sur l'estran provenant du large et des barres d'avant-plage. Le profil devient alors plus bombé sur le haut estran et plus égal sur le bas estran pour reformer l'état d'équilibre (Paskoff, 2006). L'Atlas climatologique de l'estuaire du Saint-Laurent indique que la probabilité d'avoir des vagues de deux mètres dans l'estuaire maritime est quasiment nulle en juillet et en août, mais dépasse les 5 % en décembre (Vigeant, 1984, cité dans Drapeau, 1992). De plus, les résultats de Ruest (2014, Ruest *et al.*, 2016) montrent que le percentile 99 % des hauteurs significatives de vagues ($99\%-H_s$), correspondant à la moyenne du tiers supérieur des hauteurs de vagues, et la récurrence 50 ans des hauteurs significatives de vagues ($50yr-H_s$) dans l'estuaire atteignent respectivement 1-2 m et 2,5-4 m, alors qu'ils sont de 2-4 m et de 4,5-8 m dans le golfe du Saint-Laurent. Cependant, au cours du 21^e siècle, la réduction de glace de mer causerait une augmentation des hauteurs significatives de vagues extrême sur l'estuaire maritime et le golfe du Saint-Laurent (Ruest *et al.*, 2016).

Les changements saisonniers sont plus significatifs sur les côtes froides, comme au Québec, aussi à cause de la présence des glaces. Sur les plages de sable, l'érosion directe par les glaces se produit en partie lors du dégel printanier alors que des sédiments restent accrochés au pied de glace qui se déloge. Les sédiments sont alors transportés au large, plus loin sur la plage en suivant les courants, ou encore simplement poussés sur une courte distance (Short, 1999). Une fois bien développé, le pied de glace agit comme protecteur

pour le haut estran contre les multiples processus d'érosion (Dionne, 1973). En même temps, sa simple présence contribue indirectement à l'érosion puisqu'il favorise la réflexion des vagues sur sa paroi externe, causant ainsi l'érosion de la plage à sa base (Bernatchez et Dubois, 2004). Lorsque la période de dégel est terminée, le système tend à retourner en équilibre sédimentaire en abaissant le haut de plage pour combler le déficit en bas de plage (Bernatchez et Dubois, 2004).

1.2.3. ESTRANS MEUBLES COHESIFS

Ces estrans vaseux, généralement associés à un marais maritime, sont « des étendues littorales basses, périodiquement submergées, très faiblement inclinées, dues à des accumulations récentes de vase dans les secteurs abrités des côtes » (Paskoff, 2006, p. 100). Ils comportent un écosystème riche en biodiversité et contribuent au développement économique depuis des centaines d'années au Québec (Dionne, 2000). Les plantes présentes sont généralement halophiles et se développent dans la partie supérieure de l'estran dans le cas des régions tempérées et froides (Woodroffe, 2003 ; Paskoff, 2006). Aussi, ils jouent le rôle de zone tampon entre la mer et la terre, ce qui est très important pour la protection contre l'érosion de l'arrière-côte durant les tempêtes (Trenhaile, 1997 ; Bird, 2008)

Les marais maritimes se développent mieux là où l'amplitude des marées est grande (Paskoff, 2006). Cela explique pourquoi les marais maritimes augmentent en nombre et en étendue vers l'amont du Saint-Laurent (Drapeau, 1992). Toutefois, ils correspondent au type de côtes le plus sensible à l'érosion côtière parce qu'ils sont exposés à un plus grand nombre de processus d'érosion que les côtes rocheuses et sableuses (Frey et Basan, 1978 ; Bernatchez et Dubois, 2004).

1.2.3.1. CLASSIFICATIONS ET COMPOSANTES DES ESTRANS MEUBLES COHESIFS

CLASSIFICATION DES ESTRANS MEUBLES COHESIFS

La principale classification, présentée par Woodroffe (2003), se base sur la localisation du marais, soit : a) un delta ; b) un estuaire ; c) une côte ouverte sur le large ; d) derrière une île-barrière ; e) dans une baie ; f) dans des rias (Figure 1.13). Dans le cas particulier de l'estuaire maritime du Saint-Laurent, les estrans meubles cohésifs rencontrés correspondent à 1) un mélange entre « estuarien » et « côte ouverte » et 2) des fonds de baie.

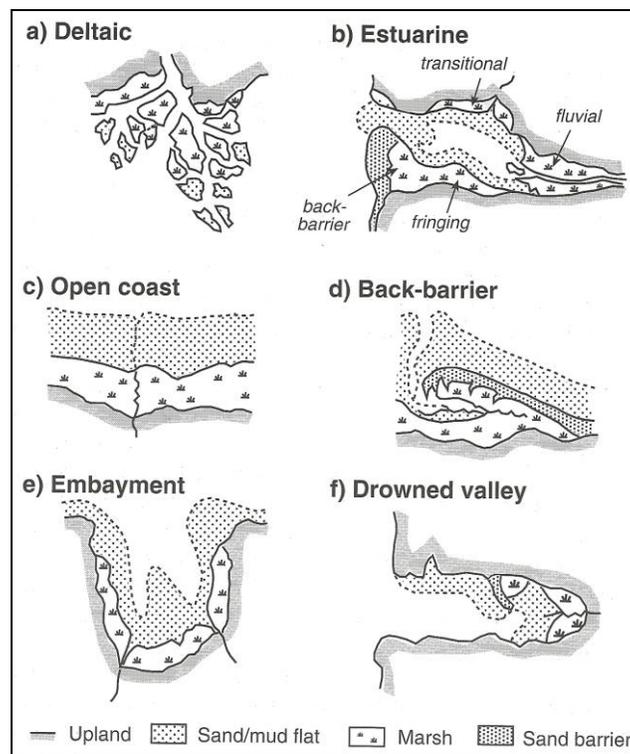


Figure 1. 13: Classification des marais maritimes selon leur emplacement sur la côte (Woodroffe, 2003).

COMPOSANTES D'UN MARAIS MARITIME

La morphologie et la composition sédimentaire des marais maritimes diffèrent d'une région à l'autre selon les régimes biologiques, géologiques, géographiques, climatiques et océanographiques locaux (Frey et Basan, 1978). Les sédiments fins organiques et inorganiques (surtout limons et argiles) ont des sources très variées, passant par les cours d'eau, la dérive littorale, l'érosion des îles-barrières, l'érosion côtière incluant la remobilisation des sédiments *in situ*, le transport éolien et les agrégats organiques (Frey et Basan, 1978). Sur la majorité des marais maritimes et des battures argileuses de l'estuaire du Saint-Laurent, on retrouve des mégablocs glaciels, souvent erratiques (Dionne, 2001 ; 2004 ; 2009).

La morphologie et l'étendue des marais maritimes dépendent d'abord et avant tout des marées ; un environnement macrotidal leur permet un meilleur développement (Leeder, 1999). La division des zones d'un profil de marais varie selon le type d'environnement (région froide, tempérée ou tropicale) et les définitions des limites utilisées.

En français, les termes utilisés proviennent du néerlandais et la division du marais comporte deux zones principales : la *slikke*, correspondant au « tidal flat », et le *schorre*, correspondant au « salt marsh » en anglais (Figure 1.14 ; Woodroffe, 2003 ; Paskoff, 2006).

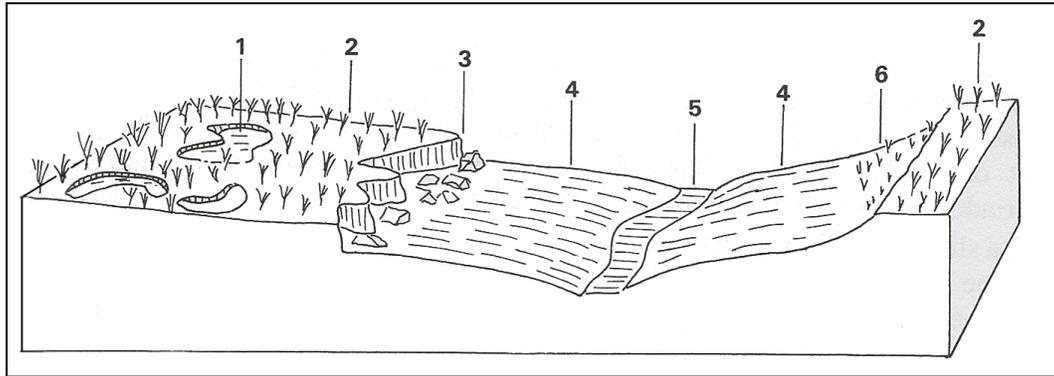


Figure 1. 14 : Illustration d'un marais maritime en climat tempéré (Paskoff, 2006). 1) Cuvette ou marelle. 2) Schorre. 3) Microfalaise. 4) Slikke. 5) Chenal de marée. 6) Haute slikke.

La *slikke* constitue la partie inférieure du marais maritime, soit dans la zone intertidale (Figure 1.14.4). Mis à part quelques algues et zostères (*Zostera marina*), cette zone est dépourvue de végétation et est inondée à chaque marée haute. Elle est caractérisée par une pente très faible de l'ordre de 1 à 3 ‰ et par des sédiments argilo-silteux possédant une couche de biofilm composée de diatomées assurant une stabilité de la surface face aux processus d'érosion par les vagues (Friend *et al.*, 2003 ; Cappucci *et al.*, 2004 ; Paskoff, 2006). Aussi, elle est traversée par plusieurs chenaux où circulent les courants de marée et d'où se draine l'eau douce des terres (Figure 1.14.5 ; Paskoff, 2006).

À l'extrémité de la slikke, on retrouve une microfalaise (ou le *talard*) marquant le début du schorre ou bien une zone transitionnelle nommée « slikke supérieure » ou « haute slikke » ayant une pente légèrement plus élevée (10 à 20 ‰) que celle de la slikke inférieure (Paskoff, 2006). Généralement, une microfalaise sépare nettement le schorre de la slikke avec une hauteur décimétrique et parfois métrique (Figure 1.14.3 ; Paskoff, 2006). À l'opposé, la haute slikke est partiellement colonisée par quelques espèces de plantes vasculaires marines, principalement de *Spartine alterniflora* et de *Zostère marine* sur les rives de l'estuaire du Saint-Laurent (Figure 1.14.6) ; Chabot et Rossignol, 2003).

Au-dessus de la slikke se trouve le schorre (Figure 1.14.2). Il s'agit d'une zone pratiquement horizontale (moins de 1 ‰) inondée lors de hautes mers de vives eaux et colonisée par des espèces herbacées halophiles (Paskoff, 2006). Les deux espèces dominantes sur les rives du Saint-Laurent sont *Spartina alterniflora* et *Spartina pectinata* (Coulombier *et al.*, 2012). Il est parsemé de marelles et de quelques chenaux importants pour les échanges d'eau. Le schorre joue un rôle important au niveau du développement du marais, car il diminue significativement l'énergie des vagues de par sa végétation herbacée dense, ce qui favorise le dépôt des sédiments fins (Trenhaile, 1997 ; Möller et Spencer, 2002 ; Woodroffe, 2003 ; Paskoff, 2006 ; Bird, 2008). De plus, il alimente la slikke en sédiments durant les tempêtes (Trenhaile, 1997).

Finalement, il est possible de retrouver derrière le schorre un « pré salé » ou « arrière schorre », qui correspond à un ancien schorre devenu une zone humide (Dionne, 2000). N'étant plus inondée que lors de fortes tempêtes, la végétation y est plus variée et contient des saules arbustifs et des espèces herbacées non halophiles, mais tolérantes à de faibles quantités de sel (Dionne, 2000 ; Paskoff, 2006).

1.2.3.2. FACTEURS ET PROCESSUS INFLUENÇANT L'ÉVOLUTION DES MARAIS MARITIMES

Le développement des marais dépend de plusieurs facteurs environnementaux : la quantité et le type de sédiments, les courants et l'amplitude des marées, le vent et la force des vagues, la variation du niveau marin, le type de végétation, la distance par rapport aux sources de sédiments, la topographie et le climat local (French et Stoddart, 1992 ; Friend *et al.*, 2003). Les processus d'érosion présents peuvent être à dominance physique, à dominance biologique ou une combinaison des deux (Frey et Basan, 1978). L'ampleur et

l'intensité des processus varient surtout en fonction de la stabilité du substrat. Divers facteurs physico-chimiques, biologiques et anthropiques vont influencer cette stabilité. On peut également observer des différences dans l'ampleur de l'impact des processus en fonction des saisons. Étant donné la multitude d'éléments composant l'estran meuble cohésif, il est essentiel de connaître les principaux facteurs influençant la stabilité du substrat pour être en mesure de comprendre la dynamique et les processus d'érosion dominants.

PHYSICO-CHIMIQUES

SUBSTRAT

Le substrat sur lequel se développe un marais est principalement composé de sédiments cohésifs. Ce type de sédiments possède une caractéristique spécifique qui est l'attraction électrostatique des ions permettant la floculation des particules argileuses (Lundkvist *et al.*, 2007). La stabilité des sédiments dépend principalement du contenu en eau (quantité et salinité de l'eau) et des propriétés minéralogiques des sédiments qui influencent les processus de déposition et de consolidation des dépôts de surface. Généralement, la floculation des argiles provenant des sources d'eau douce est particulièrement favorisée lorsqu'elles entrent en contact avec l'eau salée (Frey et Basan, 1978).

La stabilité du substrat est aussi influencée par le degré de consolidation et de compaction du substrat ; plus il est dense, plus il est solide (Woodroffe, 2003 ; Amos *et al.*, 2004). La végétation présente ainsi que la composition granulométrique du substrat correspondent aux facteurs principaux contribuant au degré de consolidation et de compaction.

MORPHOLOGIE

Les principales composantes morphologiques d'un marais influençant sa stabilité sont : la largeur du schorre, l'élévation du marais et l'hétérogénéité de sa surface.

On retrouve une plus grande dissipation d'énergie des vagues lorsque le marais comporte un schorre très large avec une microfalaise assez haute. En effet, selon les résultats de Möller et Spencer (2002), on peut constater une diminution de 40 % de l'énergie des vagues dans les premiers 10 m des schorres étudiés dans le cas où il y a une microfalaise, puis une atténuation de la majorité de l'énergie dans les quelques dizaines de mètres suivants due à la végétation dense.

Un marais qui est plus élevé sera plus stable en raison de la moins longue durée d'inondation des terres et la plus grande densité de végétation. De ce fait, il subira moins l'action des vagues et des courants de marée (Frey et Basan, 1978 ; Widdows *et al.*, 2000).

Un marais ayant une surface hétérogène sera plus propice à l'érosion qu'une surface lisse de sédiments cohésifs. On entend par hétérogénéité de la surface, une étendue de blocs de diverses tailles répandus de manière à former des blocs isolés, des cordons de blocs, des placages de blocs, ce qui est typique de la rive sud de l'estuaire du Saint-Laurent (Dionne, 1962, 2009). Ces blocs de taille métrique favorisent l'érosion sur son pourtour ainsi que la création de marelles suite à leur déplacement par les glaces (Dionne, 1981 ; Paskoff, 2006).

COURANTS, VAGUES ET MAREES

Les processus d'érosion influençant le plus les marais sont liés à l'action des vagues et des courants de marée (Tolhurst *et al.*, 2006). Ces processus, plus particulièrement les courants de marée, permettent le développement de chenaux essentiels pour le drainage du marais (Frey et Basan, 1978). L'érosion dans les chenaux de marée se produit généralement en réponse à trois mécanismes : la contrainte de cisaillement directe du fluide sur le

substrat, l'action des vagues sur les berges des chenaux, ainsi que les glissements rotationnels des berges dans les chenaux (Frey et Basan, 1978). Ils causent davantage de dommages pendant les événements de tempêtes puisque les vents forts amplifient les vagues et les courants, en plus de hausser les niveaux d'eau lors du passage du centre de la basse pression. L'action des vagues, quant à elle, contribue principalement à l'érosion de la microfalaise, située à la jonction entre le schorre et la slikke, lors de la marée haute ou des événements de tempêtes. Cette microfalaise s'érode aussi par le passage de la marée dans les chenaux à marée haute et par l'action des glaces (Dionne, 2000 ; Paskoff, 2006).

GLACES DE MER ET PIED DE GLACE

Dans les régions froides, la présence du pied de glace et de glace de mer joue un rôle très important dans l'évolution des marais (Drapeau, 1992 ; Dionne 2000 ; Paskoff, 2006). D'ailleurs, sur les rives de l'estuaire du Saint-Laurent, les marais sont surtout érodés par les glaces (Dionne, 1999). Tel qu'expliqué dans la section 1.2.1.3, le pied de glace est à la fois protecteur et destructeur. D'un côté, le pied de glace qui se forme sur la partie supérieure du marais agit comme protecteur durant l'hiver contre pratiquement tous les processus d'érosion pour le substrat sous-jacent (Dionne, 1973). De l'autre côté, tout comme sur les plages, il augmente la réflectivité sur sa paroi externe, ce qui augmente le degré de réflectivité des vagues favorisant ainsi l'érosion du substrat à sa base (Bernatchez et Dubois, 2004). Aussi, au moment du démantèlement du pied de glace, il emporte avec lui des sédiments soudés à la glace. Quant à la glace de mer qui n'est pas fixe, elle peut geler autour de blocs de taille métrique et les déplacer sur de très longues distances (Dionne, 2004). De plus, leur arrachement crée des marelles et leur déplacement forme des marques sur le substrat.

BIOLOGIQUES

La stabilité du substrat est également fortement influencée par deux principaux facteurs biologiques : 1) la présence d'un biofilm constitué de diatomées ; 2) la végétation aquatique et terrestre présente.

BIOFILM

On retrouve sur la surface des marais une couche fine composée d'un amas de diatomées (algues microscopiques) et de cyanobactéries incorporées dans une matrice argileuse qu'on appelle « biofilm » (Lundkvist *et al.*, 2007). Le biofilm joue le rôle d'un stabilisateur de la surface puisqu'il augmente le seuil d'érosion critique (τ_0) du substrat (Friend *et al.*, 2003 ; Neumeier *et al.*, 2006).

VEGETATION

Tel que mentionné précédemment, la végétation ralentit les vagues de manière significative, ce qui favorise la sédimentation et augmente la stabilité du substrat (Friend *et al.*, 2003 ; Amos *et al.*, 2004 ; Neumeier et Ciavola, 2004 ; Neumeier et Amos, 2006 ; Bird, 2008). Des observations faites sur le marais maritime de Pointe-aux-Épinettes, au Parc National du Bic, ont montré une relation entre la profondeur d'eau et l'atténuation des vagues : plus le niveau d'eau est élevé, plus le coefficient d'atténuation des vagues est faible (Coulombier *et al.*, 2012). Ces observations ont également montré une différence notable entre l'atténuation des vagues sur le schorre en raison de la présence de végétation. Sur le schorre, l'atténuation des vagues a doublé entre juin et août en raison de la croissance des plantes, tandis qu'il y a très peu de différence entre les résultats sur la slikke, où il n'y a pas de végétation dense (Coulombier *et al.*, 2012).

FAUNE

Les processus biologiques les plus influents concernent l'effet de l'activité des organismes fouisseurs et brouteurs (Frey et Basan, 1978 ; Widdows *et al.*, 2000 ; Friend *et al.*, 2005). Les oiseaux marins et migrateurs jouent aussi un rôle important dans l'érosion du schorre. En broutant la racine des plantes présentes sur le schorre, les oiseaux affaiblissent la structure cohésive de la surface, réduisant son seuil d'érosion et facilitant ainsi la remise en suspension des sédiments par les courants de marée (Bernatchez et Dubois, 2004). Par exemple, à Montmagny, les oies sont responsables de 20 à 25 % de l'érosion annuelle du schorre (Bernatchez et Dubois, 2004, p. 61).

Outre les oiseaux, de nombreux bivalves et vers colonisent les marais maritimes et, dépendamment des espèces et des conditions météo-marines, ils ont un effet stabilisateur ou érosif sur le substrat. Toutefois, lorsque la vitesse des courants de marée franchissent le seuil d'érosion critique du sédiment, leur activité agit comme déstabilisateur d'une part en raison de la rupture de la structure cohésive des sédiments et l'augmentation du contenu en eau par la construction de galeries, et d'autre part par le broutage du biofilm protecteur à la surface. L'intensité de la bioturbation va dépendre principalement de la densité de population des plantes et des animaux, du taux de sédimentation ou d'une combinaison des deux (Frey et Basan, 1978).

ANTHROPIQUES

Le principal processus anthropique affectant les marais est la construction de digues et d'infrastructures « dures » de protection de la côte (ex. : murets). Les digues sont utilisées depuis des centaines d'années, avant tout pour l'agrandissement des terres cultivables, la production de sel et d'autres utilisations, mais également pour la protection de l'arrière-côte face aux processus d'érosion (Trenhaile, 1997 ; Paskoff, 2006).

Par contre, ces infrastructures créent une limite physique à la migration des marais dans le cas d'une hausse du niveau marin. À l'état naturel avec une pente douce vers l'arrière-côte, dans le contexte d'une hausse du niveau marin, il se produit une migration de l'écosystème intertidal vers les terres. Toutefois, la présence d'une digue ou d'une côte raide empêche la migration graduelle des espèces et favorise le phénomène de « coastal squeeze » (Bernatchez et Quintin, 2016). Il s'agit d'un phénomène par lequel l'étendue de l'estran va être réduite par le manque d'espace.

VARIATION SAISONNIERE DES PROCESSUS

Tout comme pour les plages, il existe une variation du taux de sédimentation selon les saisons (Frey et Basan, 1978 ; Andersen, 2001 ; Möller et Spencer, 2002 ; Coulombier *et al.*, 2012). D'une part, plusieurs auteurs ont suggéré qu'il y aurait une flocculation périodique des argiles entraînée par l'augmentation du taux de salinité durant les mois d'été arides. Durant la période hivernale, on note une influence importante de la glace ainsi qu'une augmentation de la turbulence, due aux tempêtes plus fortes et plus fréquentes qu'en été, qui favorise l'érosion du marais.

D'autre part, l'activité biologique changeant selon les saisons influence beaucoup la sédimentation dans les marais (Coulombier *et al.*, 2012). En effet, l'activité biologique et la croissance des plantes sont à leur maximum au printemps et en été, ce qui favorise la production et la déposition des sédiments sur la slikke. Toutefois, sur certaines parties de la côte du Saint-Laurent comportant une microfalaise, l'érosion est plus importante en été qu'en hiver à cause de la protection du marais supérieur par le pied de glace (Dionne, 2000).

1.3.POTENTIEL D'INFLUENCE DES ESTRANS SUR L'EROSION DE LA COTE

À la lumière de cette revue de littérature, plusieurs caractéristiques de l'estran sont susceptibles d'influencer les principaux processus affectant la côte de l'estuaire maritime du Saint-Laurent, soit les processus hydrodynamiques et glaciels, et, conséquemment, avoir un impact sur le taux de déplacement de la côte. Ces caractéristiques peuvent être classées en trois catégories : 1) composition de l'estran, 2) morphologie de l'estran et 2) végétation sur l'estran. Bien que nous nous intéressions davantage à leur impact sur le recul de la côte, certaines caractéristiques géomorphologiques des estrans, notamment leur rugosité, peut également jouer un petit rôle sur l'avancé de la ligne de rivage en contribuant à l'atterrissement des sédiments lors de la dérive littorale.

1.3.1. COMPOSITION DE L'ESTRAN

1.3.1.1. PRESENCE D'ECUEILS ROCHEUX SUR UN ESTRAN A DOMINANTE SABLEUSE

L'affleurement d'une plate-forme rocheuse ou la présence d'écueils rocheux sur le haut et/ou le bas estran, couvrant parfois toute la zone intertidale, est typique de la région entre Rimouski et Sainte-Anne-des-Monts (Dionne, 2002). La présence d'une plate-forme rocheuse partielle, d'écueils ou de récifs coralliens localisés sur le bas-estran ou en avant-côte agit comme des brise-lames, réduisant ainsi l'énergie des vagues arrivant à la côte (Morton, 2002). Par contre, selon une étude récente sur le Sillon de Talbert, en Bretagne, la présence d'écueils rocheux sur l'estran composite, rocheux et sédimentaire, favoriserait l'érosion côtière en concentrant l'énergie des vagues, par réflexion et diffraction, en certains points du cordon de galets, ouvrant ainsi des brèches à la base de celui-ci (Stéphan,

2011). Il semble donc que la présence de ces écueils influence la dynamique sédimentaire localement, mais très peu d'études ont été menées sur le sujet. Cette composante de l'estran est donc un facteur non négligeable à considérer dans l'évaluation de l'influence de la géomorphologie de l'estran sur le taux de déplacement de la ligne de rivage.

1.3.1.2. PRESENCE D'UN CORDON LITTORAL SUR UN ESTRAN A DOMINANCE ROCHEUSE

La présence de dépôts meubles grossiers sur la partie supérieure de la plate-forme favorise l'abrasion de celle-ci ainsi que l'abrasion de la base de la falaise rocheuse. À l'opposé, lorsqu'il y a une grande accumulation de sédiments formant une petite plage de sable ou de gravier sur le haut-estran, cela peut avoir un effet protecteur pour la falaise et le haut-estran lui-même (Reading, 1996).

1.3.2. MORPHOLOGIE DE L'ESTRAN

L'énergie des vagues est directement reliée à la profondeur d'eau (Trenhaile et Kanyaya, 2007 ; Marshall et Stephenson, 2011). Une fois le point de déferlement des vagues atteint, (profondeur correspondant en moyenne à un vingtième de la longueur d'onde des vagues), l'énergie des vagues se dissipe en déferlant sur l'estran (Masselink et Hughes, 2011 ; Ogawa *et al.*, 2011). Par conséquent, il est logique de penser que la morphologie de l'estran, affectant la profondeur d'eau et, du même coup, l'énergie et les caractéristiques des vagues (Ogawa *et al.*, 2015), soit un facteur important à considérer dans le calcul de l'aléa érosion de la côte.

1.3.2.1. LARGEUR ET PENTE DE L'ESTRAN

La largeur et la pente de l'estran sont deux facteurs importants à considérer, surtout pour les estrans meubles non cohésifs et cohésifs. En effet, une plage à pente faible et de grande étendue favorise la dissipation d'énergie des vagues, diminuant ainsi l'aléa érosion côtière et favorisant l'accumulation de sédiments (Masselink et Short, 1993). Aussi, un marais très étendu fait bénéficier l'arrière-côte d'une plus grande zone tampon, réduisant l'impact des processus d'érosion à la côte lié à l'action des vagues.

En ce qui concerne les estrans rocheux, il a été observé qu'un gradient de pente plus élevé d'une plate-forme rocheuse favorise généralement la dissipation de l'énergie des vagues avant que celles-ci n'atteignent la base de la falaise rocheuse (Marshall et Stephenson, 2011 ; Ogawa, 2013). Pour ce qui est de la largeur de la plate-forme, il n'y a pas consensus sur son rôle dans la dissipation de l'énergie des vagues et les résultats de plusieurs recherches sont contradictoires (Dasgupta, 2010). D'un côté, Limber et Murray (2014) ont mesuré une plus grande dissipation d'énergie des vagues sur les plates-formes plus étendues. À l'opposé, les résultats de l'étude de Ogawa *et al.* (2011 et 2012), sur une plate-forme de même morphologie que l'étude précédente (type B subhorizontal), montrent que la quantité d'énergie des vagues dissipée sur la plate-forme est indépendante de la largeur de la plate-forme rocheuse, et serait plutôt affectée par la topographie de la plate-forme.

La largeur et la pente de l'estran ont aussi un impact sur la stabilité du pied de glace, qui constitue un facteur important dans l'hydrodynamique sédimentaire durant la période hivernale. Une meilleure stabilité et une plus grande étendue du pied de glace, facteurs déterminants du rôle de protection contre les processus d'érosion en hiver, sont favorisées par un estran large avec un très faible gradient de pente tel que retrouvé sur une slikke ou une plage en fond de baie (Dionne, 1973 ; Wiseman *et al.*, 1981, cité dans Hansom *et al.*,

2014). Au contraire, le pied de glace est généralement étroit sur un estran rocheux escarpé (Dionne, 1973).

1.3.2.2. RUGOSITE DE L'ESTRAN

La rugosité, ou variation topographique globale de l'estran, affecte directement l'énergie des vagues. Dans le cas d'estrans meubles non cohésifs, la présence de bancs et de bâches constitue une variation topographique pouvant favoriser la dissipation d'énergie des vagues (Bird, 2008). Aussi, la microtopographie d'affleurement rocheux (sur les estrans meubles) ou d'une plate-forme rocheuse (estran rocheux) affecte également l'énergie des vagues. En effet, selon Ogawa *et al.* (2015), la dissipation de l'énergie des vagues devrait être plus importante sur une plate-forme dont la topographie est fortement irrégulière (très rugueuse) en raison du coefficient de friction plus élevé.

Par ailleurs, une étude de Stephenson et Kirk (2000a, 2000b) réalisée à Kaikoura, en Nouvelle-Zélande, montre que les plates-formes présentes à cet endroit réduisaient de manière significative l'énergie des vagues. En effet, les vagues subissaient un fort freinage par le fond ainsi qu'une réduction importante de leur énergie due à la topographie irrégulière des lieux (Stephenson et Kirk, 2000a). Une autre étude de Trenhaile et Kanyaya (2007) en arrive au même résultat à Mont-Louis, sur la rive nord de la péninsule gaspésienne. Cela nous permet de supposer que, sur le site d'étude, une forte rugosité favoriserait la réfraction des vagues et qu'il y aurait donc moins d'érosion de la côte.

1.3.2.3. ÉLEVATION

L'élévation de la plate-forme est un facteur important dans l'évolution de la ligne de rivage. Elle détermine la hauteur d'eau minimale que les vagues doivent atteindre pour affecter la ligne de rivage et influence les caractéristiques de vagues à sa surface (Beetham et Kench, 2011). Par exemple, dans le cas où la plate-forme est plus élevée par rapport au niveau moyen des hautes eaux, seules les vagues de tempêtes et/ou de forte énergie pourront atteindre la côte (Trenhaile, 1987, 1997).

Aussi, l'élévation d'un marais bien développé influence l'érosion sur le schorre et le pré salé (si présent) puisque, dans le cas où il est plus élevé, il sera moins exposé aux vagues et aux courants de marée (Frey et Basan, 1978 ; Coulombier *et al.*, 2012). Par conséquent, la surface du schorre subira moins d'érosion. Toutefois, cela ne changera rien à l'érosion par l'action des vagues sur la microfalaise délimitant le schorre de la slikke, qui entraîne le recul du schorre, constituant le problème principal dans l'érosion d'un marais maritime.

1.3.3. VEGETATION SUR L'ESTRAN ET EN ZONE SUBTIDALE

La végétation présente sur l'estran concerne plus précisément les estrans meubles cohésifs (marais maritimes et battures argileuses), où l'on retrouve des plantes halophiles à densité variable. En faisant le bilan des caractéristiques des marais maritimes, on peut dire que l'érosion côtière peut être principalement réduite par un schorre dont la végétation est bien développée puisque l'énergie des vagues de beau temps y est totalement dissipée (Möller et Spencer, 2002 ; Coulombier *et al.*, 2012).

Quant à la végétation aquatique sur la partie distale du bas-estran et dans la zone subtidale, il s'agit surtout des laminaires qui peuvent réduire l'énergie des vagues, protégeant ainsi le substrat contre leur action érosive (Trenhaile, 1997). La question est de savoir si, lorsqu'on retrouve des zones densément peuplées dans la partie subtidale, elles ont une influence significative sur la dissipation d'énergie des vagues pour réduire l'impact des vagues sur la ligne de rivage.

CHAPITRE 2

PRÉSENTATION DU SITE D'ÉTUDE

2.1. LOCALISATION

2.1.1. SITE GLOBAL

La présente étude a été réalisée sur la côte sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent, dans les régions administratives du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie, au Québec. Elle couvre près de 83,8 km de côte, recoupant les Municipalités régionales de comté (MRC) de Rimouski-Neigette, de La Mitis et de La Matanie. Plus précisément, la côte étudiée commence environ 2 km à l'est du quai de Pointe-au-Père (municipalité de Rimouski) et s'étend jusqu'à Matane-sur-Mer (municipalité de Matane) (Figure 2.1).

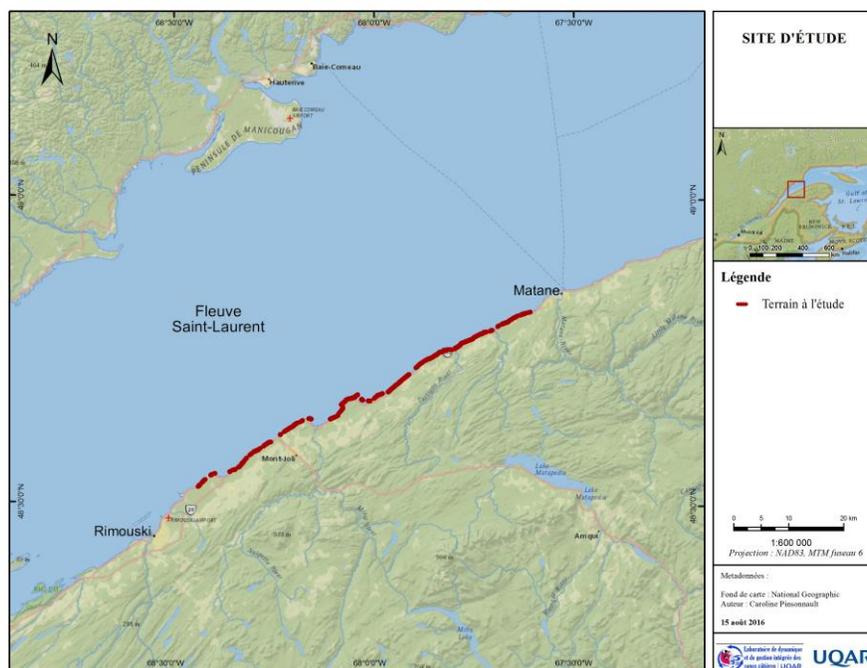


Figure 2. 1 : Carte de localisation du site d'étude.

Initialement, le terrain d'étude s'étendait du quai de Pointe-au-Père jusqu'à l'extrémité est de la municipalité de Sainte-Anne-des-Monts afin d'assurer une bonne représentation des principaux types de côtes, soit les côtes à terrasse de plage, les côtes à falaise meuble et les côtes rocheuses avec et sans falaise. Toutefois, étant donné que l'objectif principal de la présente recherche consistait à identifier les composantes géomorphologiques de l'estran ayant un lien avec l'aléa érosion, nous avons choisi de concentrer les recherches davantage sur les côtes à terrasse de plage, plus sensibles à l'aléa érosion. Après avoir pris connaissance des taux de déplacement moyens pour les périodes 1993-2009 et 2009-2012 le long de ce secteur (voir section 3.4), il a été décidé de restreindre le site d'étude au secteur de Pointe-au-Père jusqu'à l'extrémité ouest de la municipalité de Matane, principalement parce que ce secteur est essentiellement composé de côtes à terrasse de plage et possède, par ailleurs, une grande diversité dans la composition des estrans. En effet, on note des variations de lithologie et de granulométrie du substrat, ainsi que de la composition de l'estran et de la topographie générale du profil de la côte parfois même sur quelques dizaines de mètres. D'ailleurs, la largeur de l'estran peut passer de 0 m le long de certaines côtes anthropisées ou rocheuses jusqu'à plus de 850 m dans l'herbier à zostère près de Grand-Métis.

2.1.2. SITES SPECIFIQUES

Dans le cadre de cette étude, plusieurs échelles spatiales seront analysées : 1) échelle globale (ensemble des profils entre Pointe-au-Père et Matane), 2) échelle régionale (secteur Baie-des-Sables – Matane), 3) échelle sectorielle (par cellule hydrosédimentaire), et 4) échelle locale (sites spécifiques).

L'étude des sites spécifiques (échelle locale) a pour objectif d'isoler au maximum les variables descriptives et morphométriques des estrans afin de réduire le bruit dans les

analyses et d'affiner les résultats. Le choix des sites spécifiques s'est fait en fonction de la capacité à délimiter le plus grand nombre de profils possible de côte naturelle ayant la même géologie, le même type de côte et le même type d'estran, en plus de faire partie de la même cellule hydrosédimentaire. Par conséquent, ils ont pu être sélectionnés après la phase de caractérisation des estrans et du calcul des taux de déplacement (détaillés au chapitre 3).

En tout, 10 sites spécifiques, couvrant chacun entre 400m et 800m de côte naturelle (non artificialisée) à terrasse de plage, ont été choisis entre la municipalité de Sainte-Flavie et celle de Matane (Figure 2.2). Les estrans qui les composent sont à dominance rocheuse (type 2 et type 3) ou mixte (type 8), selon la typologie détaillée au chapitre 4 (section 4.1).

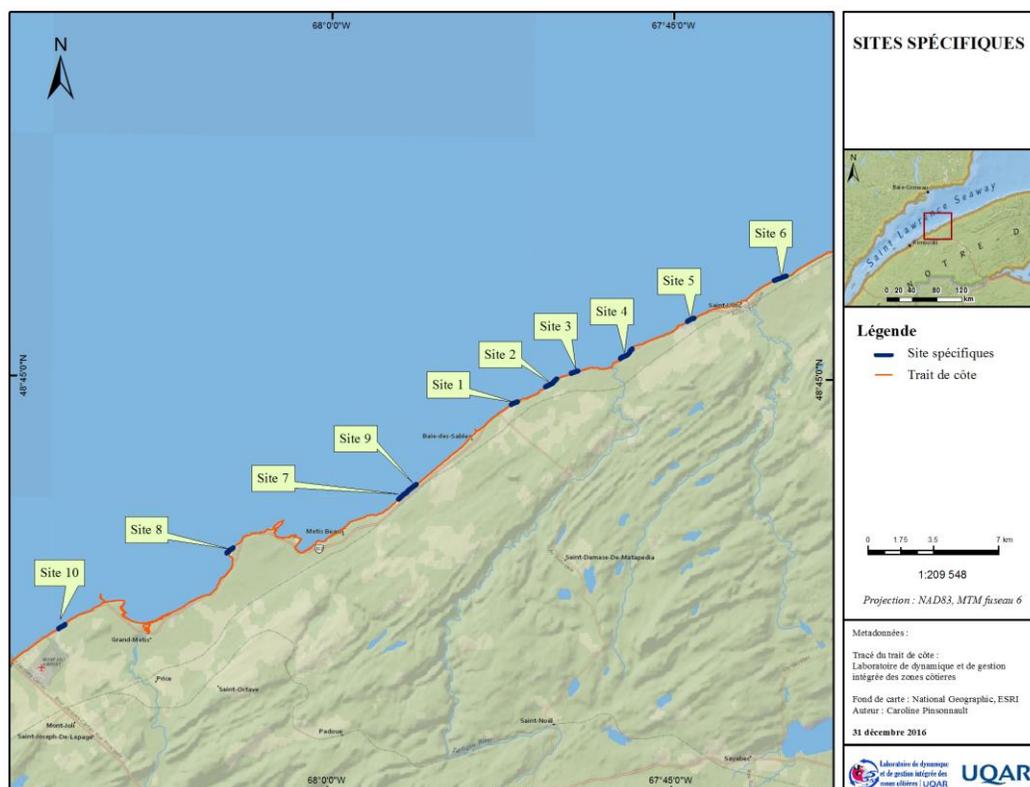


Figure 2. 2 : Carte de localisation des sites spécifiques, situés sur des segments de côtes naturelles entre Sainte-Flavie et Saint-Ulric.

Les sites 1 à 6 se situent dans le secteur Baie-des-Sables – Matane, où davantage de données morphométriques de l'estran (largeur et pente du haut-estran et du bas-estran, altitude de la ligne de flexure) ont été obtenues de par l'accès au tracé de la ligne de flexure, non délimité sur le reste de notre terrain d'étude. Tous les sites comprennent un cordon littoral sableux à graveleux sur le haut-estran, plus ou moins grand selon le site. Les sites 7 à 9 ont été sélectionnés après l'analyse complète des sites 1 à 6 afin de confirmer les résultats obtenus avec ces derniers en les comparant avec des segments de côte situés dans l'autre secteur du site d'étude, soit entre Pointe-au-Père et Baie-des-Sables. Enfin, le site 10 a été sélectionné après l'analyse complète des sites 7 à 9 afin de confirmer si les résultats obtenus étaient similaires dans un secteur présentant très peu de zones naturelles. Le tableau 2.1 présente les caractéristiques générales des sites spécifiques sélectionnés. Les cartes de localisation sont présentées à l'annexe I. La caractérisation détaillée des estrans pour chacun des sites est présentée au chapitre 4 (section 4.2.5).

Tableau 2. 1 : Localisation et caractéristiques générales des sites spécifiques à l'étude.
Source des données géologiques

Site	Localisation	Coord. Lat./Long. (m)	Étendue	Cellule hydrosédime ntaire	Formation géologique	Type d'estran
#1	3 km à l'est de Baie-des-Sables	Lat : 5 400 038,894 Long : 277 945,570	395 m	Tartigou	Mélange de Cap- Chat 1	3
#2	3,5 km à l'ouest de la rivière Tartigou, au-devant de la municipalité de Desrosiers	Lat : 5 401 073,408 Long : 279938,226	781 m	Tartigou	des Landes	2
#3	2 km à l'ouest de la rivière Tartigou	Lat : 5 401 694,465 Long : 281169,225	420 m	Tartigou	des Landes	2

Site	Localisation	Coord. Lat./Long. (m)	Étendue	Cellule hydrosédime ntaire	Formation géologique	Type d'estran
#4	1 km à l'est de la rivière Tartigou	Lat : 5 402 620,499 Long : 284007,741	867 m	Tartigou	Mélange de Cap-Chat 2	8
#5	2,8 km à l'ouest de la rivière Blanche, près du centre-ville de Saint-Ulric	Lat : 5 404 515,793 Long : 287401,091	432 m	Tartigou	Mélange de Cap-Chat 2	2
#6	2,5 km à l'ouest de Saint-Ulric	Lat : 5 406 742,904 Long : 292204,939	710m	St-Ulric – Matane-sur-Mer	Original 2	8
#7	2,0 km à l'est de Métis-sur-Mer (Les Boules)	Lat : 5 395 102,484 Long : 271994,647	733 m	Métis-sur-Mer	Mélange de Cap-Chat 1	8
#8	3,3 km à l'ouest du phare de Métis-sur-Mer, près de la Pointe-Leggatt	Lat : 5 392 121,682 Long : 262677,356	445 m	Casse-Pierre	Tourelle 1	2
#9	2,5 km à l'est de Métis-sur-Mer (Les Boules), juxtaposé à l'extrémité Est du site 7	Lat : 5 395 509,349 Long : 272489,155	510 m	Métis-sur-Mer	Mélange de Cap-Chat 1	3
#10	3,3 km à l'est de Sainte-Flavie	Lat : 5 388 013,486 Long : 253669,462	428 m	Sainte-Flavie	Original 1	2

Source pour les formations géologiques : MERN, 2015.

2.2.CONTEXTE GEOLOGIQUE

La côte de la rive sud de l'estuaire du Saint-Laurent est marquée par la présence de crêtes (à Grand-Métis p. ex.) correspondant à des plissements géologiques de la chaîne Appalachienne. Ces crêtes influencent l'orientation et la composition de la côte ainsi que sa structure, qui constituent trois facteurs déterminants dans la sensibilité de la ligne de rivage aux processus d'érosion hydrodynamiques (Dionne, 1999). En dehors des secteurs à crêtes et des secteurs en fond de baie, le tracé de la ligne de rivage est plutôt rectiligne avec une orientation variant généralement de NW à NNW.

Par l'observation des plates-formes rocheuses le long du littoral à l'étude, on peut remarquer que la structure et la composition du substrat rocheux varient beaucoup. Les formations géologiques, datant du Cambrien et de l'Ordovicien, présentent à l'échelle régionale sont : la formation des Landes, la formation Orignal, la formation Rivière-Ouelle, la formation Tourelle, le groupe Trois-Pistoles et le mélange de Cap-Chat. Les différentes roches présentes dans les formations identifiées entre Rimouski et Matane sont présentées au tableau 2.2.

Tableau 2. 2 : Composition de chaque suite stratigraphique de la géologie régionale présente sur le site d'étude

NOM DE LA SUITE STRATIGRAPHIQUE	COMPOSITION PRINCIPALE
Formation des Landes	Chert, claystone calcaireux, calcilutite
Formation Orignal 1	Mudstone, siltstone, grès et calcaire
Formation Orignal 2	Mudstone, siltstone massif et homogène
Formation Rivière-Ouelle	Mudslate, siltstone et grès
Formation Tourelle 1	Grès feldspathique, mudslate et mudrock

NOM DE LA SUITE STRATIGRAPHIQUE	COMPOSITION PRINCIPALE
Formation Tourelle 2	Wacke lithique et mudshale
Groupe de Trois-Pistoles	Grès feldspath et quartzit, mudslate et siltstone
Mélange Cap-Chat 1	Unité chaotique (mélange tectonique), blocs
Mélange Cap-Chat 2	Grès, mudrock et calcaire

Source : MERN, 2015

2.3.CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE

2.3.1. COMPOSANTES GENERALES DU LITTORAL DE L'ESTUAIRE MARITIME

Le littoral de la rive sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent est divisé en trois composantes principales. D'abord, il y a la falaise Micmac, qui est une falaise morte (à l'exception de l'ouest de la baie de Mitis où elle est active) dont la composition diffère d'une région à l'autre, allant de rocheuse à meuble et souvent mixte (meuble et rocheuse) (Dionne, 2002). Dans les secteurs rocheux, une plate-forme rocheuse, affleurante sur une grande partie de l'estran du site d'étude, fait partie du même système géomorphologique que la falaise rocheuse Micmac héritée d'une période antérieure à l'Holocène puisqu'on retrouve des marques glaciaires sur la falaise et la plate-forme rocheuse (Dionne, 2002). Aux endroits où la falaise est composée de matériaux meubles, la falaise et la batture argileuse (composant la partie inférieure de l'estran dans ces secteurs) sont des formes postglaciaires taillées dans les argiles glacio-marines de la mer de Goldthwait (Dionne, 2002).

La deuxième composante du littoral est la basse terrasse de Mitis, une forme littorale héritée de l'Holocène supérieur, sur la côte entre Pointe-au-Père et Matane (Dionne 2002). Elle est constituée de sable et de gravier d'environ 1 m à 3 m d'épaisseur et repose sur la plate-forme rocheuse (ou la batture argileuse selon la région) qui est rattachée à la falaise Micmac (Dionne 2002).

La troisième composante constitue la zone intertidale actuelle dont la largeur et la composition varient beaucoup, surtout sur la rive sud de l'estuaire maritime (Dionne, 2002). La nature de l'estran dépend principalement de la nature de la falaise Micmac : l'estran peut être composé d'une plate-forme rocheuse, d'une grande batture argileuse ou d'un assemblage de sédiments meubles et d'affleurements rocheux (Dionne, 2002). On retrouve également des plages de sable au niveau des anses et des fonds de baies.

2.3.2. TYPES DE COTES PRESENTS SUR LE SITE D'ETUDE

Tel que mentionné précédemment, il existe plusieurs types de côtes le long de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. La classification de ces côtes est définie selon leur topographie, leur lithologie, leur géomorphologie ainsi que selon les processus influençant l'évolution de la côte (Dubois, 1973). Le tableau 2.3 présente une description des types de côtes québécoises définis par Bernatchez *et al.* (2008) que l'on retrouve sur la région à l'étude.

Tableau 2. 3 : Types de côtes retrouvés dans la région à l'étude

TYPES DE COTES	DEFINITION
Marais maritime	Les marais maritimes sont des zones d'accumulation de sédiments fins colonisées par de la végétation herbacée.
Flèche littorale	Accumulation de sable et/ou de gravier qui s'attache à la côte et qui s'étire généralement en parallèle à la côte dont l'extrémité est libre.
Terrasse de plage	Accumulation de sable et/ou de gravier littoral formée d'un replat généralement végétalisé qui est très rarement submergée par les marées. Le replat est parfois bordé sur sa partie inférieure par un talus d'érosion (microfalaise) de moins de 1,5 m de hauteur et sa surface est parfois affectée par l'activité éolienne. La terrasse de plage peut être suivie d'une falaise stable ou d'un terrain plat.
Tombolo	Accumulation de sable et/ou de gravier qui relie la côte à un îlot souvent rocheux.
Basse falaise meuble	Côte caractérisée par un escarpement de dépôts meubles de 1,5 à 5 m de hauteur.
Moyenne falaise meuble	Côte caractérisée par un escarpement de dépôts meubles de 5 à 10 m de hauteur.
Haute falaise meuble	Côte caractérisée par un escarpement de dépôts meubles supérieur à 10 m de hauteur.
Rocheuse sans falaise	Côte composée d'un affleurement rocheux sans escarpement.
Basse falaise rocheuse	Côte caractérisée par un escarpement rocheux de 1,5 à 5 m de hauteur.
Moyenne falaise rocheuse	Côte caractérisée par un escarpement rocheux de 5 à 10 m de hauteur.
Haute falaise rocheuse	Côte caractérisée par un escarpement rocheux supérieur à 10 m de hauteur.

Source : Bernatchez *et al.*, 2008

À ces côtes sont associées plusieurs zones (avant-plage ou plage sous-marine, estran, haute-plage et arrière-plage) dont la composition lithologique et granulométrique peut différer d'un secteur à l'autre.

Les principaux types de côtes retrouvés sur le site d'étude sont les côtes à terrasse de plage, les falaises meubles, les falaises rocheuses et les côtes rocheuses sans falaise. Pour cette étude, les types de falaises ont été regroupés en deux classes, soit 1) falaise rocheuse et 2) falaise meuble, puisqu'il n'y avait pas la nécessité de distinguer la hauteur des falaises.

2.3.3. DIVERSITE D'ESTRAN

La rive sud du Saint-Laurent est une région très intéressante du point de vue de la diversité des estrans. La largeur de la zone intertidale varie entre 0 m et plusieurs centaines de mètres (Dionne, 2002). Aussi, leur composition peut varier à l'intérieur de 50 m de côte linéaire. Cette variation peut être expliquée par l'hétérogénéité des caractéristiques géomorphologiques locales ainsi que par l'hydrodynamique marine (courants et marées) qui affectent localement la morphologie et l'évolution de la zone intertidale.

De nombreuses formes de dépôt sédimentaire sont observables sur les estrans du site d'étude. Celles qui nous intéressent sont les formes visibles autant sur le terrain qu'à partir de photos aériennes pouvant affecter la rugosité de la surface de l'estran et, par conséquent, la dynamique des vagues. Il s'agit des dallages de blocs, des placages sédimentaires ainsi que des mégablocs glaciels. Un dallage de blocs correspond à un entassement de blocs décimétriques pouvant atteindre 50 m à 100 m de largeur (Figure 2.3a; Drapeau, 1992). Cette forme de dépôt se développe lorsque, suite au démantèlement du pied de glace de bas-estran, les radeaux de glaces transportant des blocs sont poussés vers le rivage par le

vent et sont délestés sur le bas-estran puisqu'ils ne peuvent pas atteindre le haut-estran en raison du pied de glace de haut-estran toujours en place (Drapeau, 1992). Les dallages de blocs peuvent aussi prendre la forme d'un cordon de blocs (*boulder barricade*) un peu surélevé, généralement situé dans la partie distale du bas-estran (Figure 2.3b). Quant au placage sédimentaire, il décrit en fait un remplissage de sédiments fins à grossiers dans les dépressions d'une plate-forme rocheuse, ce qui diminue la rugosité générale de l'estran (Figure 2.3c). Dans les fonds de baie et les anses, l'accumulation de sédiments fins y est plus importante, formant de larges plages, tel que dans la baie de Mitis et l'Anse aux Coques. Enfin, on retrouve des mégablocs glaciels, en moyenne de taille métrique, principalement sur les battures argileuses ou le bas-estran d'un estran rocheux.

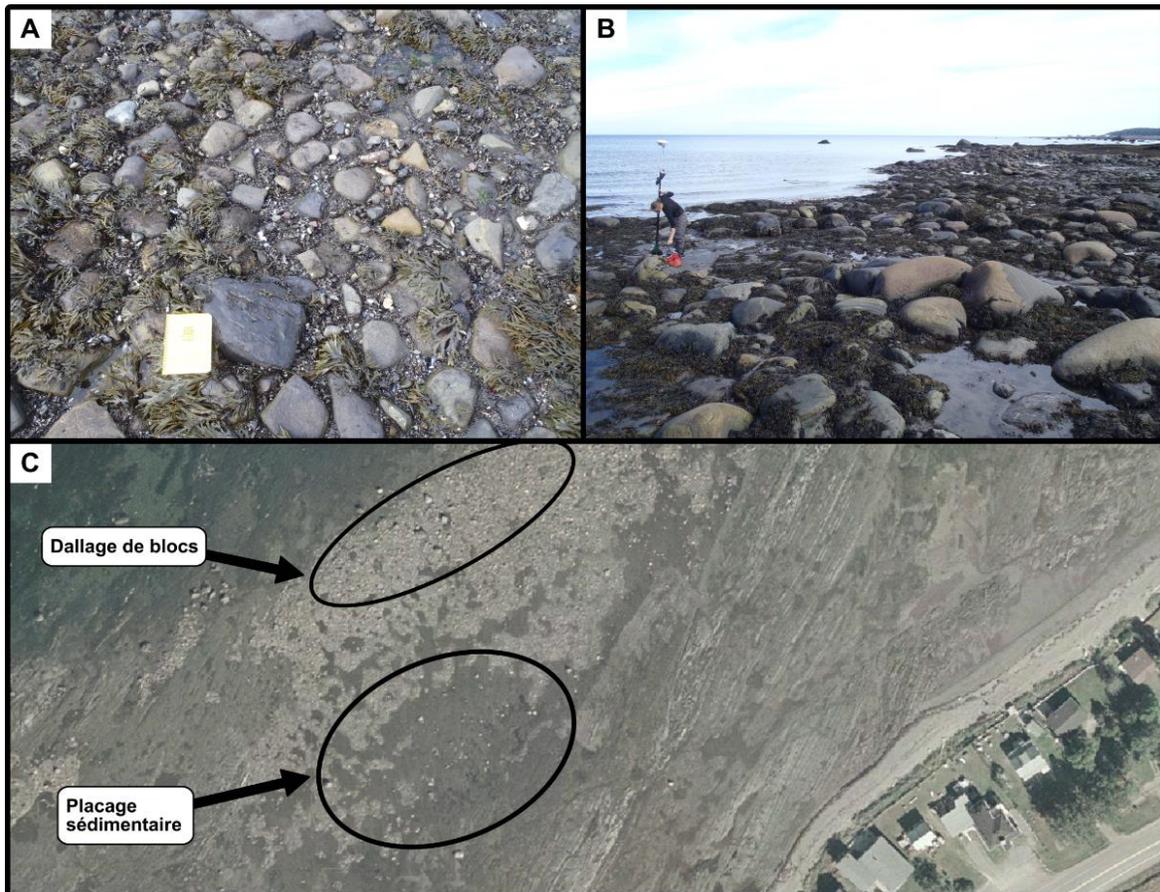


Figure 2. 3 : Illustration d'un dallage de blocs et de placages sédimentaires. A) Dallage de blocs de taille décimétrique, Sainte-Luce-sur-Mer (crédit photo : C. Pinsonnault). B) Cordon de blocs de taille décimétrique à métrique, Sainte-Flavie (crédit photo : C. Pinsonnault). C) Imagerie aérienne présentant un exemple d'un dallage de bloc et d'un placage sédimentaire (imagerie : MERN, 2009).

Étant donné la grande variété d'estrans présents sur le site d'étude, un des sous-objectifs de la présente recherche consistait à faire une caractérisation exhaustive des estrans et de développer une typologie des estrans adaptée au littoral de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Cette caractérisation est détaillée au chapitre 4 du présent mémoire.

2.3.4. DYNAMIQUE COTIERE

2.3.4.1. DYNAMIQUE HYDROSEDIMENTAIRE

La dynamique hydrosédimentaire de la région à l'étude est divisée en deux unités. L'unité la plus à l'ouest correspond à l'unité de Sainte-Luce à Sainte-Flavie, qui comprend les cellules hydrosédimentaires de l'Anse au Lard, de l'Anse aux Coques et de Sainte-Flavie. À l'est de cette unité se trouve l'unité de l'ouest de la Matanie, qui comprend les cellules de la baie de Mitis, de Casse-Pierre, de Métis-sur-Mer, de Tartigou et de Saint-Ulric – Matane-sur-Mer. La zone d'étude est caractérisée par une dérive littorale principale vers l'ouest, mais certaines variations locales existent dans l'unité de Sainte-Luce à Sainte-Flavie, surtout dans les fonds de baie (Marie *et al.*, 2014). Les cartes détaillant la dérive principale et secondaire de chacune des cellules hydrosédimentaires sont présentées à l'annexe 2. Par ailleurs, la caractérisation des estrans de chaque cellule est présentée au chapitre 4.

2.3.4.2. PROCESSUS COTIERS

Les côtes de l'estuaire du Saint-Laurent sont affectées principalement par quatre catégories de processus d'érosion : hydrodynamique, gravitaire et hydrogéologique, météorisation ainsi que glacielle (Drapeau, 1992 ; Bernatchez et Dubois, 2004). Les processus de bioérosion sont négligeables sur les côtes de la région d'étude.

PROCESSUS HYDRODYNAMIQUES

Ces processus correspondent à l'action mécanique des vagues et de la marée qui joue un rôle clé dans la dynamique sédimentaire et la morphologie de la côte (Masselink et

Short, 1993, cité dans Trenhaile, 1997; Reading, 1996). En effet, ces processus entraînent le délogement de blocs sur les plates-formes rocheuses, peuvent déclencher la chute de blocs des falaises rocheuses, érodent la ligne de rivage des côtes meubles et remobilisent les sédiments meubles sur les plages ou vers le large (Bernatchez et Dubois, 2004 ; Kanyaya et Trenhaile, 2005 ; Bernatchez et Dubois, 2008 ; Lim *et al.*, 2011).

PROCESSUS GRAVITAIRES ET HYDROGEOLOGIQUES

Il s'agit d'un ensemble de processus regroupant entre autres les effondrements, les éboulements et les glissements de terrain. Ils concernent principalement les côtes à falaises rocheuses et à falaises meubles.

PROCESSUS DE METEORISATION

Ces processus entraînent l'altération physique, chimique ou biochimique du substrat par des phénomènes tels que la cryoclastie (gel/dégel), la dessiccation (sec/humide) ou l'haloclastie (Trenhaile, 2002 ; Bernatchez et Dubois, 2004; Kanyaya et Trenhaile, 2005). Tout comme les processus hydrogéologiques et gravitaires, ils affectent davantage l'érosion des falaises rocheuses ou meubles, en plus des plates-formes rocheuses.

PROCESSUS GLACIELS

Les processus glaciels sont propres aux régions froides comme le Québec et peuvent avoir un impact important sur l'évolution de la côte. Tel qu'expliqué à la section 1.2.1.3, le pied de glace est une forme glacielle ayant un rôle dans l'érosion, le transport et la sédimentation sur la côte (Dionne, 1973).

2.3.4.3. FACTEURS INFLUENÇANT LES PROCESSUS COTIERS

De nombreux facteurs/agents d'érosion influencent l'amplitude des processus décrits précédemment. Ils sont classés en trois groupes principaux: les facteurs marins et littoraux, les facteurs subaériens et géologiques et les facteurs anthropiques. Il est à noter que les facteurs subaériens et géologiques concernent la ligne de rivage et la plate-forme rocheuse. Le tableau 2.4 présente les facteurs importants influençant les différents types de processus d'érosion sur la côte.

Tableau 2. 4 : Facteurs influençant l'impact des processus d'érosion de la ligne de rivage

PROCESSUS INFLUENCES	FACTEURS MARINS ET LITTORAUX	FACTEURS SUBAERIENS ET TERRESTRES	FACTEURS ANTHROPIQUES
HYDRODYNAMIQUES	<ul style="list-style-type: none"> • Marée • Niveau marin • Énergie des vagues • Courants • Événements de tempêtes • Glaces (pied de glace et banquise) 	<ul style="list-style-type: none"> • Structure géologique • Lithologie • Végétation 	<ul style="list-style-type: none"> • Infrastructures de protection • Infrastructures portuaires
GLACIELS	<ul style="list-style-type: none"> • Marée • Niveau marin • Énergie des vagues • Courants • Événements de tempête • Glaces (pied de glace et banquise) 	<ul style="list-style-type: none"> • Température • Précipitations • Lithologie 	<ul style="list-style-type: none"> • Infrastructures de protection • Infrastructures portuaires
METEORISATION	<ul style="list-style-type: none"> • Marée • Niveau marin • Événements de tempête 	<ul style="list-style-type: none"> • Vent • Température • Précipitations 	<ul style="list-style-type: none"> • Infrastructures de protection • Infrastructures portuaires

PROCESSUS INFLUENCES	FACTEURS MARINS ET LITTORAUX	FACTEURS SUBAERIENS ET TERRESTRES	FACTEURS ANTHROPIQUES
GRAVITAIRES ET HYDROGEOLOGIQUES		<ul style="list-style-type: none"> • Structure géologique • Lithologie 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Niveau marin • Événements de tempête 	<ul style="list-style-type: none"> • Précipitations • Structure géologique • Lithologie 	<ul style="list-style-type: none"> • Infrastructures de protection

Source : Dionne, 1973 ; Dionne, 1999; Morton, 2002 ; Boruff *et al.*, 2005 ; Kennedy et Dickson, 2006 ; Field et Mortsch, 2007; Walkden et Dickson, 2008 ; Bernatchez *et al.*, 2011; Bernatchez et Fraser, 2012

Actuellement, les facteurs marins et littoraux, décrits au tableau 2.4, sont en constante évolution en raison des changements climatiques. En effet, au Québec, on prévoit dans le futur une hausse du niveau marin, une hausse des températures moyennes, une réduction du nombre de jours avec de la glace côtière, une augmentation des précipitations et une augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes (Senneville *et al.*, 2014). Ces changements entraîneront une augmentation des risques côtiers, soit l'érosion côtière et la submersion marine. Naturellement, les côtes s'adaptent en fonction des changements environnementaux et climatiques. Toutefois, un risque côtier survient lorsque des communautés côtières (surtout celles installées tout près de la ligne de rivage) sont vulnérables aux processus d'érosion et à la submersion marine. D'ici 2060, près de 70 % de la côte sud de l'estuaire maritime (Pointe-au-Père/Sainte-Anne-des-Monts) devrait être en érosion (Marie *et al.*, 2014). Dans le cadre de la présente recherche, nous nous intéressons plus particulièrement à l'aléa érosion.

2.4.CONDITIONS METEO-MARINES

Le régime des marées de la région à l'étude est semi-diurne mésotidal à macrotidal et le niveau moyen de la mer est de 2,3 m au-dessus du zéro marégraphique, enregistré au marégraphe de Rimouski, et de 2,0 m au marégraphe de Matane (Pêches et Océans Canada, 2013). À Pointe-au-Père (secteur de Rimouski), le marnage moyen est de 3,2 m et atteint un maximum de 4,6 m, tandis qu'à Matane, le marnage moyen est de 2,8 m et atteint un maximum de 4,0 m durant la période des grandes marées (Pêches et Océans Canada, 2013).

Les vagues observées dans l'estuaire du Saint-Laurent sont produites localement par les vents, provenant principalement de l'ouest, et leur hauteur dépasse rarement les cinq mètres au large de Sainte-Anne-des-Monts (Drapeau, 1992). Le percentile 99 % des hauteurs significatives de vagues (99%- H_s) et la récurrence 50 ans des hauteurs significatives de vagues (50yr- H_s) dans l'estuaire du Saint-Laurent atteignent respectivement 1-2 m et 2,5-4 m (Ruest *et al.*, 2016). Les vents dominants à la station de Mont-Joli sont orientés vers l'ouest et le sud-ouest pour la période entre juin et février, et vers le nord-est pour la période entre mars et mai (Marie *et al.*, 2014). Sur la côte sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent, ce sont les vents provenant de l'est qui sont responsables des vagues de tempête étant donné qu'ils ont un maximum de « fetch » (Drapeau, 1992). En amont de l'estuaire, l'environnement côtier est dominé par la marée, alors qu'à l'embouchure de l'estuaire et dans le golfe, il est dominé par les vagues (Drapeau, 1992). La zone à l'étude étant située dans l'estuaire maritime, l'environnement côtier y est davantage influencé par les vagues.

2.4.1. COUVERT DE GLACE

Durant la période hivernale, l'estran est couvert par le pied de glace pour une période d'environ 3 à 5 mois allant en moyenne de la mi-décembre à la mi-avril (Dionne, 1973). Son étendue varie selon le secteur en fonction de la largeur et la pente de l'estran : un estran plus large favorise la mise en place d'un pied de glace plus stable et plus étendu (Dionne, 1973 ; Wiseman *et al.*, 1981, cité dans Hansom *et al.*, 2014). Dans la région à l'étude, la largeur du pied de glace du haut-estran varie entre 20 m et 50 m et son épaisseur varie entre 40 cm et 100 cm, alors que le pied de glace du bas-estran peut s'étendre de 100 m à plus de 1 km et avoir une épaisseur entre 100 cm et 150 cm (Dionne, 1973). Toutefois, dans le contexte actuel de changements climatiques, un réchauffement des températures moyennes entraîne une diminution de la couverture de glace dans la région, ce qui réduit le rôle de protection de la côte par le pied de glace contre les tempêtes hivernales (Bernatchez *et al.*, 2008 ; Senneville *et al.*, 2014).

2.4.2. ÉVÈNEMENT DE TEMPÊTE EXTREME EN 2010

La côte sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent a été marquée par un événement de tempête extrême le 6 décembre 2010 qui a engendré des dégâts matériels considérables et occasionné un important recul de la ligne de rivage (Didier, 2014). Les taux de recul moyens enregistrés pour la MRC de la Mitis et de Matane sont de 4,65 m et de 3,01 m respectivement, mais certaines municipalités ont atteint des reculs extrêmes allant jusqu'à 15 m à Métis-sur-Mer et 13 m à Sainte-Luce en un seul événement (Quintin *et al.*, 2013). De plus, plusieurs secteurs, notamment à Rimouski et Sainte-Luce, ont subi une submersion marine importante. À Rimouski, une surcote maximale de 1,05 m a été observée et le niveau d'eau maximal a atteint 5,47 m (à 14h), soit un niveau beaucoup plus élevé que les

niveaux d'eau prédits et largement au-dessus du niveau de pleine mer supérieure de marée moyenne (3,9 m) (Bernatchez *et al.*, 2012 ; Quintin *et al.*, 2013).

Les niveaux d'eau extrêmes mesurés lors de cet événement sont le résultat d'une conjoncture de conditions météo-marines favorables à une hausse des niveaux d'eau. Ces conditions déterminantes correspondent au jumelage de fortes rafales de vents provenant surtout de l'est, qui ont atteint près de 70 km/h au plus fort de la tempête, de l'arrivée d'un système dépressionnaire, d'une marée de vives eaux en plus d'une absence de pied de glace (Quintin *et al.*, 2013 ; Didier, 2014). Étant donné le niveau d'eau anormalement haut et la sévérité de cette tempête, il est plus que probable que la géomorphologie des estrans n'ait pas eu la même influence sur la dynamique des vagues qu'en période normale. C'est pourquoi ce facteur sera pris en compte lors de l'interprétation des résultats.

CHAPITRE 3

METHODOLOGIE

3.1.TYPOLOGIE DES ESTRANS

Au meilleur de notre connaissance, il n'existe à ce jour aucun consensus pour une typologie universelle des estrans, notamment en raison de la variété d'environnement côtiers, des spécificités locales et des multiples méthodes de classification existantes. En effet, les critères utilisés pour définir la typologie des estrans varient selon les pays, le domaine d'étude et les caractéristiques spécifiques régionales. Parmi les multiples caractéristiques biologiques (type d'habitat, densité de végétation), géologiques (lithologie) et géomorphologiques (type de genèse de l'estran, processus côtiers, granulométrie) utilisées pour catégoriser les estrans, les principales caractéristiques qui reviennent le plus souvent dans les classifications des estrans sont : la granulométrie, la lithologie et les processus côtiers présents (Sunamura, 1992 ; Masselink et Short, 1993 ; Reading, 1996 ; Trenhaile, 1997 ; Woodroffe, 2003 ; Bird, 2008). De plus, il n'y a pas de classification qui s'applique aux estrans composites en milieu estuarien. Une nouvelle classification tenant compte des spécificités régionales de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent était donc de mise pour faciliter la caractérisation et la segmentation des estrans.

L'élaboration d'une nouvelle typologie des estrans adaptée à la région d'étude a d'abord nécessité l'exploration de la littérature sur le sujet (présentée au chapitre 1) pour identifier les classifications existantes et les critères utilisés sur lesquels se baser. Ensuite, une familiarisation avec l'ensemble du terrain s'est faite via des campagnes de terrain et l'utilisation d'imagerie aérienne et de photos héliportées de la côte. Une bonne connaissance des estrans du terrain à l'étude est essentielle pour déterminer les paramètres clés qui distinguent les types d'estran rencontrés.

3.1.1. FAMILIARISATION AVEC LE TERRAIN

3.1.1.1. IMAGERIE AERIENNE

Étant donné l'étendue du site d'étude, il était nécessaire d'utiliser des imageries aériennes (orthophotographies de 2009 et 2012, résolution : 1 pixel = 0,21 m) ainsi que de photographies hélicoptées pour avoir une vue aérienne détaillée du terrain sous différents angles. Les orthophotographies, qui proviennent du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (MRNF), sont fournies par le Laboratoire de recherche en dynamique et gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC), tandis que les photos hélicoptées ont été réalisées en septembre 2010 par le LDGIZC. Afin d'avoir une vue d'ensemble des côtes méridionales de l'estuaire maritime du Saint-Laurent, les observations couvrent les côtes depuis le marais de Rimouski jusqu'à la limite est de la municipalité de Sainte-Anne-des-Monts.

Ces images ont permis un premier survol du terrain afin de repérer les différents types d'estran présents et d'observer la géomorphologie générale de la côte à l'étude. Les principaux critères de distinction des estrans appropriés pour la côte à l'étude qui ont été ciblés lors du survol sont : la proportion de couverture par un affleurement rocheux, par un dallage ou placage sédimentaire, la couverture de végétation sur l'estran, la présence/absence d'écueil rocheux sur le haut-estran et sur le bas-estran jusqu'en avant-côte, ainsi que la composition granulométrique sur le haut et le bas-estran.

3.1.1.2. CAMPAGNE DE TERRAIN

Suite au survol, huit secteurs ont été sélectionnés pour une caractérisation préliminaire sur le terrain dans les municipalités suivantes :

- Pointe-au-Père
- Sainte-Luce
- Sainte-Flavie
- Métis-sur-Mer
- Baie-des-Sables
- Matane
- Grosses Roches
- Les Méchins

Ces sites ont été choisis dans plusieurs municipalités afin d'assurer une bonne représentation de l'ensemble du site à l'étude. L'objectif de ces campagnes vise à 1) faire des relevés topographiques au DGPS pour localiser la limite inférieure du bas-estran (détaillé à la section 3.2.1.3) et à 2) valider sur le terrain : la granulométrie, l'état de la plate-forme rocheuse, la composition générale, les formes de dallages de blocs et de cordons de blocs, la végétation aquatique sur l'estran et autres caractéristiques spécifiques (p. ex. : présence d'écueils). Ces sites vont au-delà des limites du site d'étude parce qu'à l'origine, ce dernier s'étendait jusqu'à Sainte-Anne-des-Monts. Les résultats de terrain aux sites de Grosses Roches et de Les Méchins ont tout de même été très utiles pour la validation de la limite du bas-estran tracé par photo-interprétation, qui a d'ailleurs été tracé jusqu'à Grosses Roches (section 3.2.1). La carte de localisation des sites de validation sur le terrain est présentée à l'annexe 3.1.

3.1.2. CRITERES ET PARAMETRES RETENUS

Suite à la revue littéraire sur le sujet et à la caractérisation préliminaire du site d'étude, trois critères de caractérisation ont été sélectionnés pour établir la typologie :

1. La composition de l'estran : qu'est-ce qui compose le haut-estran et le bas estran ? ; quelle est la proportion de sédiments meubles par rapport aux affleurements rocheux ? ; y a-t-il un cordon littoral sur le haut estran ? ; y a-t-il des écueils rocheux sur le haut-estran ou en avant-côte ?
2. La granulométrie : granulométrie dominante sur le haut-estran ; granulométrie dominante sur le bas estran ; densité de dallage de blocs, cordons de blocs (« boulder barricades ») et placage sédimentaire.
3. La végétation aquatique : abondance ; répartition sur l'estran.

Pour l'application de la typologie d'estran sur le site d'étude, les limites des transitions entre les types d'estrans ont été déterminées par photo-interprétation. Après l'avoir testé plusieurs échelle spatiale, l'application de la typologie est optimale lorsqu'un nouveau segment est créé lors d'un changement important après un minimum de 20 m linéaires de côte.

3.1.3. LIMITES ET CONDITIONS

La littérature étant très limitée sur le sujet, la typologie d'estran présentée dans le cadre de cette recherche est expérimentale et sujette à amélioration. La condition d'utilisation optimale de cette typologie est à l'intérieur du secteur de Pointe-au-Père à Matane-sur-Mer. Étant donné que cette typologie a été développée avant l'analyse des taux

de déplacement de la côte, et donc, avant la coupure de l'étendue initiale du site d'étude, elle est tout de même applicable au secteur allant de Rimouski jusqu'à Sainte-Anne-des-Monts. Au-delà de ce secteur, des ajustements pourraient être nécessaires pour mieux représenter la zone d'étude

La granulométrie moyenne est estimée à partir de photo-interprétation, et validée à partir de mesures prises sur le terrain et d'informations tirées de la caractérisation côtière faite par le LDGIZC entre 2009-2010.

3.2.CARTOGRAPHIE DE LA ZONE COTIERE

3.2.1. DELIMITATION DE L'ESTRAN

Une fois les segments de côtes identifiés, il est nécessaire de délimiter la zone intertidale à l'étude. Il est question ici de définir les différentes limites présentes, depuis la côte vers le large.

3.2.1.1. LIGNE DE RIVAGE

Dans le cadre de cette étude, la limite supérieure de l'estran utilisée pour le calcul des caractéristiques morphométriques correspond à la ligne de rivage (Figure 1.1 au chapitre 1). Elle a été tracée par photo-interprétation à partir des orthophotographies aériennes du 17 septembre 2009 (source : MRN) en reprenant partiellement la ligne de référence tracée pour l'étude de l'évolution côtière du secteur par le LDGIZC (Marie *et al.*, 2014). En présence

d'une microfalaise, le tracé passe à sa base pour éviter de fausser le résultat du calcul de la pente et de la rugosité de l'estran.

3.2.1.2. LIGNE DE FLEXURE

Dans le secteur Baie-des-Sables – Matane, il a été possible d'obtenir le tracé précis de la ligne de flexure, travail effectué par Evelyne Arsenault (Arsenault, 2016), étudiante du LDGIZC. Cette limite a permis de calculer facilement la pente et la largeur du haut-estran ainsi que celles du bas estran.

3.2.1.3. LIMITE INFÉRIEURE DU BAS-ESTRAN

La limite inférieure du bas-estran (marée basse de vives eaux, soit le zéro marégraphique) est pratiquement impossible à tracer de manière exacte et précise puisqu'elle est submergée la majorité du temps sur les orthophotographies. Il est donc impossible d'utiliser la méthode de télédétection par laser LiDAR (Light Detection And Ranging) puisque le faisceau de lumière (laser) émis par le scanner est réfléchi par l'eau et, par conséquent, ne fournit pas d'information sur la profondeur d'eau. Finalement, il n'y a pas assez de tirant d'eau pour utiliser un sonar de manière conventionnelle à bord d'un bateau. Techniquement, il est possible d'identifier cette limite au DGPS, mais le terrain d'étude est beaucoup trop grand pour le lever au DGPS dans son entièreté.

Par conséquent, deux limites complémentaires ont été tracées. Les résultats obtenus avec les régressions linéaires (section 3.5.3) pour ces deux limites ont été comparés afin de vérifier si les résultats sont similaires. La première méthode consiste à définir la limite submergée-émergée de l'estran lors du levé aéroporté des données LiDAR de 2009 à marée basse. Cette limite servira également à l'extraction des données d'élévation sur le profil

d'estran émergé, nécessaires au calcul des caractéristiques morphométriques de l'estran et qui sera détaillée dans la section 3.3.3. Il est important de noter qu'il peut y avoir une importante différence (de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres en terme de largeur) entre la limite submergée-émergée relevé au LiDAR et le zéro marégraphique réel (0,00 m), qui n'est atteint généralement qu'une fois par marée basse de vives eaux à un moment très précis si on se fie sur les données marégraphiques enregistrées par Environnement Canada. Ce qui implique que, le temps de relever les données LiDAR sur l'ensemble du terrain d'étude, le niveau de la marée peut avoir varié un peu. Logiquement, la différence de largeur est la plus grande sur les estrans large à faible pente, là où une variation de seulement 0,10 m de profondeur peut engendrer une différence notable. C'est pourquoi une deuxième limite complémentaire est nécessaire pour avoir une bonne représentation de la limite distale du bas-estran.

La deuxième méthode est expérimentale. Elle consiste à utiliser l'abondance et la répartition des algues présentes sur le bas-estran et en avant-côte en tant que proxy afin d'estimer le zéro marégraphique, concordant avec la limite extrême inférieure du bas-estran. L'idée générale de la méthode procède comme suit : 1) localiser le zéro marégraphique par DGPS sur le terrain dans quelques sites puis, 2) observer les patrons d'algues autour du zéro marégraphique mesuré afin de développer un proxy permettant d'extrapoler le résultat par photo-interprétation.

Les deux familles les plus communes sur le terrain sont les laminaires et les fucus. Les laminaires se retrouvent entre la partie inférieure du bas-estran, près de sa limite distale, et descend jusqu'à quelques mètres de profondeur, où son extension est limitée par la diminution de la lumière et le broutage intensif par l'oursin vert (Chabot et Rossignol, 2003). Les algues de type « fucus » présentes dans l'estuaire du Saint-Laurent, où l'espèce dominante est le fucus denté, se retrouvent généralement dans la zone intermédiaire et inférieure des estrans rocheux exposés aux vagues (Chabot et Rossignol, 2003).

Considérant ces informations, nous pouvons alors estimer que la ligne du zéro marégraphique se situe un peu plus loin (vers le large) ou sur la limite inférieure de l'habitat des fucus, et un peu plus loin (vers le large) ou sur la limite supérieure de l'habitat des laminaires. Pour confirmer cette estimation, des levés au DGPS allant au-delà du zéro marégraphique étaient nécessaires.

Deux campagnes de terrain ont été effectuées lors des marées basses de vives eaux sur huit sites localisés à des points clés le long du site d'étude pour déterminer les critères à utiliser. Les caractéristiques générales de ces sites sont décrites à l'annexe 3.2. Ces sites ont été choisis pour représenter tous les milieux côtiers principaux retrouvés dans la région d'étude. Durant ces campagnes, un GPS différentiel (DGPS) de Trimble a été utilisé pour enregistrer l'altitude à chaque mètre parcouru le long des transects sur le bas-estran avec une précision au centimètre près. Les estrans ont également été caractérisés, ce qui a constitué une des bases de données utilisées pour l'élaboration de la nouvelle typologie d'estran détaillée dans la section 4.1.

Une fois les données du DGPS importées dans le système d'information géographique ArcGIS, logiciel produit par « Environmental System Research Institute » (ESRI), il a été possible de déterminer l'endroit où le zéro marégraphique théorique se trouve pour chaque transect. Pour ce faire, les profils doivent atteindre la limite moyenne de la marée basse de vives eaux, enregistrée par Pêches et Océans Canada. L'amplitude des marées varie légèrement entre Rimouski et Matane ; le niveau moyen marin à la station de Rimouski est à 2,30 m d'altitude du zéro marégraphique, tandis que la station de Matane est à 2,00 m du zéro marégraphique (Pêches et Océans Canada, 2013). Cela veut dire que, par rapport au zéro topographique, les transects effectués au DGPS doivent aller au moins jusqu'à -2,30 m entre Rimouski et Grand-Métis, -2,15 m autour de Grand-Métis et Métis-sur-Mer, et -2,00 m entre Métis-sur-Mer et Matane. Les résultats obtenus ont permis

d'apporter quelques précisions à l'estimation faite à partir des limites d'habitat des algues dominantes (Tableau 3.1).

L'étape suivante consistait à utiliser les algues comme proxy en tant que méthode expérimentale pour estimer la position de la limite inférieure du bas-estran en fonction de la limite relevée au DGPS sur les sites de validation sur le terrain. Selon le type d'algue présent et leur répartition dans la zone inférieure du bas-estran, sept critères ont été identifiés pour estimer cette limite sur le reste du terrain d'étude (Tableau 3.1). Il a également été pertinent d'inclure des critères liés à la topographie de la plate-forme (lorsque présente) et la couleur de l'eau pour pallier aux endroits où les algues sont absentes ou discontinues et éparses.

Tableau 3. 1 : Critères de détermination de la limite inférieure du bas-estran

Composition du bas-estran	Indice	Position de la limite
Sans plate-forme rocheuse	Algues clairsemées	2 à 4 m après la limite distale des algues
	Bande mince d'algues < 25-30 m	Suivre la limite distale des algues
	Bande épaisse d'algues > 30 m	Si végétation dense et foncée, presque noire : algues = laminaires. → utiliser le centre de la bande Si végétation plus claire : algues = fucus. → utiliser la limite distale
Avec plate-forme rocheuse	Écueils importants à intervalles réguliers sur la plate-forme	Suivre la limite distale du premier écueil (correspondant à une rupture de pente abrupte) au-delà de laquelle il y a généralement un escarpement important (banc rocheux suivant l'orientation des couches sédimentaires)
	Topographie de la plate-forme et couleur de l'eau (plate-forme bien visible et continue)	Suivre la topographie de la plate-forme : limite distale (dans le cas où la plate-forme est recouverte de sédiments meubles dans la zone subtidale) ou là où la couleur d'eau indique une brusque rupture de pente de la plate-forme
Bas-estran composite	Topographie de la plate-forme et densité d'algues	Suivre la limite distale de la plate-forme et/ou passer au centre de la bande d'algues

3.2.2. SEGMENTATION DE LA CÔTE A L'ETUDE

La zone côtière à l'étude correspond à toute la côte non artificielle entre le quai de Pointe-au-Père et Matane, soit 83,8 km de côte linéaire. Il est important d'avoir un long site d'étude initial pour avoir une plus grande diversité dans la composition et la morphologie de l'estran et pour assurer une bonne représentation de chaque type d'estran présent sur le site.

Nous avons effectué la segmentation de la côte, tout comme la délimitation de l'estran, à partir des orthophotographies de 2009 et de la ligne de rivage de 2009 tracée par le LDGIZC. Les segments doivent avoir une longueur minimale de 20 m. Les limites des segments sont définies par un changement de la typologie des estrans développée dans le cadre de cette recherche, par un changement de la typologie des côtes détaillée dans la section 2.1.4.1, ou par un changement significatif dans la composition de l'estran (densité de dallage et/ou de placage, densité d'algues, proportion plate-forme/remplissage sédimentaire), identifiés par photo-interprétation. Il est à noter que la segmentation de la côte en fonction du type de côte avait déjà été réalisé par le LDGIZC.

Afin d'éviter tout biais potentiel lors de la caractérisation des estrans et du calcul des taux de déplacement, une partie de la côte doit être exclue de l'étude. D'abord, il a fallu exclure les secteurs dont la vue aérienne de la ligne de rivage est obstruée par des arbres, ce qui concerne presque exclusivement les côtes à falaise rocheuse et meuble. Ensuite, les plages en fond de baie ont été exclues en raison des sources potentielles d'erreur de caractérisation et de photo-interprétation qu'elles peuvent engendrer parce que le tracé des profils et des limites de bas-estran, qui constituent les bases du calcul des caractéristiques morphométriques de l'estran (section 3.3.3), y est trop subjectif et imprécis. En effet, la courbure de la côte rend très difficile le traçage des transects perpendiculairement à la ligne de rivage et la limite inférieure de l'estran est d'ailleurs très complexe à valider.

De plus, les côtes artificialisées, c'est-à-dire les côtes comportant des infrastructures de protection ou des infrastructures portuaires, sont également exclues du site d'étude, et ce, pour deux raisons. D'abord, les infrastructures de protection empêchent généralement le recul de la côte à l'endroit où elles ont été installées et modifient considérablement la dynamique côtière. Puisque nous voulons identifier des composantes de l'estran influençant l'aléa érosion, il est primordial d'éliminer tout biais potentiel quant à la modification artificielle de la côte. Ensuite, toutes les infrastructures dans cette région n'ont pas été installées au même moment, ce qui peut fausser les résultats du calcul du rythme de recul puisqu'elles affectent le système côtier dès leur installation. Par conséquent, tous les segments de côte qui ont été artificialisés avant 2012 ont été exclus.

Étant donné que ces infrastructures influencent la dynamique sédimentaire et l'hydrodynamique des vagues au-delà des extrémités des constructions (Baillargeon et Crousset, 2006 ; Bernatchez et Fraser, 2012), il est nécessaire d'établir un périmètre d'exclusion (zone tampon) autour de ces structures pour délimiter les segments de côte n'étant pas affectés de manière notable. Pour ce faire, l'étendue de l'effet de bout a été estimée par photo-interprétation selon le recul mesuré près de l'extrémité d'une vingtaine d'infrastructures de protection de type muret ou enrochement retrouvées sur le site d'étude. La zone affectée, qui s'élève à un maximum moyen de 20 m de côte linéaire, est considérée comme le périmètre d'exclusion pour ce type d'infrastructure. Pour ce qui est des infrastructures perpendiculaires à la côte, comme les épis ou les quais, une zone d'exclusion correspondant à 1,5 fois la longueur de l'infrastructure a été appliquée.

Au final, après avoir exclu les secteurs en fond de baie et les côtes artificielles en plus de la zone tampon autour de ces dernières, 552 segments de côte naturelle sur les 805 segments initiaux créés ont été retenus pour la présente étude, totalisant 36,6 km de côte linéaire discontinue entre Pointe-au-Père et Matane.

3.3.CARACTERISATION DES ESTRANS

À partir de la segmentation de la zone côtière, une caractérisation détaillée a pu être produite par photo-interprétation avec à l'appui les observations faites lors de la caractérisation préliminaire sur le terrain ainsi que des notes de description détaillée de la côte prises sur le terrain en 2009-2010 par les chercheurs du LDGIZC. La caractérisation des estrans s'est faite en trois temps.

La première étape consiste à compiler et à intégrer dans la table d'attributs des segments de côtes (produits lors de l'étape 3.2.2) les données préexistantes pertinentes provenant des bases de données de Pêches et Océans Canada, du ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec ainsi que du LDGIZC. Ces données concernent l'hydrodynamique régionale, la géologie régionale et la géomorphologie générale de la côte (Tableau 3.2).

Deuxièmement, une photo-interprétation des orthophotographies aériennes de 2009 a été effectuée pour segmenter la côte à l'étude ainsi que pour acquérir les caractéristiques descriptives, telles que : la composition de l'estran, l'abondance en végétation et l'étendue de la plate-forme rocheuse lorsqu'elle est présente.

Troisièmement, les caractéristiques morphométriques de l'estran, l'orientation de la côte (correspondant à la direction faisant face à la mer) et l'orientation des strates de la plate-forme (correspondant à l'azimut du pendage des couches, où l'ouest = N270, le nord = N0 et l'est = N90) ont été mesurées ou calculées à l'aide du logiciel ArcGIS et des logiciels de programmation Matlab et R Studio.

Après ces trois étapes, toutes les informations acquises sur les segments de côte et les profils d'estran ont été rassemblées dans un seul fichier « shapefile » de points via le logiciel ArcGIS afin d'en faciliter l'analyse.

3.3.1. DONNEES ACQUISES VIA LES BASES DE DONNEES EXISTANTES

Le tableau 3.2 présente les informations acquises, puis intégrées à la caractérisation de chaque segment.

Tableau 3. 2 : Caractéristiques qualitatives recueillies.

DONNÉE	ÉCHELLE	SOURCE
Marnage	Régionale	Pêches et Océans Canada, 2013
Niveau moyen de la mer (NMM)	Régionale	Pêches et Océans Canada, 2013
Géologie générale	Régionale	MERN, 2015
Géologie détaillée	Régionale à sectorielle	MERN, 2015
Cellule hydrosédimentaire	Sectorielle	LDGIZC
Dérive littorale	Sectorielle	LDGIZC
Type de côte	Locale	LDGIZC
Largeur moyenne du haut de plage	Locale	LDGIZC
Granulométrie moyenne	Locale	LDGIZC
Infrastructure de protection présente (TDC artificialisé)	Locale	LDGIZC

3.3.2. DONNEES ACQUISES PAR PHOTO-INTERPRETATION

La caractérisation par photo-interprétation, effectuée avec le logiciel ArcGIS, est basée sur les orthophotographies aériennes du 17 septembre 2009 fournies par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. La caractérisation couvre plusieurs

caractéristiques de l'estran regroupées en deux catégories : 1) localisation et environnement, 2) composition et morphologie.

La catégorie localisation et environnement comprend :

- | | |
|--|---|
| 1. Coordonnées (lat., long.) | 4. Degré d'exposition de la côte aux vagues |
| 2. Identifiant (ID) du segment de côte linéaire associé au point | 5. Situé en fond de baie : oui ou non |
| 3. Longueur du segment de côte (m) | 6. Degré d'anthropisation |

Le degré d'exposition de la côte face aux vagues comprend quatre (4) classes : 1) très exposée (côte rectiligne faisant face au fleuve), 2) exposée (côte relativement rectiligne comprenant quelques segments légèrement convexes ou concaves), 3) semi-protégée (segment quasi perpendiculaire à l'orientation principale de la côte), et 4) protégée (dans un segment faisant dos au fleuve comme sur la Pointe Leggatt).

Le « degré d'anthropisation » de la ligne de rivage consiste à catégoriser les segments de côte en trois groupes : les segments anthropisés, les segments semi-anthropisés et les segments naturels (Tableau 3.3). Cette segmentation a pour but de réduire le biais potentiel lié à une influence des infrastructures plus importante qu'estimée (effet de bout plus étendu). Ces périmètres tampons sont juxtaposés au périmètre d'exclusion de part et d'autre de l'infrastructure anthropique. Une analyse par photo-interprétation couplée avec le taux d'érosion local a été effectuée pour déterminer l'étendue de la taille du périmètre d'exclusion et des segments de chaque degré d'anthropisation à appliquer pour les infrastructures de protections et les infrastructures portuaires. Trois exemples d'application de cette segmentation sont présentés à l'annexe IV.

Tableau 3. 3 : Description des segments classés selon leur degré d'anthropisation

SEGMENTS	DESCRIPTION	DÉLIMITATION DU SEGMENT	PARTICULARITÉ
Anthropisée (en rouge)	Sur un segment de 1 km, on retrouve plus de 50 % de côte artificialisée.	50 m depuis les extrémités du périmètre d'exclusion pour les segments Couvre tout le secteur si les segments artificialisés alternent régulièrement et sur plus de 1 km avec des segments non artificialisés de moins de 200 m.	S'il y a un segment non artificiel > 200 m, appliquer le 2 ^e degré d'anthropisation (i.e. semi-anthropisé) au centre du segment
Semi-anthropisée (en jaune)	Sur un segment de 1 km, on retrouve moins de 50 % de côte artificialisée.	Segment de 50 m depuis les extrémités du périmètre d'exclusion, incluant tous les petits segments non artificiels alternants avec les segments artificiels	Si un segment non artificiel est > 200 m, la partie entre les segments semi-anthropisés est considérée comme un segment naturel
	En périphérie d'un segment anthropisé	Segment anthropisé > 50 m	Si un segment non artificiel est > 200 m, la partie entre les segments semi-anthropisés est considérée comme un segment naturel
Naturelle (en vert)	Sur un segment de 1 km, il n'y a aucune artificialisation de la côte	Tout ce qui est exclu des deux autres segments (anthropisés et semi-anthropisés)	

La catégorie « composition de la côte » comprend des données qualitatives nominales et ordinales qui décrivent l'estran pour chaque segment créé par la segmentation côtière. Les données qualitatives nominales comprennent :

1. Type de côte
2. Type d'estran
3. Combinaison (couplage du type de côte et du type d'estran)
4. Géologie générale
5. Formation géologique
6. Présence d'un exutoire : oui ou non
7. Présence d'un écueil en avant-côte (AC) : oui ou non
8. Présence d'un écueil en haut-estran (HE) : oui ou non

Notons que les écueils de bas-estran ne sont pas identifiés par photo-interprétation puisqu'ils ont été pris en compte dans le calcul de la rugosité de l'estran. Les données de chaque caractéristique qualitative ordinale sont regroupées en classes pour faciliter et optimiser la photo-interprétation (Tableau 3.4).

Tableau 3. 4 : Description des classes pour les caractéristiques qualitatives ordinales.

Densité dallage de blocs glaciels (D_d)	Densité placage sédimentaire (D_p)	Superficie couverte par la plate-forme rocheuse (A_{pfr})	Répartition et densité des algues (D_a)
0 : Nulle	0 : Nulle	0 : Nulle	0 : Nulle
1 : Faible (< 15 %)	1 : Faible (< 15 %)	1 : Faible (< 25 %)	1 : Clairsemée, faible (largeur < 50 m)
2 : Moyenne (entre 15 % et 30 %)	2 : Moyenne (entre 15 % et 30 %)	2 : Moyenne (25 % à 50 %)	2 : Continue, faible (largeur < 30 m)
3 : Élevée (> 30 %)	3 : Élevée (> 30 %)	3 : Élevée (50 % à 75 %)	3 : Clairsemée, moyenne (largeur entre 50 m et 100 m)
		4 : Très élevée (> 75 %)	4 : Continue, moyenne (largeur entre 30 m et 100 m)
			5 : Clairsemée, élevée (largeur > 100 m)
			6 : Continue, élevée (largeur > 100 m)

3.3.3. DONNEES ACQUISES PAR MESURES ET CALCULS

Pour compléter le volet géomorphologie de la caractérisation des estrans, des caractéristiques morphométriques ont été calculées à partir des profils d'estran. De plus, le logiciel ArcGIS a permis de mesurer l'orientation de la côte ainsi que l'orientation des strates de la plate-forme rocheuse là où elles affleurent.

3.3.3.1. DONNEES MORPHOMETRIQUES

D'abord, des transects perpendiculaires à la côte ont été tracés au sein du logiciel ArcGIS avec l'extension DSAS (« Digital Shoreline Analysis System ») développé par le U.S. Geological Survey (Thieler *et al.*, 2009), de manière à représenter tous les segments avec un minimum de trois (3) transects par segments de moins de 60 m de côte linéaire, ou un (1) transect à tous les 20 m pour les segments de plus de 60 m de côte linéaire.

Ces transects ont été transformés en séries de points afin d'extraire les valeurs d'élévation de l'estran à tous les un (1) mètre. Les valeurs d'élévation proviennent d'un raster de la surface d'altitude (« gridelevation ») produit avec les données LiDAR brutes de 2009 prises à marée basse, dont la précision est de 0,20 m en « z » et la résolution est de 1 m en « x » et en « y », fournies par le LDGIZC. Compte tenu que le LiDAR ne traverse pas l'eau, les données d'élévation valides pour l'estran se limitent à la zone émergée. Les transects ont donc été coupés afin de pouvoir extraire les données d'altitude du profil d'estran jusqu'à cette limite.

Les caractéristiques morphométriques du profil des estrans ont été obtenues à l'aide des logiciels de programmation mathématique Matlab et R. Ces caractéristiques comprennent la pente moyenne de l'estran (S_{moy}), l'altitude de la ligne de rivage (H_{LR}), la largeur émergée de l'estran (L_{em}) ainsi que la variation topographique de l'estran (rugosité) sous la forme de quatre indices de rugosité : la sinuosité du profil (R_{sin}), l'écart-type des données d'altitude du profil (R_{std}), la variance des données d'altitude du profil (R_{var}) et la moyenne quadratique de la variation de l'altitude le long du profil (R_{rms}). Le script utilisé a été produit par Adrien Lambert, post doctorant au LDGIZC. Pour ce qui est de la largeur de l'estran, la largeur émergée (L_{em}) correspond à la distance entre la ligne de rivage et la limite inférieure tracée en suivant la limite émergée-submergée des données LiDAR, alors que la largeur totale (L_{tot}) correspond à la distance totale entre la ligne de rivage et la limite

inférieure du bas-estran photo-interprétée correspondant au zéro marégraphique. Toutes deux sont mesurées dans ArcGIS. Dans le cas des sites spécifiques, des informations supplémentaires ont été calculées : l'altitude de la ligne de flexure (H_{flex}), la pente du haut et du bas-estran (S_{HE} et S_{BE}), ainsi que la largeur du haut et du bas-estran (L_{HE} et L_{BE}). Au tableau 3.5 sont présentées les équations utilisées pour calculer les pentes et les indices de rugosité.

Tableau 3. 5 : Équations utilisées pour le calcul des pentes et des indices de rugosité.

Variables	Équations
Pente moyenne de l'estran	$S_{moy} = \arctan\left(\frac{Alt_{LR} - Alt_{BE}}{L_{em}}\right)$
Pente du haut estran	$S_{HE} = \arctan\left(\frac{Alt_{LR} - Alt_{Flex}}{L_{HE}}\right)$
Pente du bas estran	$S_{BE} = \arctan\left(\frac{Alt_{Flex} - Alt_{BE}}{L_{BE}}\right)$
Indice de rugosité « sinuosité »	$R_{sin} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i+1} - x_i)}{x_{BE} - x_{LR}}$
Indice de rugosité « variance »	$R_{var} = \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [h_i - \bar{h}]^2}{n - 1}$
Indice de rugosité « écart-type »	$R_{std} = \sqrt{\sigma^2}$
Indice de rugosité « moyenne quadratique »	$R_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n h_i^2}{n}}$

Enfin, les statistiques descriptives ont été calculées pour chaque variable de chacun des regroupements de données (détaillés à la section 3.5.1). Celles-ci offrent une vue d'ensemble des données et des groupes de données, aidant ainsi à structurer les étapes pour les analyses statistiques à venir. Ces statistiques descriptives comprennent le calcul de la valeur minimale et maximale, la moyenne et l'écart-type de chaque variable pour chacun des groupes de données.

3.3.3.2. DONNEES D'ORIENTATION

L'orientation de la côte ($Orient_{cote}$) a été mesurée avec l'outil « Easy Calculate » dans ArcGIS pour chaque transect créé précédemment. Cette orientation correspond à la direction perpendiculaire au tracé de la côte (p. ex. une côte au tracé méridien nord-sud est orientée vers l'est ou l'ouest). Pour ce qui est de l'orientation des strates de la plate-forme rocheuse ($Orient_{pfr}$), des transects ont d'abord été tracés manuellement par photo-interprétation de manière à être perpendiculaires aux strates de la plate-forme. L'orientation de ces transects a ensuite pu être mesurée, indiquant ainsi la direction des strates dans le roc, mais pas leur sens ni leur pendage. Finalement, la différence d'orientation entre la côte et les strates de la plate-forme rocheuse a été calculée pour déterminer si ces deux composantes sont perpendiculaires, parallèles ou obliques.

3.3.4. LIMITES ET CONDITIONS

Le site d'étude est trop grand pour effectuer une caractérisation détaillée de l'estran sur le terrain. Par conséquent, cette caractérisation a été produite par photo-interprétation, pour obtenir une vue d'ensemble des estrans, et validée à l'aide des données terrain des neuf sites (décrits à l'annexe 3.2). Aussi, la granulométrie dominante sur l'estran a dû être

estimée par photo-interprétation avec à l'appui les notes de terrain des chercheurs du LDGIZC sur le haut de plage en plus des données de terrain recueillies dans la présente étude. Par ailleurs, il n'a pas été possible de mesurer le pendage des strates des plates-formes rocheuses en raison de sa grande variabilité et de l'étendue importante du site d'étude.

La délimitation des segments de côte est parfois difficile à établir étant donné la variabilité de la composition de l'estran et les transitions parfois progressives d'un type d'estran à l'autre.

La précision des données d'altitude relevées au DGPS est 0,01 m et celle des LiDAR de 2009, utilisées pour la segmentation et la caractérisation des estrans, est de 0,20 m pour la résolution des images et de potentiellement 1 m pour le géoréférencement (Marie *et al.*, 2014).

3.4.CALCUL DES TAUX DE DEPLACEMENT DE LA COTE

3.4.1. DONNEES

Les taux de déplacement historiques ont été calculés à partir du trait de côte ou de la ligne de rivage, tracé par photo-interprétation (Marie *et al.*, 2014). Ces traits de côte ont été préalablement numérisés par les professionnels du laboratoire de recherche LDGIZG en suivant la méthode décrite dans Boucher-Brossard (2012).

La limite utilisée pour mesurer l'évolution historique de la côte correspond 1) à la ligne de rivage dans le cas d'une côte à terrasse de plage, 2) à la rupture de pente du haut de la falaise dans le cas d'une falaise meuble ou rocheuse et 3) au sommet de l'infrastructure de protection dans le cas d'une côte artificialisée (Figure 3.1).

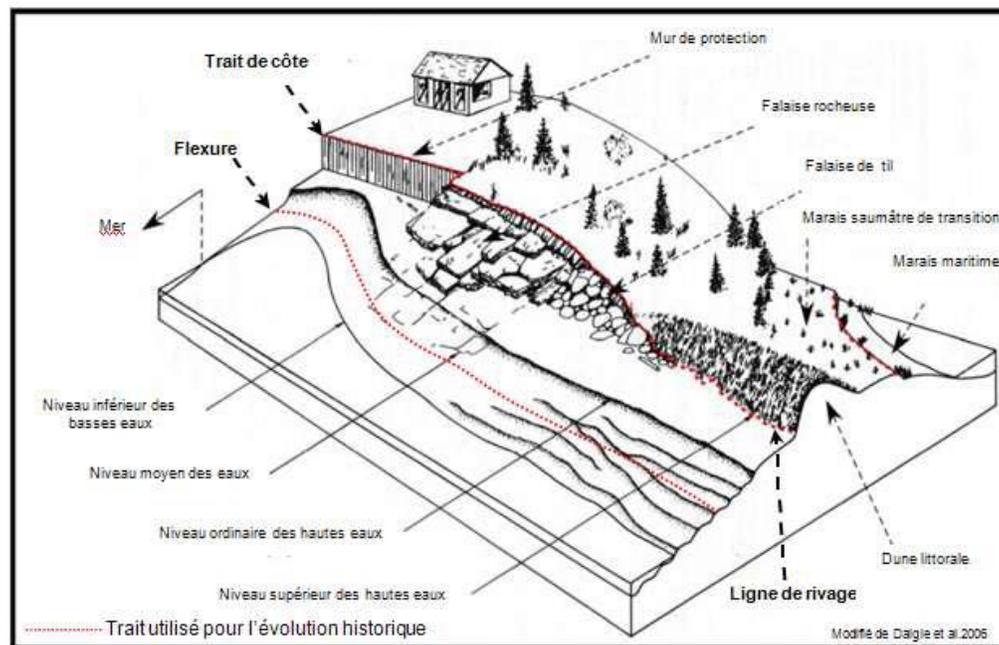


Figure 3. 1 : Limite utilisée pour mesurer l'évolution historique de la côte (modifié de Daigle *et al.*, 2006).

La méthode de photo-interprétation et de numérisation du trait de côte et de la ligne de rivage via le système d'information géographique ArcGIS permet de limiter la marge d'erreur à 5-10 m (Dubois *et al.*, 2005, dans Boucher-Brossard, 2012). Pour le secteur à l'étude, la marge d'erreur a pu être abaissée à 1,45 m pour la période récente (1993-2012), soit 0,08 m/an (Marie *et al.*, 2014).

Les intervalles de temps utilisés dans le cadre de cette étude ont été choisis afin d'obtenir une échelle long terme, moyen terme et court terme, et ce dans l'objectif de déterminer si : 1) la géomorphologie de l'estran influence le taux de déplacement de la côte à une ou plusieurs échelles temporelles ; 2) ce sont les mêmes caractéristiques géomorphologiques qui ont une influence pour toutes les échelles. Les dates sélectionnées correspondant au début et à la fin de chaque intervalle doivent répondre aux deux critères suivants : offrir une bonne précision pour le tracé et couvrir l'ensemble du terrain.

L'intervalle de temps principal de l'étude est compris entre la période du 25 juin au 7 août 1993 et celle du 16 au 22 septembre 2009. Cet intervalle a été choisi afin que les données de caractérisation des estrans correspondent à l'état final de l'intervalle de temps ; la caractérisation détaillée sur le terrain fournie par le LDGIZC a été effectuée entre 2009 et 2010 ; les images aériennes et les données LiDAR utilisées pour la caractérisation effectuée avec le système d'information géographique ArcGIS sont celles de 2009.

Le début de l'intervalle à long terme correspond au tracé sur les images datant entre le 12 juillet et le 11 septembre 1963 et datant du 5 mai 1965 (pour le secteur de la pointe Mitis), et se termine avec le tracé sur les images du 28 mai 2012. Cet intervalle servira uniquement pour l'observation de l'évolution historique des côtes rocheuses (avec et sans falaise) à l'échelle globale. Le rythme d'évolution des falaises rocheuses étant beaucoup plus lent que celui des côtes meubles, l'étude d'un grand intervalle de temps permet de mieux observer les zones stables et les zones en érosion. Cet intervalle n'a pas été choisi comme intervalle principal pour les côtes meubles en raison de la précision moindre du tracé de 1963.

L'intervalle de temps pour le court terme récent, couvre la période allant du 17 septembre 2009 jusqu'au 28 mai 2012 durant laquelle s'est produit une tempête paroxysmale (durée de retour estimée à 182 ans, Didier *et al.*, 2016) coïncidant avec une marée haute de vive-eau le 6 décembre 2010 (« Grandes Marées »). Cet intervalle a été choisi afin d'évaluer si la géomorphologie de l'estran influence le taux de déplacement de la côte lors d'une forte tempête et si c'est le cas, de comparer les résultats avec ceux de la période 1993-2009. En effet, les données de caractérisation de 2009 serviront d'état initial avant la tempête. Des analyses statistiques permettront d'identifier s'il y a des secteurs ou des caractéristiques qui pourraient avoir influencé l'évolution du trait de côte ou de la ligne de rivage entre 2009 et 2012.

3.4.2. METHODE DE CALCUL

Les taux de déplacement annuels et totaux ont été calculés à l'aide du système digital d'analyse de la ligne de rivage (DSAS). Cette extension gratuite du logiciel ArcGIS permet d'obtenir efficacement les statistiques descriptives sur le taux de déplacement de la ligne de rivage pour une ou plusieurs séries temporelles (Thieler *et al.*, 2009). La version utilisée est 4.0, mise à jour en mai 2009. Les taux de déplacement calculés peuvent être positifs, lorsque la côte est en accrétion, ou négatifs, dans le cas où la côte est en érosion.

L'extension DSAS a l'avantage de pouvoir générer automatiquement des transects traversant l'estran jusqu'à sa limite inférieure à partir d'une ligne de référence (« baseline ») selon l'intervalle spatial désiré. Dans le cas présent, les transects sont générés à tous les 20 mètres (section 3.2.2). La ligne de référence a été tracée et ajustée manuellement à l'intérieur de la côte de manière à suivre la ligne de rivage. Afin d'obtenir trois (3) transects par segment de moins de 60 mètres, des transects ont été ajoutés manuellement.

Tous les transects ont été vérifiés, ajustés manuellement puis validés pour s'assurer qu'ils soient perpendiculaires aux quatre traits de côte (série 1963 et 1965, série 1993, série 2009 et série 2012) et perpendiculaires à la limite distale de l'estran correspondant au zéro marégraphique estimé (Figure 3.2).

Dans le cas où il n'est pas possible de rencontrer ces deux conditions (lorsqu'un segment de côte est concave ou convexe), un transect supplémentaire a été tracé manuellement pour obtenir un transect perpendiculaire au tracé de la côte et l'autre perpendiculaire à la limite inférieure de l'estran. Ces deux transects doivent passer par le même point sur la ligne de rivage de 2009. Au total 2176 transects ont été générés et validés pour représenter l'ensemble des estrans compris dans le site d'étude.

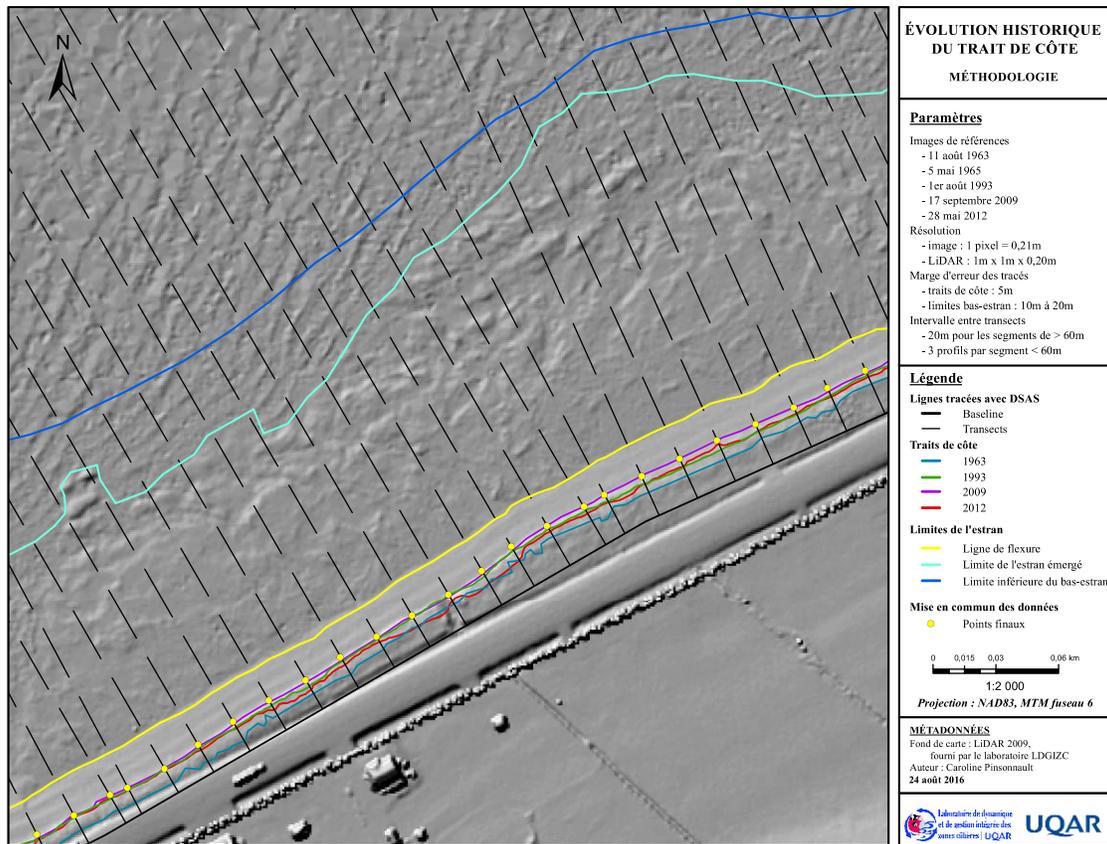


Figure 3. 2 : Illustration de la méthode de calcul de l'évolution historique de la ligne de rivage (Fond de carte : LiDAR 2009, fourni par le LDGIZC).

Deux calculs ont été effectués : 1) le déplacement total net de la ligne de rivage (« Net Shoreline Movement » ou NSM) pour chaque intervalle de temps ; 2) le taux annuel de déplacement pour chaque intervalle en utilisant la méthode du « end point rate » (EPR). Cette dernière méthode consiste à mesurer d'abord la distance totale entre les tracés de la ligne rivage perpendiculairement à la ligne de référence, située sur l'arrière-côte, correspondant au déplacement net de la ligne de rivage (NSM). Ensuite, cette distance est divisée par le temps écoulé (au mois près) entre chacun des intervalles de temps pour obtenir un taux de déplacement annuel (EPR).

3.4.3. LIMITES ET CONDITIONS

L'ensemble de la côte étudiée est représenté par 2176 profils validés, dont 1999 profils de côte à terrasse de plage, 91 profils de côte rocheuse sans falaise, 42 profils de côte à falaise meuble, 37 profils de côte à falaise rocheuse et 7 profils autres (tombolo, marais maritime). La représentation de chaque type de côte est à prendre en compte dans l'interprétation des résultats. Il est à noter que les côtes de type tombolo et marais maritime ne seront pas traités en raison du nombre insuffisant de profils.

La résolution des images aériennes est de 0,21 m pour 1963 et 1965, de 0,25 m pour 1993 et de 0,20 m pour 2009 et 2012 (Marie *et al.*, 2014). Quant à la résolution des données LiDAR, la précision est de 1 m en « x », 1 m en « y » et 0,20 m en « z ».

La marge d'erreur liée au géoréférencement est restreinte à 1 m pour 1993, 2009 et 2012, et à 3 m pour 1963 et 1965 (Marie *et al.*, 2014). Pour les tracés délimitant l'estran, la marge d'erreur varie 1) entre 0 et 0,5 m pour le trait de côte ou la ligne de rivage (Marie *et al.*, 2014), 2) entre 10 m et 20 m pour la limite inférieure du bas-estran tracé par photo-interprétation des images aériennes et 3) s'élève à 5 m pour la limite inférieure de la zone émergée de l'estran tracé par photo-interprétation des « hillshades » produits avec les données LiDAR.

3.5. ANALYSES STATISTIQUES ET COMPARATIVES

Les analyses des données de caractérisation et des taux de déplacement de la côte ont été faites en trois temps. D'abord, la phase d'exploration des données a pour objectif de cibler les caractéristiques géomorphologiques ayant un potentiel d'influence significatif sur le taux de déplacement de la côte à l'aide d'analyses en composante principale (ACP) pour

les variables quantitatives, et d'analyses de variance (ANOVA) pour les variables qualitatives. Ensuite, la phase d'analyses avancées, correspondant à des régressions linéaires, a pour objectif d'identifier les caractéristiques les mieux reliées au taux de déplacement en calculant le sens et la force (R^2) des relations ainsi que le degré d'influence (pente de la relation) de chaque caractéristique quantitative (identifiées avec les ACP) sur le taux de déplacement. Dans l'illustration de ces régressions sera incorporée individuellement chaque variable qualitative identifiée avec l'ANOVA pour tenter d'expliquer la répartition des points autour de la courbe de régression linéaire. Enfin, la troisième phase consiste à comparer les résultats des différentes échelles spatiales ainsi qu'à comparer les résultats obtenus pour les deux intervalles de temps étudiés afin d'évaluer s'il existe des différences au niveau des relations avec les taux de déplacement. Chacune de ces phases d'analyses est détaillée aux sous-sections 3.5.2, 3.5.3 et 3.5.4.

3.5.1. REGROUPEMENT DES DONNEES

Avant toute analyse, il est nécessaire de regrouper les données de profils pour en faciliter l'analyse et pour être en mesure de comparer les différentes échelles spatiales. Pour ce faire, les profils d'estran ont été regroupés par échelle d'analyse (globale, régionale, sectorielle et locale). Ensuite, ils ont été subdivisés en groupe selon le type de côtes, la combinaison (couplage du type de côte et d'estran), la cellule hydrosédimentaire et le site spécifique pour un total de 59 groupes de données. Le tableau 3.5 présente les groupes de profils résultant de cette subdivision ainsi que le nombre de profils qu'ils comprennent et le nombre de variables à analyser pour chacun de ces groupes.

Tableau 3. 6 : Vue d'ensemble de la base de données où N = nombre de groupes par ensemble de données, et n = nombre d'individus (profils) par groupe.

Échelle d'analyse	Ensemble de données	Groupes de données créés
Globale	Aucun (N = 1)	Ensemble des profils du site (n = 2176)
	Types de côte principaux (N = 4)	Terrasse de plage (A) (n = 1999)
		Falaise meuble (B) (n = 42)
		Falaise rocheuse (C) (n = 37)
		Côte rocheuse sans falaise (D) (n = 91)
	Combinaisons associées aux terrasses de plage (N = 7)	A1 (n = 47)
		A2 (n = 714)
A3 (n = 395)		
A4 (n = 33)		
A5 (n = 96)		
A7 (n = 79)		
A8 (n = 638)		
Régionale	Secteur Baie-des-Sables – Matane (N = 1)	Tous les profils compris entre Baie-des-Sables et Matane (n = 1006)
	Combinaisons principales présentes associées aux terrasses de plage (N = 4)	A2 (n = 371)
		A3 (n = 197)
		A5 (n = 69)
		A8 (n = 276)
Sectorielle	Cellules hydrosédimentaires (N = 8)	Anse au Lard (n = 29)
		Anse aux Coques (n = 253)
		Sainte-Flavie (n = 125)
		baie de Mitis (n = 208)
		Casse-Pierre (n = 130)
		Métis-sur-Mer (n = 390)
		Tartigou (n = 790)
		Saint-Ulric – Matane (n = 251)
	Combinaisons principales présentes associées aux terrasses de plage pour chaque cellule (N = 24)	Anse au Lard : A8 (n = 23)
		Anse aux Coques : A2 (n = 43), A3 (n = 44) et A8 (n = 140)
		Sainte-Flavie : A2 (n = 83) et A3 (n = 28)
		baie de Mitis : A2 (n = 96) et A7 (n = 62)
		Casse-Pierre : A1 (n = 31), A3 (n = 29) et A8 (n = 47)
Métis-sur-Mer : A2 (n = 115), A3 (n = 76), A5 (n = 20), A8 (n = 121)		

Échelle d'analyse	Ensemble de données	Groupes de données créés
		Tartigou : A1 (n = 16), A2 (n = 367), A3 (n = 187), A5 (n = 34), A8 (n = 132) Saint-Ulric – Matane : A2 (n = 10), A3 (n = 11), A4 (n = 33) et A5 (n = 42)
Locale	Sites spécifiques (N = 10)	Site 1 (n = 30) Site 2 (n = 47) Site 3 (n = 27) Site 4 (n = 46) Site 5 (n = 22) Site 6 (n = 36) Site 7 (n = 43) Site 8 (n = 28) Site 9 (n = 28) Site 10 (n = 25)

3.5.2. ANALYSES EXPLORATOIRES

D'abord, il est important de connaître le type de distribution des données avec lesquelles sont réalisées les analyses exploratoires. Pour ce faire, l'histogramme de fréquence de chaque variable quantitative a été produit pour l'ensemble des données. Cela permet de déterminer si les données suivent une distribution normale ou non, nécessaire au choix du type et des paramètres utilisés pour les analyses qui va s'en suivre. L'ensemble des analyses exploratoires a été effectué à l'intérieur de tous les groupes de données.

3.5.2.1. VARIABLES QUANTITATIVES

Les variables quantitatives comprennent les caractéristiques morphométriques des estrans, les taux de déplacement totaux et annuels, l'orientation des strates de la plateforme, l'orientation de la côte et la différence d'orientation entre ces derniers. L'analyse des variables quantitatives s'est faite en deux volets. L'outil utilisé pour ces analyses est

l'extension « XLSTAT », produit par Microsoft et complémentaire au logiciel Excel de la suite Office.

Dans un premier temps, la méthode d'analyse par composante principale (ACP) a été utilisée afin d'identifier les variables qui sont corrélées entre elles, inversement corrélées ou indépendantes l'une de l'autre. Cette étape présente un portrait général des corrélations existantes entre les variables étudiées. Les résultats bruts de l'ACP qui seront utilisés correspondent aux graphiques illustrant la position des variables testées par rapport aux facteurs 1 (axe horizontal) et 2 (axe vertical) de l'ACP. Dans les graphiques illustrant la position des variables par rapport aux facteurs 1 et 2, une variable située près de l'axe et de l'extrémité de cet axe (100 %) contribue davantage au facteur correspondant à cet axe (Figure 3.3). Donc, les variables situées près du 100 % constituent des variables importantes dans l'explication de la variabilité dans les données. Sur ces mêmes graphiques, les variables regroupées sont corrélées entre elles, les variables de groupes opposés sur un même axe sont inversement corrélées et les variables de groupes situés sur l'axe opposé sont indépendantes.

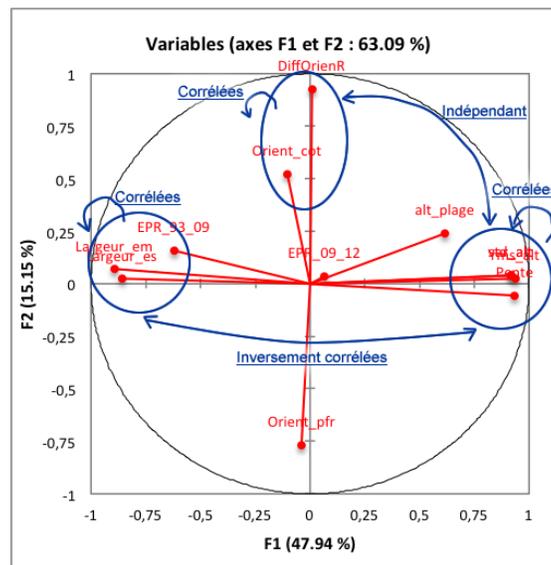


Figure 3. 3 : Explication des interprétations d'un graphique résultant d'une ACP

Ensuite, l'autre partie des résultats des ACP utilisés correspond aux tableaux présentant la contribution en pourcentage de chaque variable aux facteurs de l'ACP. Ces tableaux servent à cibler les variables clés contribuant le plus aux trois premiers facteurs de l'ACP, expliquant la majorité de la variabilité dans les données. Ce sont ces variables qui seront ensuite mises en relation avec le taux de déplacement de la côte dans les régressions linéaires.

Dans un deuxième temps, une matrice de corrélation a été produite afin de confirmer l'existence de corrélation identifiée par l'ACP. Dans le cas présent, l'étude des histogrammes de fréquence montre que la distribution des variables n'est pas normale dans la majorité des cas (section 5.1.1 du chapitre 5). En effet, les données des variables associées au taux de déplacement de la côte et à l'altitude de la ligne de rivage suivent une distribution normale, alors que celles des variables associées à la morphologie de l'estran ont une distribution plus ou moins asymétrique et qui, dans certains cas, comporte des paliers. Par conséquent, le coefficient d'analyse utilisé pour les matrices de corrélation correspond au coefficient de Spearman, qui permet de calculer la corrélation entre des variables paramétriques (taux de déplacement) et non paramétriques (majorité des caractéristiques morphométriques).

3.5.2.2. VARIABLES QUALITATIVES

L'analyse des variables qualitatives a pour but de vérifier si une ou plusieurs caractéristiques descriptives (correspondant aux variables qualitatives) des estrans ont une influence sur la variation du taux de déplacement pour la période 1993-2009. Dans la présente étude, la méthode d'analyse la plus pertinente pour tester la relation entre le taux de déplacement 1993-2009 (période d'intérêt principal de l'étude) et ces variables qualitatives correspond à l'analyse de variance « ANOVA » à un (1) facteur. Ces analyses

ont été effectuées à l'échelle globale sur l'ensemble des profils de l'étude ($N = 1$, où $N =$ nombre de groupe de données) ainsi que sur les profils regroupés par combinaison ($N = 7$) à l'aide du logiciel de statistique SPSS. Les variables qualitatives testées incluent : la géologie, la densité de placage, la proportion couverte par une plate-forme rocheuse, l'orientation des strates de la plate-forme, l'orientation de la côte, l'étendue d'algues en bas-estran et en avant-côte, la cellule hydrosédimentaire ainsi que le degré d'anthropisation.

Avant tout, il faut s'assurer que la prémisse d'homogénéité des variances intragroupe (de chaque variable testée pour chaque regroupement de données) soit respectée pour que le statistique F de l'ANOVA à un (1) facteur soit utilisable (Yergeau et Poirier, 2013). Lorsqu'elles ne sont pas homogènes, le test de Brown-Forsythe est favorisé afin de tester l'égalité de la moyenne des groupes (Addinsoft, 2015 ; Yergeau et Poirier, 2013).

Le seuil de signification (α), exprimant la probabilité d'obtenir la valeur F quand l'hypothèse nulle est vraie est fixé à 0,05 (Goulet, 2016 ; Yergeau et Poirier, 2013). Pour affirmer qu'il y a une différence intergroupe d'une des variables, le p-value doit être inférieur à ce seuil (Goulet, 2016 ; Yergeau et Poirier, 2013). Dans le cas présent, un p-value inférieur à 0,05 implique que la variable concernée explique en partie la variabilité du taux de déplacement.

Dans la présente sous-section, les groupes dont il est question dans les comparaisons intergroupe et intragroupe correspondent aux composantes d'une variable testée. Par exemple, la différence intergroupe de la variable « degré d'anthropisation » fait référence à la différence entre les moyennes des taux de déplacements des trois composantes de cette variable, soit les estrans dont la ligne de rivage est naturelle, semi-anthropisée et anthropisée pour les profils d'estrans (individus) d'un ensemble donné (p. ex. combinaison A2).

Ensuite, un test post hoc (test de comparaisons multiples) a été effectué afin d'identifier quel(s) composante(s) sont significativement différente(s) des autres (Goulet, 2016). Ces composantes devraient être observables sur les illustrations couplant le résultat des régressions avec la variable qualitative associées à ces éléments. Le type de test post hoc approprié dépend de la taille des groupes de données à analyser et de l'homogénéité des variances intragroupe (Yergeau et Poirier, 2013 ; Goulet, 2016). Dans le cas où les variances sont homogènes, le test post hoc avec correction de Bonferroni est effectué. Ce facteur a été choisi pour tester la majorité des groupes de données entre autres parce qu'il est plus puissant que le test de Tukey lorsqu'il y a peu de sous-groupes à comparer ($N < 5$), ce qui est souvent le cas (Yergeau et Poirier, 2013 ; IBM Corp., 2015). Aussi, ce facteur de correction réduit grandement la possibilité de rejeter l'hypothèse nulle par erreur (erreur de type 1) parce qu'il est considéré comme étant sévère (Yergeau et Poirier, 2013). Pour tester l'ensemble des profils (tout type de côte ou d'estrans confondu), il est préférable d'utiliser le test post hoc de Tukey parce qu'il est plus puissant que le test Bonferroni lorsqu'appliqué sur un grand nombre de données (Yergeau et Poirier, 2013).

Dans le cas où la variance intragroupe n'est pas homogène, alors le test T2 de Tamhane est utilisé (IMB Corp., 2015). Ce test est préférable aux autres tests parce qu'il est peu probable de rejeter l'hypothèse nulle par erreur (Cardinal et Aitken, 2006). Toutefois, il est important de rester prudent dans l'interprétation de ces résultats puisque, étant donné que la prémisse d'homogénéité des variances n'est pas respectée, il peut y avoir un risque d'erreur de type 1.

3.5.3. ANALYSES AVANCEES

L'objectif de cette phase d'analyse est d'identifier quelles caractéristiques expliquent le mieux le taux de déplacement de la côte pour les deux périodes ciblées. En vue des

analyses comparatives (étape 3.5.4), les régressions linéaires, mettant en relation les taux de déplacement et les caractéristiques morphométriques, ont été effectuées sur tous les groupes décrits au tableau 3.5 afin de calculer le sens et la force des relations existantes. Ces analyses ont été faites en utilisant les variables identifiées dans la phase d'analyses exploratoires. La condition de réalisation est que la variable dépendante de la relation (sur l'axe des « y ») suive une distribution normale. Étant donné que la variable dépendante est celle associée au taux de déplacement ou aux mesures d'altitude, cette condition est remplie. L'outil principal utilisé pour réaliser ces analyses ainsi que l'illustration des résultats est le logiciel de programmation mathématique « R ».

Ces analyses consistent d'abord à effectuer des régressions linéaires simples, c'est-à-dire qui ne comportent qu'une variable dépendante et une variable indépendante. D'autres types de relations telles que les relations de puissance, exponentielles et polynomiales ont été testés sur quelques groupes de données, mais les meilleurs coefficients de détermination ont été obtenus avec les relations linéaires. La régression linéaire confirme qu'une relation est significative lorsque la valeur du « p-value » est inférieure au seuil critique α , qui a été fixé à 0,05. La formule mathématique exprimant cette relation indique 1) le sens de la relation, c'est-à-dire si elle est normale ou inverse, ainsi que 2) la pente de la courbe de tendance de la relation et 3) l'ordonnée à l'origine. De plus, le R^2 est calculé afin de mesurer la force de la relation entre les deux variables.

Afin d'illustrer les régressions linéaires, des graphiques de nuages de points ont été produits en couplant la relation étudiée avec les variables qualitatives identifiées avec l'ANOVA. Pour en faciliter l'interprétation, une (1) seule variable qualitative à la fois (p. ex. : densité de placage sédimentaire) est intégrée par graphique, où chaque composante (p. ex. : aucune, faible, moyenne et forte densité) de cette variable se distingue par une couleur ou une forme différente.

3.5.4. ANALYSES COMPARATIVES

Les résultats obtenus serviront à une analyse comparative visant à identifier les différences et les ressemblances selon les variables clés, selon l'échelle spatiale et selon l'échelle temporelle. Les trois principales questions auxquelles il faudra répondre sont : a) sont-ce les mêmes variables qui influencent le taux de recul quel que soit le groupe ? b) les relations ont-elles le même sens et/ou la même force d'un groupe à l'autre ? et c) la variation des taux de recul suit-elle une tendance similaire dans tous les ensembles de données et groupes de données ? Les analyses ont été effectuées comme suit :

1. Comparaison des variables clés pour chaque échelle spatiale et entre les groupes de données de chaque échelle (Tableau 3.5).
2. Comparaison des résultats selon l'échelle spatiale. Cette analyse consiste à comparer 1) les cellules hydrosédimentaires entre elles, 2) les sites spécifiques entre eux, ainsi que 3) les résultats globaux des sites, les cellules et l'ensemble du site. Cela pourrait contribuer à savoir si les résultats varient selon leur localisation sur le terrain d'étude et/ou selon l'échelle spatiale utilisée.
3. Comparaison des résultats selon l'échelle temporelle. Cette analyse consiste à comparer les résultats des régressions linéaires entre les caractéristiques morphométriques et les taux de déplacement de la côte durant l'intervalle 1993-2009 et ceux durant l'intervalle 2009-2012. La question principale de cette étape est de déterminer si la tempête paroxysmale de décembre 2010 a entraîné des différences observables entre les tendances de la période 1993-2009 et celle de 2009-2012. Cette analyse a été réalisée sur les données de l'ensemble du site d'étude ainsi que sur chaque groupe de données.

3.5.5. LIMITES ET CONDITIONS

Étant données que toutes les caractéristiques morphométriques (à l'exception de l'altitude de la ligne de rivage) ne suivent pas une distribution normale, nous sommes restreint à utiliser un coefficient d'analyse non paramétrique (coefficient de Spearman) pour les matrices de corrélation. L'intervalle de confiance pour les ANOVA est de 95 %.

Concernant les régressions linéaires, la condition d'utilisation est respectée puisque la variable dépendante (dans le cas présent : les taux de déplacement) suit une distribution normale (chapitre 5, section 5.1.1). Le seuil critique α pour donner la signification du résultat est de 0,05.

Des analyses plus poussées pourront être réalisées dans des recherches futures étant donné le nombre important de variables à analyser dans le cadre de la présente étude.

CHAPITRE 4

LES ESTRANS DE LA RIVE SUD DE L'ESTUAIRE MARITIME DU SAINT- LAURENT : TYPOLOGIE ET CARACTERISTIQUES

Ce chapitre présente la caractérisation des estrans en deux volets. D'abord, la typologie résultant des recherches préliminaires ainsi que son application sur le terrain d'étude. Ensuite, la caractérisation des estrans est présentée pour chaque ensemble de groupes de données (décrits au tableau 3.6 dans le chapitre 3) qui sont subdivisés par type de côte, par combinaison, par cellule hydrodynamique et par site spécifique pour les quatre (4) échelles spatiales analysées (globale, régionale, sectorielle et locale).

4.1. TYPOLOGIE DEVELOPPEE

4.1.1. TYPES D'ESTRAN

Les estrans sont regroupés en quatre grands groupes : 1) à dominante rocheuse ; 2) à dominante meuble non cohésif ; 3) à dominante meuble cohésif ; 4) mixte. Le tableau 4.1 détaille les caractéristiques de chaque type d'estran et le groupe auquel il appartient. Pour faciliter la distinction des types d'estran par photo-interprétation, un tableau synthèse simplifié a été utilisé et pourrait être utile pour la classification des estrans sur d'autres secteurs du Québec maritime (Annexe V).

Tableau 4. 1 : Caractéristiques spécifiques de chaque type d'estran

	À DOMINANTE ROCHEUSE			À DOMINANTE MEUBLE (NON COHÉSIF)		À DOMINANTE MEUBLE (COHÉSIF)		MIXTE
Type	1- Plate-forme rocheuse simple	2- Plate-forme rocheuse avec cordon littoral	3- Plate-forme rocheuse avec un important dépôt sédimentaire	4- Plage simple	5- Plage avec (dallage de) blocs ou écueil	6- Marais maritime	7- Batture argileuse (ou slikke) avec cordon littoral	8- Estran mixte rocheux et meuble avec dallage de blocs et/ou placage sédimentaire
Composition principale	Rocheux (roc)	Rocheux (roc) avec sable/gravier	Rocheux (roc) avec sable /gravier et sédiments fins	Sable/gravier	Sable/gravier avec blocs	Sédiments fins (sables fins et limon/argile)	Sédiments fins (limon/argile et sables)	Sédiments moyens (sable et graviers), avec blocs et/ou plate-forme rocheuse
Granulométrie dominante haut-estran	Rocheux (roc)	Sableux et rocheux	Sableux et rocheux	Sable grossier/gravier	Sable grossier/gravier	Sédiments fins	Sédiments fins à moyens	Sable moyen avec sédiments fins
Granulométrie dominante bas-estran	Rocheux (roc)	Rocheux (roc)	Rocheux (roc) avec sédiments fins	Sable moyen à fin	Sédiments moyens à grossiers avec blocs	Sédiments fins	Sédiments fins	Gravier et cailloux avec blocs et/ou plate-forme rocheuse
Caractéristiques spécifiques	Peut comporter des dépôts de sédiments fins à moyens (< 25 %)	Peut comporter des dépôts de sédiments fins à moyens (< 25 %)	Comporte des dépôts de sédiments fins à moyens (< 50 %)	---	---	Végétation abondante en haut-estran et partielle en bas-estran	Peut comporter des marelles et buttes végétalisées	Peut comporter des marelles et buttes végétalisées

	À DOMINANTE ROCHEUSE			À DOMINANTE MEUBLE (NON COHÉSIF)		À DOMINANTE MEUBLE (COHÉSIF)		MIXTE
	Affleurement rocheux ≥ 75 %	Affleurement rocheux ≥ 50 %	Affleurement rocheux ≥ 50 % en bas-estran	Aucun affleurement rocheux	Peut comporter des affleurements rocheux ≤ 50 %	Possible présence d'une micro-falaise d'érosion entre le schorre et la slikke	Peut comporter des affleurements rocheux isolés ≤ 50 %	Peut comporter des affleurements rocheux ≤ 50 %
	Plate-forme souvent directement reliée à la falaise ou terrasse de plage	Présence d'un cordon littoral sur le haut-estran	Présence d'un cordon littoral ou d'un haut de plage sur le haut-estran (non obligatoire)	Possible blocs glaciels en bas-estran	Possible cordon de blocs en bas-estran	---	Présence d'un cordon littoral ou d'un haut de plage en haut-estran	Présence d'un cordon littoral ou d'un haut de plage en haut-estran (non obligatoire)
	Peut comporter un dallage ou un cordon de blocs en bas-estran et/ou une mince accumulation de sédiments en haut-estran	Peut comporter un cordon de blocs et/ou un dallage de blocs en bas-estran (couverture nulle à moyenne / 0-25 %)	Peut comporter un cordon de blocs et/ou un placage de sédiments en bas-estran (< 50 % de superficie en bas-estran)	---	Présence d'un dallage de blocs, d'un placage de sédiments grossiers ou d'écueils (peu étendu)	---	Présence d'un dallage ou d'un cordon de blocs (peu étendu)	Présence d'un dallage ou d'un cordon de blocs (moyennement à très étendu)
	---	---	Présence d'un bas-estran vaseux	---	---	---	Présence d'un placage de sédiments ≤ 25 %	Présence d'un placage de sédiments ≥ 25 %

4.1.1.1. ESTRANS A DOMINANTE ROCHEUSE

Dans cette catégorie, une plate-forme rocheuse, éventuellement accidentée d'écueils rocheux, constitue la principale composante de l'estran. Ils constituent la majorité des estrans étudiés, soit 56 % du site d'étude. Trois types (1, 2 et 3) se distinguent par la présence d'un étroit cordon littoral sur le haut-estran ainsi que la présence de placage sédimentaire ou dallage de blocs de densité faible (type 2) à moyenne (type 3) en bas-estran (Tableau 4.1). Chacun des types d'estran rocheux est illustré aux figures 4.1, 4.2 et 4.3.

4.1.1.2. ESTRANS A DOMINANTE MEUBLE NON COHESIF

Ce grand groupe d'estran rassemble les estrans constitués majoritairement de sédiments meubles non cohésifs tels que des sables, des graviers ou parfois des galets. Il peut s'agir de plage simple, formant le type « 4 » (Figure 4.4), ou d'une plage comportant un dallage de blocs et/ou d'un affleurement rocheux couvrant moins de 50 % de l'estran, formant le type « 5 » (Figure 4.5). Étant donné que les plages le long du site d'étude sont surtout composées de sable, nous utiliserons le terme « estran à dominante sableuse » pour désigner ces types d'estran.

4.1.1.3. ESTRANS A DOMINANTE MEUBLE COHESIF

Dans ce groupe, aussi nommé « estran à dominante vaseuse », les estrans sont composés de sédiments fins à très fins, pouvant comporter des accumulations localisées de sédiments moyens à grossiers. Les marais maritimes, composés d'un schorre et d'une slikke, forment le type « 6 » (Figure 4.6). Entre la pointe de Pointe-au-Père et Matane, on

retrouve ce type uniquement dans les secteurs en fond de baie de Grand-Métis et de Métis-sur-Mer. Puisque ces secteurs sont exclus des segments de côtes à l'étude, il ne sera pas étudié dans le cadre de la présente recherche. Le type « 7 » est, quant à lui, composé d'une grande batture argileuse (similaire à une slikke) avec un cordon littoral sur le haut-estran et où l'on retrouve parfois des méga-blocs (Figure 4.7).

4.1.1.4. ESTRANS MIXTES (SANS COMPOSANTE DOMINANTE)

Finalement, le type « 8 » forme un groupe à lui seul. Il est généralement composé d'une accumulation de sédiments moyens à grossiers dans une matrice fine recouvrant une batture argileuse ou une plate-forme rocheuse affleurant sur moins de 50% de l'estran (tel que décrit par Dionne, 2002).



Figure 4. 1 : Exemple d'un estran de type 1 sous différents points de vue. A) Vue aérienne du phare de Mitis.



Figure 4. 2 : Exemple d'un estran de type 2 sous différents points de vue. A) Vue aérienne (près de Tartigou). B) Vue hélicoptéré (près de Sainte-Flavie). C) Vue de profil (Les Méchins).



Figure 4. 3 : Exemple d'un estran de type 3 sous différents points de vue. A) Vue aérienne. B) Vue oblique C) Vue de profil (Grosses Roches).

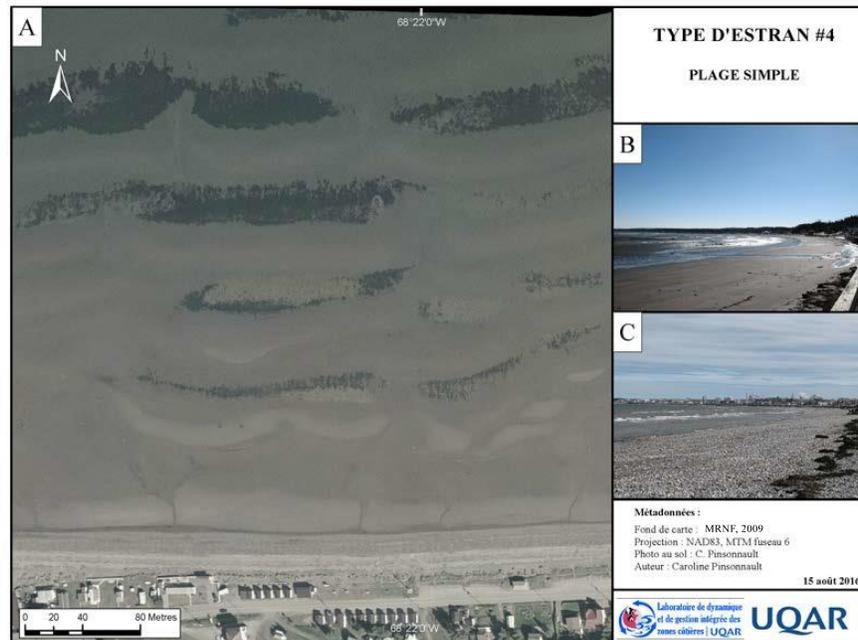


Figure 4. 4 : Exemple d'un estran de type 4 sous différents points de vue. A) Vue aérienne (Sainte-Luce).

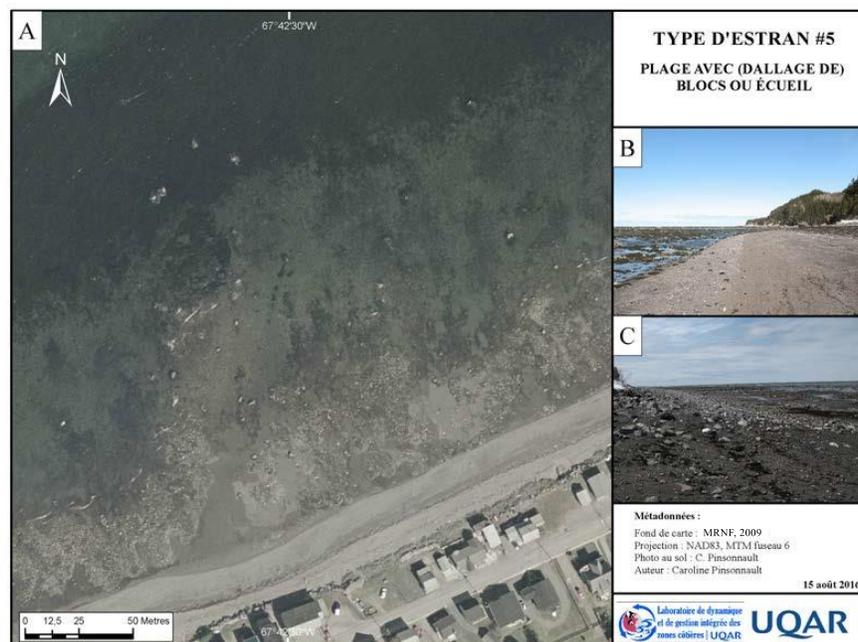


Figure 4. 5 : Exemple d'un estran de type 5 sous différents points de vue. A) Vue aérienne (secteur entre Saint-Ulric et Matane). B) Vue de profil (Les Méchins) C) Vue de profil 2 (Petit-Matane).

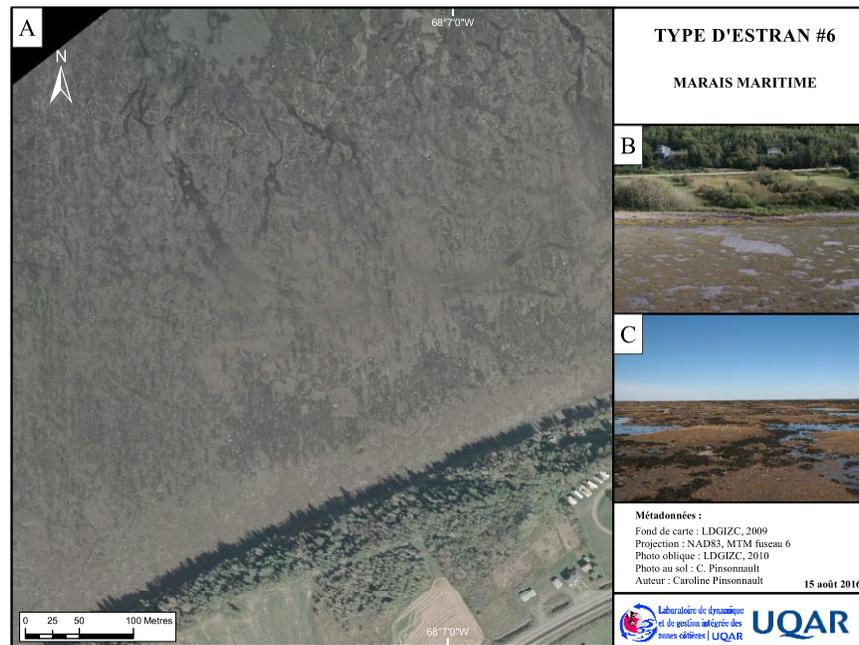


Figure 4. 6 : Exemple d'un estran de type 6(ici, herbier à zostère de Métis-sur-Mer) sous différents points de vue. A) Vue aérienne. B) Vue oblique C) Vue de profil.

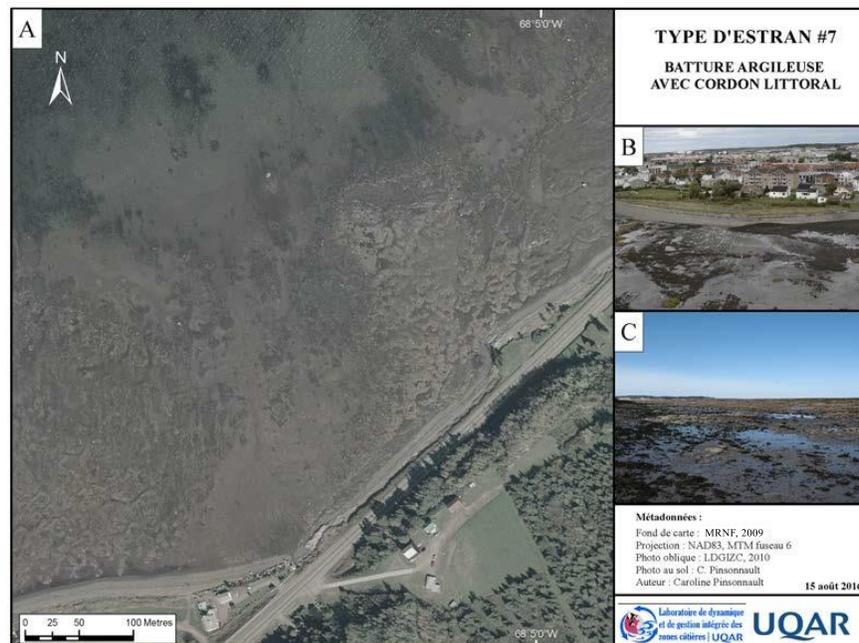


Figure 4. 7 : Exemple d'un estran de type 7 sous différents points de vue. A) Vue aérienne (Sainte-Luce). B) Vue oblique (Rimouski-Est). C) Vue de profil (Grand-Métis).



Figure 4. 8 : Exemple d'un estran de type 8 sous différents points de vue. A) Vue aérienne (Baie-des-Sables). B) Vue oblique (Sainte-Félicité). C) Vue de profil (Pointe-au-Père).

4.1.2. NOMENCLATURE

Pour faciliter la nomenclature, le terme « combinaison » est utilisé pour décrire la combinaison d'un type d'estran avec un type de côte. Chaque type de côte est associé à une lettre, tandis que chaque type d'estran est associé à un chiffre (Tableau 4.2).

Tableau 4. 2: Nomenclature des « combinaisons »

Lettre code	Type de côte	Chiffre code	Type d'estran
A	Terrasse de plage	1	Plate-forme rocheuse simple
B	Falaise meuble	2	Plate-forme rocheuse avec cordon littoral en haut-estran
C	Falaise rocheuse	3	Plate-forme rocheuse avec accumulation sédimentaire importante
D	Rocheuse sans falaise	4	Plage simple
		5	Plage avec dallage de bloc
		6	Marais maritime
		7	Batture argileuse avec cordon littoral en haut-estran
		8	Mixte

4.2.CARACTERISATION DES ESTRANS ET DEPLACEMENT DU DE LA COTE

La géomorphologie du site d'étude est très hétérogène au niveau du substrat, de la composition et de la morphologie. La caractérisation des estrans était donc essentielle afin de bien les catégoriser pour faciliter les analyses statistiques permettant d'identifier les variables ayant un lien avec le taux de déplacement de la ligne de rivage.

Dans la présente sous-section seront présentées les principales caractéristiques descriptives et morphométriques de chaque groupe de données précédemment présenté au tableau 3.5. Afin d'assurer une meilleure fluidité dans la lecture et d'alléger le texte, les tableaux décrivant plus en détail les caractéristiques de chacun de ces groupes ont été placés à l'annexe VI. Cette note est valable pour les sous-sections 4.2.1 à 4.2.5 inclusivement.

Suite à la segmentation de la zone côtière, un total de 2176 profils transversaux, au droit desquels a été mesuré le déplacement de la ligne de rivage, ont été produits, validés et caractérisés pour décrire et représenter les 552 segments de côte naturels du site à l'étude. Rappelons que pour limiter tout biais pouvant être induit par la subjectivité et/ou l'incertitude des tracés, les secteurs suivants ont été exclus de l'étude : les secteurs en fond de baie, les secteurs dont la vue aérienne de la ligne de rivage est obstruée par des arbres ou autres obstacles, ainsi que les segments de côtes artificialisés.

4.2.1. VUE D'ENSEMBLE DU SITE D'ETUDE

4.2.1.1. GEOMORPHOLOGIE

La côte est très majoritairement constituée de terrasses de plage (A), représentant 92 % (33,6 km) des côtes étudiées. Les côtes à falaises meubles (B) ou rocheuses (C) et les côtes rocheuses sans falaises (D) couvrent à eux trois un peu moins de 8 % des côtes (Figure 4.9). L'altitude moyenne de la ligne de rivage est de 3,1 m par rapport au niveau moyen de la mer. La côte est orientée vers le NNW à NW dans 80 % des cas et est généralement exposée au fleuve sans aucun obstacle pour freiner le train de vagues et peu d'obstacles naturels ou artificiels transversaux pour bloquer les courants de dérive littorale.

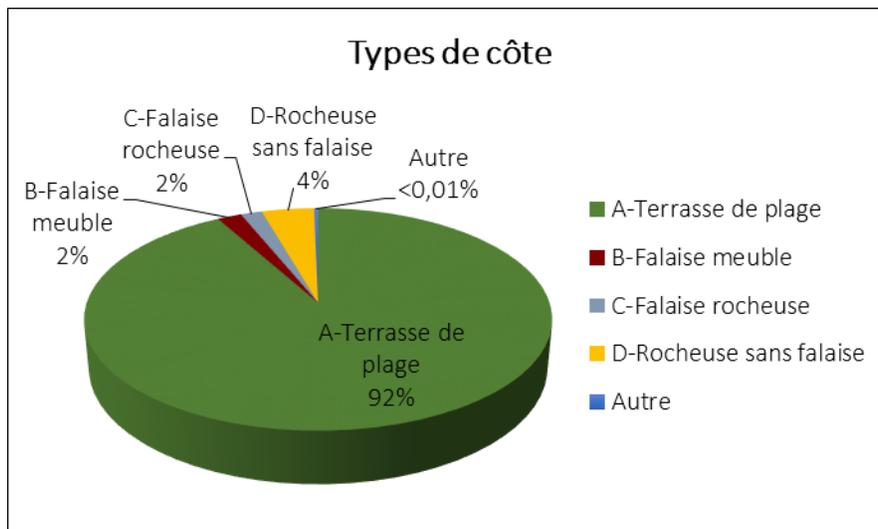


Figure 4. 9 : Types de côte retrouvés sur le site d'étude

Les estrans sont en majorité à dominante rocheuse (56 %) ou mixte (31,1 %). Les trois types d'estran les plus retrouvés sont le type 2 (35,2 %), le type 8 (31,1 %) et le type 3 (18,4 %) (Figure 4.10). Ces derniers ont une composition de base similaire, soit un affleurement rocheux important avec la présence d'un cordon littoral et de placage

sédimentaire sur le bas-estran dont l'étendue varie selon le type d'estran. Très peu d'estrans à dominante sableuse (type 4 et 5) et vaseuse (type 7) ont été recensés, soit 10,2 % en les combinant. Rappelons qu'aucun transect ne traverse d'estran de type marais maritime (type 6) puisque les secteurs en fond de baie, où l'on retrouve ce type d'estran, ont été exclus de la présente étude (section 4.1.1.3).

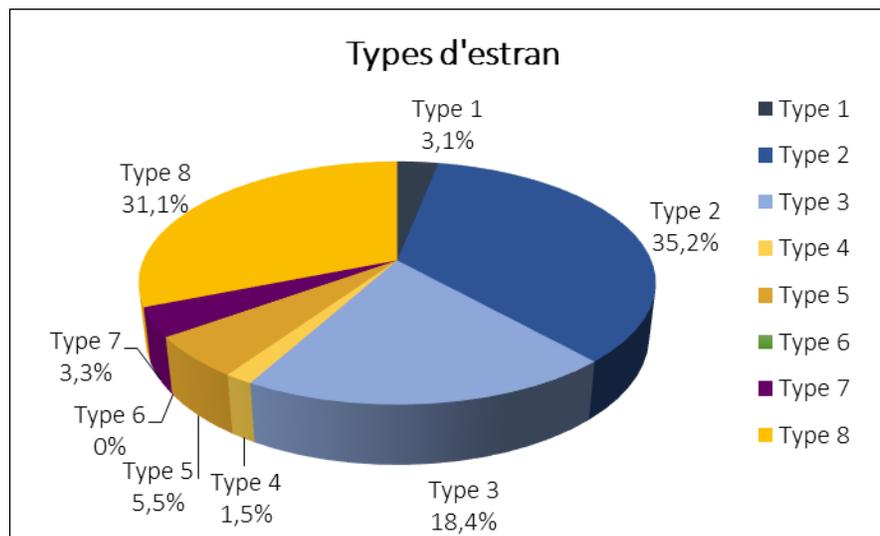


Figure 4. 10 : Types d'estran retrouvés sur le site d'étude

La largeur totale moyenne des estrans est de 213 m avec un écart-type important de 115 m, et peut atteindre plus de 850 m par endroit (à Grand-Métis par exemple), tandis que la largeur émergée moyenne est de 155 m avec un écart-type de 97 m (Tableau 4.3). Nous estimons donc que la largeur émergée (i.e. dont la limite inférieure de l'estran a été tracée en suivant la limite émergée-submergée des données LiDAR) ne correspond en moyenne qu'à 75 % de la largeur totale estimée de l'estran (i.e. dont la limite distale correspond au zéro marégraphique estimé par photo-interprétation). Toutefois, cette différence varie selon le type d'estran. En effet, les plus grandes différences sont mesurées sur les estrans meubles (cohésifs et non cohésifs) où la largeur émergée ne correspond qu'à 50 % de l'estran. À l'opposé, la largeur émergée des estrans rocheux représente entre 75 % et 95 % de la

largeur totale estimée. Quant à la pente générale moyenne (partie émergée), elle est de $2,19^\circ$ avec un écart-type de $1,35^\circ$.

Tableau 4. 3 : Statistiques descriptives des caractéristiques morphométriques des estrans sur l'ensemble du site d'étude

	L_{tot} (m)	L_{em} (m)	H_{LR} (m)	S_{moy} ($^\circ$)	R_{std} (m)	R_{rms} (m)
Min	64,1	26,3	1,57	0,32	0,06	0,40
Moy.	212,8	155,0	3,11	2,19	0,96	1,08
Max	816,1	757,4	6,90	11,96	2,38	3,34
Écart-type	115,0	96,9	0,47	1,35	0,23	0,32

La figure 4.11 présente le nombre de profils pour chaque combinaison (regroupant type d'estran et type de côte) identifiée sur le site d'étude. On y recense, au total, 22 combinaisons possibles. Les côtes à terrasse de plage sont les seules croisant tous les types d'estrans (excluant le type 6) et offrant une représentativité significative pour les analyses statistiques. Par conséquent, les profils d'estran des trois autres types de côte seront analysés dans leur ensemble (c.-à-d. tous les B ensemble, tous les C ensemble et tous les D ensemble) et les groupes de données par combinaisons de ces types de côte (c.-à-d. B2, B5, B7, B8, C1, etc.) seront exclues des analyses statistiques. Ainsi, les côtes à terrasse de plage seront analysées plus en détail que les autres types de côte.

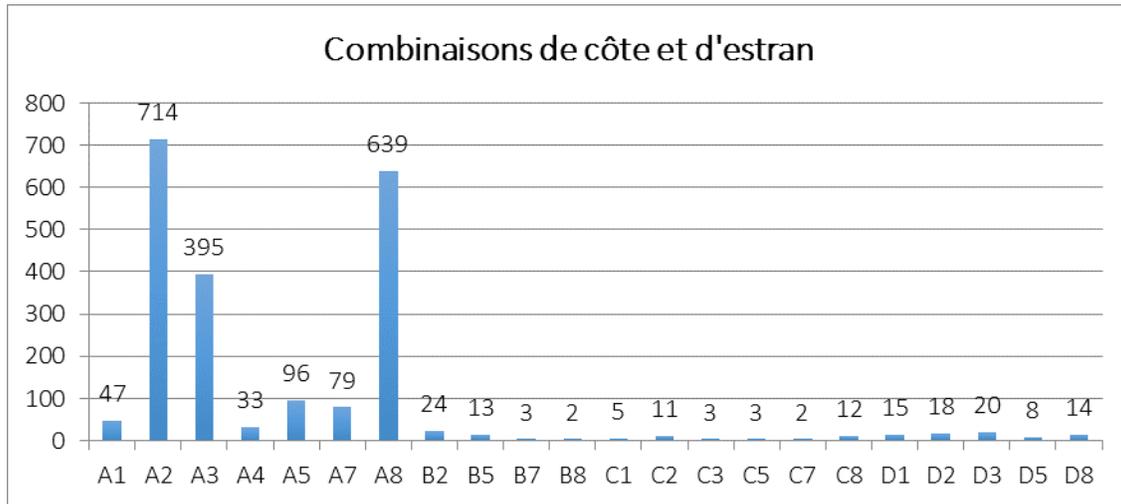


Figure 4. 11 : Nombre de profils appartenant à chaque combinaison recensée

L'orientation des strates des plates-formes rocheuses ($Orient_{pfr}$) varie entre W et NNE en passant par le N (azimut N270 à N22.5, en passant par N0). Dans 55 % des cas, elle se situe entre NW et NNW (Figure 4.12).

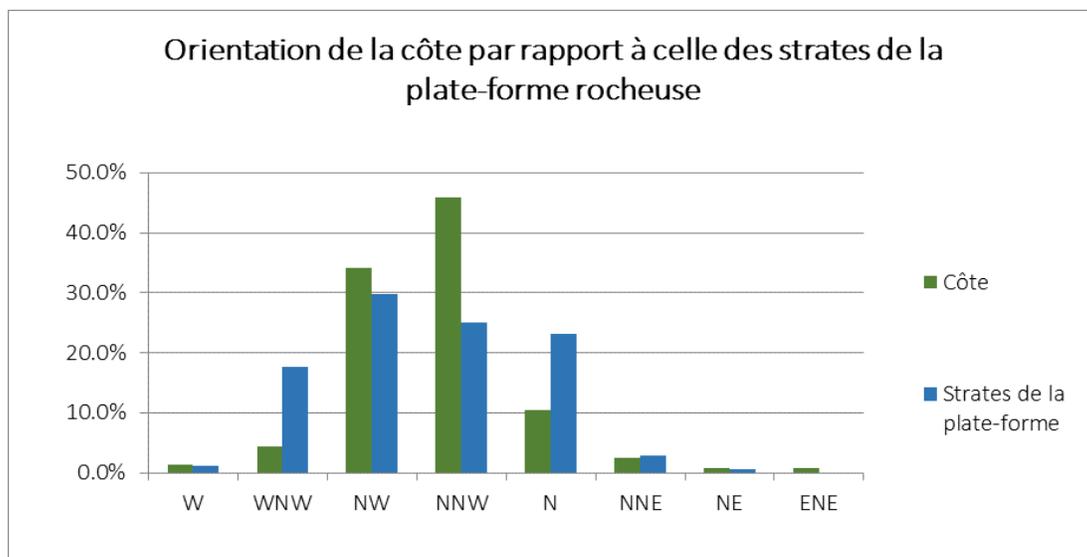


Figure 4. 12 : Effectif de profils pour chaque point cardinaux de $Orient_{cote}$ et $Orient_{pfr}$.

En calculant la différence d'orientation entre celle des strates et celle de la côte ($Orient_{diff}$), nous pouvons observer que les strates des plates-formes et la ligne de rivage sont le plus souvent quasi parallèle ($|0^\circ - 18^\circ| = 43,5\%$ des profils) et rarement perpendiculaires ($|72^\circ - 90^\circ| = 3,1\%$ des profils) (Figure 4.13).

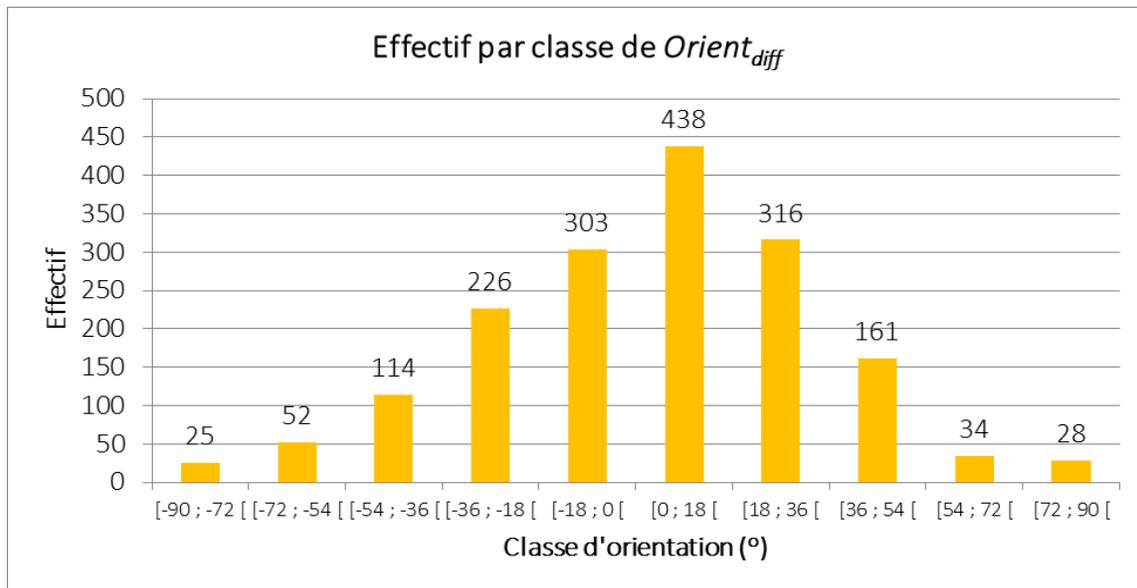


Figure 4. 13 : Effectif de profils pour chaque point cardinal de $Orient_{cote}$.

4.2.1.2. TAUX DE DEPLACEMENT SUR L'ENSEMBLE DE LA COTE

Considéré à long terme, la position de la ligne de rivage demeure relativement stable sur l'ensemble du site d'étude (Tableau 4.4). En effet, on note globalement une avancée moyenne de seulement 1,17 m entre 1963 et 2012. Selon les secteurs, la ligne de rivage tend soit à reculer, soit à avancer ou à rester stable. On observe une tendance similaire pour la période 1993-2009, avec toutefois une légère tendance au recul de la côte (-0,09 m/an).

Pour la période 2009-2012, la tendance au recul de la côte est plus marquée, probablement en raison de la tempête paroxysmale du 6 décembre 2010.

Tableau 4. 4 : Statistiques descriptives des mesures de déplacement de la ligne de rivage pour l'ensemble du site d'étude

Intervalle	1963-2012	1993-2009	2009-2012
Taux de déplacement annuel moyen (m/an)	0,02	-0,09	-0,70
Écart-type du taux annuel (m/an)	0,12	0,19	1,10
Taux de recul maximal (m/an)	-1,00	-0,85	-4,66
Déplacement total moyen (m)	1,17	-1,38	-1,89
Recul maximal (m)	-15,24	-13,77	-12,56
Avancée maximale (m)	29,38	10,72	13,05

Cependant, il est important de noter qu'il y a des différences importantes dans les taux de déplacement mesurés le long du site d'étude sur le moyen à court terme. En effet, pour l'intervalle de 1993-2009, le déplacement moyen est de -1,38 m, avec un écart-type de 3,03 m et un recul total maximum de -13,77 m. Quant à l'intervalle plus récent de 2009-2012, le déplacement moyen annuel est de -1,89 m, avec un écart-type de 2,98 m et un recul total maximum de -12,56 m.

Les secteurs comportant les taux de reculs les plus importants (toute période comprise) correspondent au secteur de Pointe-au-Père et aux municipalités de Sainte-Luce et Sainte-Flavie. Nous tenterons d'expliquer ces variations et d'identifier les facteurs influents par l'entremise des analyses statistiques et l'isolement des variables morphométriques au chapitre 5.

Par ailleurs, en observant de plus près les déplacements de la côte entre les intervalles 1993-2009 et 2009-2012, on constate des changements dans la tendance en l'espace de quelques dizaines de mètres de côte linéaire. En effet, bien que près de 45 % des côtes ont gardé une tendance à l'érosion entre 1993-2009 et 2009-2012, 49 % des côtes ont changé de tendance d'une période à l'autre (Tableau 4.5)

Tableau 4. 5 : États de la côte entre 1993-2009 et 2009-2012

État	1993-2009	2009-2012	Abréviation	Abondance (%)
#1	Érosion	Érosion	EE	44,4 %
#2	Érosion	Accrétion	EA	20,2%
#3	Accrétion	Érosion	AE	29,0%
#4	Accrétion	Accrétion	AA	6,4 %

4.2.1.3. DEGRE DE L'ANTHROPISATION DES COTES

En suivant les paramètres de la segmentation de la côte selon le degré d'anthropisation présentés au chapitre 3 (section 3.3.2), 58,1 % du site d'étude est catégorisé « naturelle », puis 21 % « semi-anthropisée » et 20,9 % « anthropisée ». Cette catégorisation tient compte de la distance entre les segments de côte naturels et les segments de côte artificialisés adjacents, ainsi que la proportion de sections artificialisées par kilomètre de côte linéaire.

Le degré d'anthropisation de la côte varie beaucoup d'un secteur à l'autre. Les municipalités de Sainte-Luce et de Sainte-Flavie constituent les secteurs ayant le plus haut taux d'artificialisation de la côte à l'intérieur du terrain d'étude, avec moins de 25 % de côte classée « naturelle ».

Au niveau des caractéristiques géomorphologiques et environnementales, on ne remarque pas de distinction nette entre les segments naturels, semi-anthropisés et anthropisés, mis à part le taux d'artificialisation de la côte. Toutefois, le taux de recul de la côte est plus important sur les segments anthropisés que naturels lors de la période récente (Tableau 4.6).

Tableau 4. 6 : Taux de déplacement annuel moyen (m/an) pour 1993-2009 et 2009-2012 par degré d'anthropisation

Degré d'anthropisation	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉ (m/an)	EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂ (m/an)
Naturelle	-0,09	-0,59
Semi-anthropisée	-0,09	-0,73
Anthropisée	-0,07	-0,97

4.2.2. PAR TYPE DE COTE

4.2.2.1. COMPOSITION

Les côtes rocheuses sans falaises (D) et les côtes à falaises rocheuses (C) sont généralement composées d'un estran rocheux (type 2 ou type 3) ou mixte (type 8). On observe en moyenne très peu de dallage de blocs (densité nulle à faible), alors que la densité de placage sédimentaire varie de faible à moyenne. L'étendue de la plate-forme rocheuse affleurante sur ces estrans varie de faible à très élevée. La nature du roc fait principalement partie de la formation de Tourelle, composée de grès, de wacke, de mudrock et de calcaire (MERN, 2015).

Les côtes à falaises meubles (B) sont principalement composées d'estran à dominante rocheuse ou sableuse (type 2 ou type 5). On observe plus de placage sédimentaire et de dallage de blocs que sur les autres types de côte, mais leur étendue est très variable le long du site. Le roc sous-jacent aux dépôts meubles est formé le plus souvent d'un mélange constitué de lithologies de plusieurs formations rocheuses appelées « Mélange de Cap-Chat » (formation des Landes, de Tourelle et de Rivière-Ouelle), dans lequel se retrouve entre autres du grès et du mudrock (MERN, 2015),

Les côtes à terrasse de plage (A) couvrent une bien plus grande diversité de composition que les autres types puisqu'elles constituent 92 % de la côte tel que mentionné précédemment. La composition des estrans est majoritairement à dominante rocheuse ou mixte. L'étendue des dallages de blocs et placages sédimentaires varie de aucune à élevée. Le roc sous-jacent et/ou affleurant est principalement constitué de grès, de mudrock, d'ardoise verte et rouge et de calcaire. Pour plus de détails, voir annexe VI.

4.2.2.2. MORPHOLOGIE

Sur l'ensemble des caractéristiques, on observe une différence importante entre les côtes meubles et les côtes rocheuses. Les résultats concernant la largeur totale moyenne des estrans montrent qu'elle est plus grande sur les côtes meubles comparativement aux côtes rocheuses. Suivant la même logique, les côtes rocheuses sont celles ayant les hauts-estrans les moins étendus là où ils ont pu être mesurés, allant de moins de 5 m jusqu'à 15 m de largeur.

La pente moyenne est également plus importante pour les côtes rocheuses que pour tout autre type de côte. En effet, la pente moyenne des estrans sur les côtes à falaises

rocheuses s'élève à 3,79 °, alors qu'elle est de 2,12 ° pour les estrans sur les côtes à terrasse de plage, et de 1,86 ° pour les côtes à falaises meubles.

Les indices de rugosité montrent une rugosité plus importante des estrans sur les côtes rocheuses que les côtes meubles. Toutefois, l'écart entre les valeurs est assez faible. La rugosité plus élevée des estrans de côtes rocheuses sans falaise pourrait être expliquée par la présence plus fréquente d'écueils rocheux sur le haut-estran.

L'orientation de la côte et des strates de la plate-forme rocheuse, où elle affleure, reste assez similaire dans l'ensemble des types de côte, soit entre NW et NNW.

4.2.2.3. VEGETATION AQUATIQUE

Une différence marquante peut être observée entre les estrans des côtes rocheuses et ceux des côtes meubles. En effet, les estrans sur les côtes meubles présentent en moyenne une couverture d'algues sur le bas-estran et parfois en avant-côte avec une densité moyenne à élevée. À l'opposé, sur les estrans des côtes rocheuses, la couverture d'algues peut être nulle ou s'étendre jusqu'à une densité moyenne.

4.2.2.4. TAUX DE DEPLACEMENT DE LA COTE

Durant la période 1963-2012, la ligne de rivage est restée en moyenne relativement stable (Tableau 4.7). Pour l'intervalle 1993-2009, les résultats montrent également une faible différence entre les types de côte, avec des reculs moyens de l'ordre de 0,05 à 0,15 m/an, correspondant approximativement à la marge d'erreur estimée à 0,08 m/an (Marie *et al.*, 2014). À la lumière de ces informations, il est possible d'affirmer qu'il n'y a

pas de différence significative entre les taux calculés pour les terrasses de plage, les côtes rocheuses sans falaise, et même celles à falaise, les côtes à falaise meuble reculant plus rapidement.

Tableau 4. 7 : Taux de déplacement annuel moyen de la ligne de rivage selon le type de côte.

Type de côte	1963-2012		1993-2009		2009-2012	
	Taux moyen (m/an)	Écart-type	Taux-moyen (m/an)	Écart-type	Taux moyen (m/an)	Écart-type
Terrasse de plage	0,03	0,11	-0,08	0,19	-0,74	1,10
Falaise meuble	0,00	0,17	-0,16	0,12	-0,63	0,91
Falaise rocheuse	-0,02	0,07	-0,04	0,17	-0,41	0,75
Rocheuse sans falaise	-0,05	0,21	-0,09	0,15	0,05	1,04

Quant à l'intervalle 2009-2012, on peut observer une nette augmentation du recul de la côte par rapport à la période 1993-2009, surtout pour les côtes à terrasse de plage et les côtes à falaise meuble. On remarque aussi quelques différences selon le type de côte. D'abord, les côtes rocheuses sans falaises tendent à rester stables contrairement aux autres qui ont toute tendance à reculer nettement. Le taux de déplacement annuel le plus important correspond aux côtes à terrasses de plage, avec une moyenne de -0,74 m et un écart-type de 1,12 m. Considérant le fait qu'une partie des côtes est en accrétion durant ces deux périodes (Tableau 4.6), le taux de recul moyen (c.-à-d. excluant les points de mesure où a été mesurée une accrétion) est donc encore plus important. D'ailleurs, le recul total maximal mesuré durant cet intervalle s'élève à -12,56 m. Le recul important des côtes à falaise meuble entre 2009 et 2012 peut être expliqué par la réactivation de l'érosion de leur base

suite à la tempête de 2010 (Marie *et al.*, 2014). Quant aux cas des falaises rocheuses, il est possible que ce type de côte soit sous-représenté ($N = 33$), ce qui implique que le taux moyen n'est pas représentatif de l'ensemble de ces côtes sur les rives du Saint-Laurent.

4.2.3. PAR COMBINAISON

Tel qu'expliqué à la section 4.2.1.1, l'observation des données et les analyses plus approfondies porteront uniquement sur les estrans localisés sur une côte à terrasse de plage (préfixe « A »). L'ensemble des résultats de caractérisation comparant les sept principales combinaisons observées sur le site d'étude peut être consulté à l'annexe VI.

4.2.3.1. COMPOSITION

Les caractéristiques géomorphologiques associées à la composition de l'estran qui différencient les combinaisons correspondent aux critères de distinction des types d'estrans exposés à la section 4.1.1.

4.2.3.2. MORPHOLOGIE

LARGEUR D'ESTRAN

Les estrans à dominante rocheuse sont tous en moyenne plus étroits que les autres types d'estran. Les estrans à dominante vaseuse sont caractérisés par une grande étendue à pente faible. Les observations le confirment puisque la largeur totale est en moyenne le

double de celle des estrans à dominante sableuse ou mixte, et près de 2,5 à 3 fois plus que les estrans à dominante rocheuse.

Pour ce qui est de la largeur du haut-estran, les haut-estrans sableux sont les plus étendus avec une largeur moyenne allant de 20 m à plus de 30 m. Les autres types ont un haut-estran variant entre 15 m et 30 m. Cela pourrait être relié à la disponibilité limitée de sédiments sur les estrans rocheux ainsi qu'au gradient de pente du substrat sous-jacent. En effet, Trenhaile (2016) présente qu'il existe une relation entre le gradient de pente d'une plage (lié à la granulométrie), le gradient de pente du substrat rocheux (plate-forme) sous-jacent et la présence d'une plage plus ou moins épaisse recouvrant ce substrat.

PENTE MOYENNE DE L'ESTRAN

La pente moyenne des estrans est similaire entre les estrans à dominante rocheuse et à dominante sableuse, avec un écart maximal de $0,5^\circ$ entre les moyennes. Les estrans mixtes ont une pente moyenne de $1,78^\circ$, suivi par les estrans à dominante vaseuse qui présentent les pentes les plus faibles calculées, soit en moyenne $0,9^\circ$.

ALTITUDE DE LA LIGNE DE RIVAGE

L'altitude de la ligne de rivage varie très peu d'une combinaison à l'autre. L'écart maximal entre les moyennes est de 0,48 m. La ligne de rivage est la plus élevée pour les estrans de type 4, avec une moyenne de 3,34 m. Les plus basses sont observées sur les estrans vaseux et mixte, avec une moyenne de 2,86 m et 2,95 m respectivement.

RUGOSITE DE L'ESTRAN

La valeur moyenne des indices de rugosité « écart-type » varie entre 0,68 pour les estrans à dominante vaseuse, 0,88 pour les estrans mixtes, entre 0,97 et 1,03 pour les estrans à dominante rocheuse et entre 1,10 à 1,27 pour les estrans à dominante sableuse. Le deuxième indice de rugosité, la « moyenne quadratique », suit la même tendance.

ORIENTATION DE LA COTE

L'orientation de la côte est sensiblement la même sur l'ensemble du terrain d'étude, peu importe le type d'estran, soit entre NNW et NW. La seule exception est le type 4 (plage) qui est plus souvent orienté N à NNW.

4.2.3.3. VEGETATION AQUATIQUE

Il y a d'importantes différences au niveau de la couverture végétale sur le bas-estran et en avant-côte au sein même de chaque type d'estran. De plus, il n'y a pas de patron observé de la densité de végétation selon le type d'estran.

4.2.3.4. TAUX DE DEPLACEMENT

Les taux annuels moyens calculés pour l'intervalle 1993-2009 montrent que le tracé de la ligne de rivage de la majorité des types d'estrans est stable (Tableau 4.8). La seule exception concerne les estrans à dominante sableuse, qui tendent à reculer légèrement. Le taux de déplacement moyen de la ligne de rivage est de -0,17 m/an pour le type 5, et -0,21 m/an pour le type 4.

Tableau 4. 8 : Taux de déplacement annuel moyen de la ligne de rivage selon la combinaison.

Combinaison	1993-2009		2009-2012	
	Taux moyen (m/an)	Écart-type	Taux-moyen (m/an)	Écart-type
A1	-0,08	0,16	-0,35	1,17
A2	-0,09	0,19	-0,80	1,14
A3	-0,11	0,17	-0,75	1,04
A4	-0,21	0,25	0,16	1,52
A5	-0,17	0,20	-1,01	1,14
A7	0,00	0,23	-0,73	0,88
A8	-0,05	0,19	-0,69	1,16

En comparant ces résultats avec ceux de l'intervalle 2009-2012, on constate que la côte tend à reculer, sauf pour les estrans de type 4. Les résultats montrent que ce type tend en fait vers une accrétion plutôt que l'érosion à un rythme de 0,16 m/an, soit totalement l'opposé du résultat pour la période 1993-2009. Les taux de recul les plus importants se retrouvent pour les côtes ayant un estran de type 3, 2 et 5, avec un taux de déplacement de respectivement -0,75 m/an, -0,80 m/an et -1,01 m/an respectivement. Les écarts-types sont également beaucoup plus importants que pour la période 1993-2009, notamment pour la combinaison A4.

4.2.4. PAR CELLULE HYDROSEDIMENTAIRE

Cette sous-section présente les principaux résultats permettant de distinguer et de comparer chaque cellule hydrosédimentaire. L'ensemble des résultats de caractérisation comparant les sept cellules hydrosédimentaires composant le site d'étude peut être consulté à l'annexe VI.

4.2.4.1. COMPOSITION

Dans l'ensemble, les cellules sont en majorité composées par des estrans mixtes ou à dominante rocheuse. Les cellules de l'Anse-au-lard et de la baie de Mitis comprennent aussi une partie importante d'estrans à dominante vaseuse, ainsi que des estrans à dominante sableuse pour les estrans de la cellule de Saint-Ulric/Matane.

On retrouve une présence et une densité moyenne de dallage de blocs et de placage sédimentaire plus élevée pour les cellules de l'Anse-aux-Coques et Saint-Ulric/Matane. On observe aussi des placages sédimentaires de densité faible à élevée pour la cellule de Tartigou.

Les secteurs dans lesquels les affleurements de plate-forme rocheuse sont les moins présents sont dans les cellules de l'Anse-au-Lard et de Saint-Ulric/Matane. Les secteurs où les plates-formes dominant l'estran sont au sein des cellules de l'Anse-aux-Coques, baie de Mitis, Casse-Pierre, Sainte-Flavie et Tartigou.

4.2.4.2. MORPHOLOGIE

LARGEUR

La largeur totale et la largeur de la zone émergée de l'estran varient pour chaque cellule. La cellule de la baie de Mitis présente des estrans plus larges que dans les autres cellules avec une moyenne de 327 m. Les estrans dans la cellule de Tartigou, comprenant 36,3 % des profils du site d'étude, ainsi que ceux dans la cellule de Sainte-Flavie sont en moyenne plus étroits que sur le reste du terrain (respectivement 172 m et 187 m pour la largeur totale moyenne, contre 211 m à 238 m dans les autres cellules).

PENTE

Les pentes sont les plus fortes dans la cellule de Tartigou, avec une moyenne de 2,68 ° comparativement aux moyennes de pente des autres cellules qui varient entre 1,35 ° et 2,04 °. Les pentes moyennes les plus faibles se retrouvent dans les cellules de l'Anse-aux-Coques et de la baie de Mitis, ayant respectivement une moyenne de 1,35 ° et 1,53 °.

ALTITUDE DE LA LIGNE DE RIVAGE

L'altitude de la ligne de rivage varie très peu d'une cellule à l'autre. Un écart maximal de 0,32 m entre les moyennes a été mesuré. L'altitude moyenne la plus basse est de 2,96 m, retrouvée dans la cellule de Saint-Ulric/Matane. L'altitude moyenne la plus élevée s'élève à 3,28 m, retrouvée dans la cellule de Casse-Pierre.

RUGOSITE

Les moyennes de l'indice de rugosité « écart-type » varient entre 0,80 et 1,01. Les valeurs les plus faibles correspondent aux estrans des cellules de la baie de Mitis, de l'Anse-aux-Coques et de Sainte-Flavie, dont les moyennes tournent autour de 0,80 à 0,88. Les valeurs les plus élevées se retrouvent dans les cellules de Casse-Pierre et de Tartigou.

Les moyennes de l'indice de rugosité « moyenne quadratique » varient entre 0,89 et 1,18. Le résultat de l'autre indice varie dans le même ordre de grandeur pour chaque cellule.

ORIENTATION

L'orientation de la côte est généralement la même pour toutes les cellules, soit NW à NNW. Pour ce qui est de l'orientation des strates de la plate-forme rocheuse, on note quelques différences. La cellule de l'Anse-aux-Coques est la seule à présenter des strates orientées vers le NW à WNW. Les strates des plates-formes présentes dans les cellules de l'Anse-au-Lard, de Sainte-Flavie, de Saint-Ulric/Matane et de Tartigou tendent en majorité vers le NW à NNW. Les cellules de la baie de Mitis et de Casse-Pierre présentent des strates sur les plates-formes qui sont orientées principalement vers le N à NNW.

4.2.4.3. DEPLACEMENT DE LA COTE ET DEGRE D'ANTHROPISATION

On peut observer des différences marquées entre les moyennes de taux de déplacement selon la cellule hydrosédimentaire et entre les deux périodes. Les cellules de l'Anse au Lard et de Métis-sur-Mer sont celles qui ont subi le plus de recul de la côte entre 1993 et 2009, alors que pour l'autre période, ce sont les cellules de l'Anse aux Coques et de l'Anse au Lard qui sont les plus touchées (tableau 4.9). Le tableau 4.9 fait état des taux annuels de déplacement moyen de la côte dans chaque cellule pour les périodes 1993-2009 et 2009-2012, ainsi que de la proportion de côte zonée « naturelle ».

Il ne semble pas y avoir de lien apparent entre la proportion de zone « naturelle » et le taux de déplacement. Par exemple, nous pouvons remarquer que les cellules de Tartigou et de Métis-sur-Mer ont approximativement la même proportion de côte naturelle, mais le déplacement moyen est très différent entre les deux. En effet, le recul de la côte enregistré

entre 1993 et 2009 pour la cellule de Métis-sur-Mer est plus de deux fois plus important que celui de la cellule Tartigou, alors qu'il se produit l'inverse pour la période entre 2009 et 2012. Les analyses statistiques (chapitre 5) permettront de confirmer s'il existe une relation entre le degré d'anthropisation et le déplacement de la côte.

Tableau 4. 9 : Taux de déplacement annuel moyen et degré d'anthropisation par cellule hydrosédimentaire.

Cellule hydro.	1993-2009		2009-2012		Segment naturel
	Taux moyen (m/an)	Écart-type	Taux-moyen (m/an)	Écart-type	Proportion (%)
Anse-aux-Coques	0,00	0,24	-1,10	1,25	16,50 %
Anse-au-Lard	-0,26	0,30	-0,93	0,90	62,00 %
Baie de Mitis	-0,03	0,19	-0,45	0,87	55,20 %
Casse-Pierre	-0,09	0,15	-0,34	1,04	76,40 %
Métis-sur-Mer	-0,18	0,16	-0,22	0,81	75,10 %
Sainte-Flavie	-0,04	0,13	-1,55	1,08	24,00 %
Saint-Ulric / Matane	-0,08	0,17	-0,92	1,31	48,40%
Tartigou	-0,09	0,17	-0,73	1,04	73,70 %

4.2.5. PAR SITE SPECIFIQUE

En jumelant les caractéristiques descriptives et morphologiques des sites spécifiques, quelques sites peuvent être rassemblés en sous-groupes : 1) les sites 1, 7 et 9 ; 2) les sites 2 et 3 ; 3) les sites 4 et 10. Les sites 5, 6 et 8 possèdent des particularités sur des aspects différents de leur morphologie qui les rendent uniques. Le résultat détaillé des caractéristiques morphométriques de chacun des sites est présenté à l'annexe VI. Pour consulter les cartes de chaque site, voir l'annexe I.

4.2.5.1. SOUS-GROUPE 1 : LES SITES 1, 7 ET 9

COMPOSITION

Les sites 1 et 9 sont constitués d'estrans de type 3, tandis que le site 7 est constitué d'estrans de type 8. La lithologie de ces trois sites est composée du *Mélange de Cap-Chat 1*. Des dallages de blocs et des zones de dépôts sédimentaires sont présents de manière sporadique avec en moyenne une densité faible pour le dallage. Pour ce qui est des placages sédimentaires, leur densité est moyenne pour les sites 1 et 7, et faible pour le site 9.

Aussi, les estrans 1 et 9 sont caractérisés par une plate-forme rocheuse couvrant entre 50 % et 75 % de l'estran et une densité d'algues généralement faible à moyenne et de manière continue. Pour le site 7, les algues en avant-côte s'étendent sur une surface continue de moins de 30 m de largeur ou de manière sporadique sur 50 m à 100 m de largeur.

MORPHOLOGIE

Leur morphologie se distingue nettement des autres sous-groupes de par les plus fortes pentes, et par leur aspect très réfléchif face aux vagues (Figures 4.14, 4.15 et 4.16). Les sites 1, 7 et 9 ont respectivement une pente moyenne de $3,06^\circ$, $3,91^\circ$ et $4,24^\circ$. Les indices de rugosité « moyenne quadratique » sont les plus élevés pour ces sites, et les indices de rugosité « écart-type » sont parmi les cinq plus élevés. Les sites sont respectivement décrits par une rugosité moyenne de 1,34, 1,38 et 1,50 pour l'indice « moyenne quadratique ».

Quant à leur largeur totale, les sites 7 et 9 sont les plus étroits des sites spécifiques avec une moyenne de 99,0 m et 76,0 m de largeur respectivement. La largeur moyenne des estrans du site 1 est également relativement faible (127,7 m). Cependant, la largeur du haut-estran varie entre 19 m et 32 m avec une pente moyenne de $6,00^\circ$, soit un haut-estran en moyenne beaucoup plus large et moins abrupt que les autres sites où les données sont disponibles (site 2 à 6).

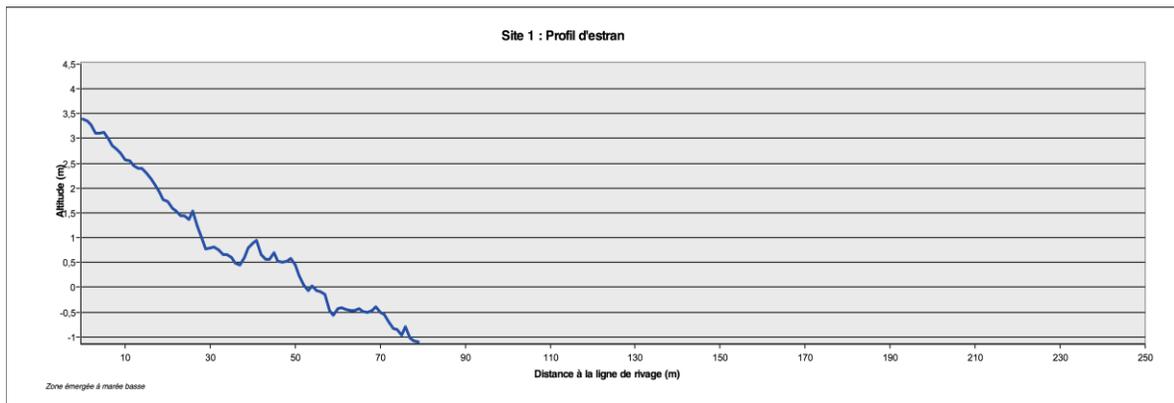


Figure 4. 14 : Exemple de profil d'estran représentant la morphologie moyenne du site 1.

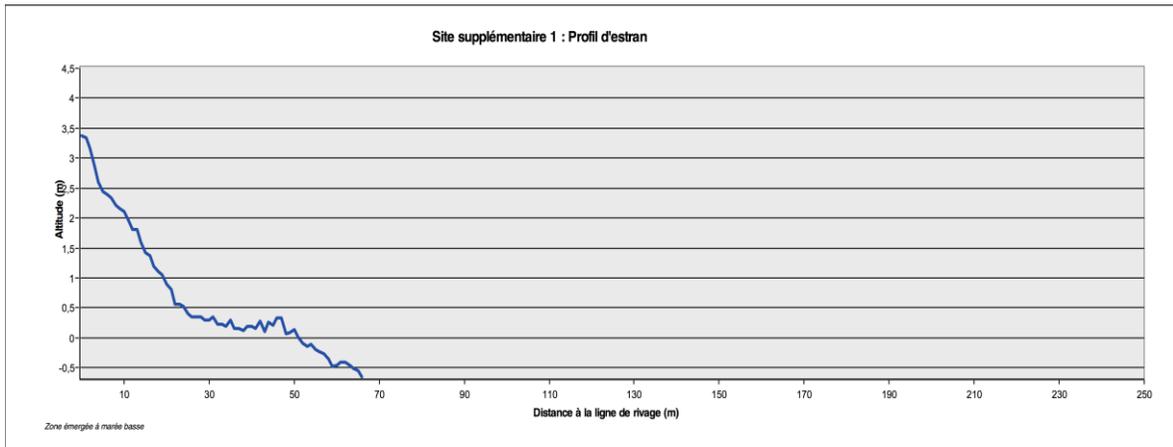


Figure 4. 15 : Exemple de profil d'estran représentant la morphologie moyenne du site 7.

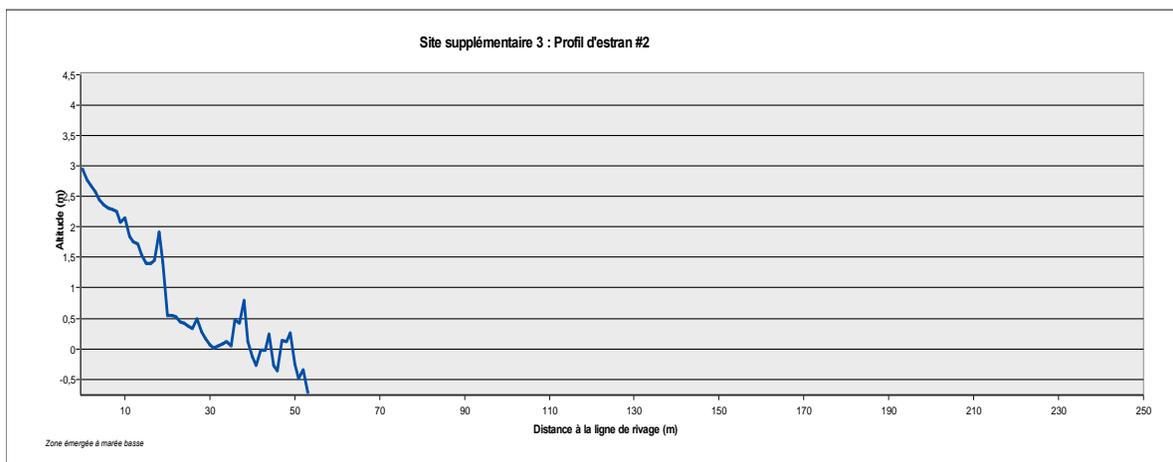


Figure 4. 16 : Exemple de profil d'estran représentant la morphologie moyenne du site 9.

TAUX DE DEPLACEMENT DE LA COTE

Les sites 1, 7 et 9 représentent les côtes ayant enregistré les déplacements négatifs (érosion) les plus élevés pour la période 1993-2009. Le taux de déplacement moyen de chacun est égal respectivement à -0,27 m/an, -0,15 m/an et -0,21 m/an (tableau 4.10, 4.11 et 4.12).

La ligne de rivage des sites 1, 7 et 9 tendent à s'éroder pour les deux périodes (tableau 4.10 à 4.12). Toutefois, on note un taux de recul beaucoup plus important durant l'intervalle 2009-2012. Notamment, le recul le plus important pour le site 1 durant ces trois années est de -9,08 mètres, ce qui est considérable. D'ailleurs, les reculs les plus importants se retrouvent sur le site 1.

Tableau 4. 10 : Statistiques descriptives sur le déplacement de la côte au site 1.

Intervalle	1993-2009	2009-2012
Taux de déplacement annuel moyen (m/an)	-0,27	-1,17
Écart-type du taux annuel	0,10	1,14
Recul maximal total (m)	-6,75	-9,08

Tableau 4. 11 : Statistiques descriptives sur le déplacement de la côte au site 7.

Intervalle	1993-2009	2009-2012
Taux de déplacement annuel moyen (m/an)	-0,15	-0,53
Écart-type du taux annuel	0,10	0,46
Recul maximal total (m)	-5,83	-4,58

Tableau 4. 12 : Statistiques descriptives sur le déplacement de la côte au site 9.

Intervalle	1993-2009	2009-2012
Taux de déplacement annuel moyen (m/an)	-0,21	-0,51
Écart-type du taux annuel	0,08	0,51
Recul maximal total (m)	-5,76	-3,74

4.2.5.2. SOUS-GROUPE 2 : LES SITES 2 ET 3

COMPOSITION

La composition des sites 2 et 3 est assez similaire. Les sites 2 et 3 sont tous deux constitués d'un estran à dominante rocheuse de type 2. La lithologie du roc sous-jacent est composée de chert, de claystone calcaireux et de calcilutite, constitution associée à la *formation des Landes* (MERN, 2015). La plate-forme rocheuse affleure sur une superficie moyenne entre 50 % et 75 % de l'estran, et parfois plus de 75 % par endroit.

Des zones de dépôts (placages) sédimentaires sont présentes de manière sporadique, surtout dans les creux de la plate-forme rocheuse, avec une densité faible à moyenne (tableau 4.10). Les dallages de blocs ont une couverture faible à nulle pour le site 2, mais sont absents du site 3. Quant à la couverture d'algues, elle s'étend généralement sur une superficie non-continue à continue sur plus de 100 m de largeur pour le site 2, et une surface continue sur près de 100 m de largeur sur le site 3.

MORPHOLOGIE

La morphologie de la plate-forme qui les compose est assez similaire. La morphologie de leur plate-forme se distingue de celle des autres sites parce qu'elle est relativement subhorizontale et se termine par une rupture de pente semi-abrupte avec un court palier à leur extrémité (Figure 4.17 et 4.18).

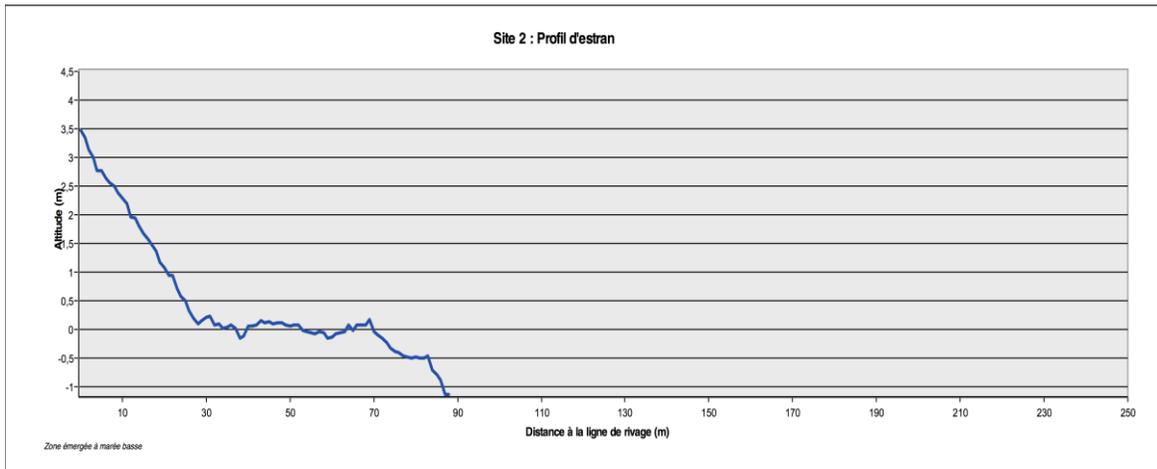


Figure 4. 17 : Exemple de profil d'estran représentant la morphologie moyenne du site 2.

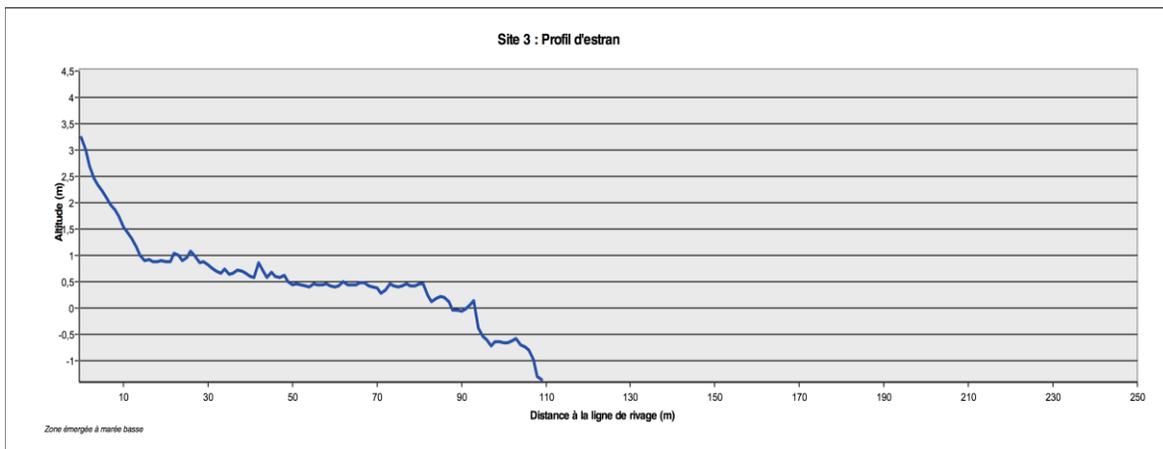


Figure 4. 18 : Exemple de profil d'estran représentant la morphologie moyenne du site 3

La pente de l'estran des sites 2 et 3 varie faiblement, avec une moyenne respective de $2,64^\circ$ et $2,00^\circ$ dont leur écart-type correspond à $0,45^\circ$ et $0,34^\circ$. La largeur haut-estran varie entre 9 m et 29 m avec une pente moyenne de $6,70^\circ$. Quant au bas-estran, il varie entre 49 m et 134 m avec une pente moyenne de $1,53^\circ$.

L'indice de rugosité de l'estran « écart-type » est classé de faible à élevé pour les deux sites, alors que l'indice « moyenne quadratique » est classé de faible à élevé pour le site 2 et faible pour le site 3. Leur valeur moyenne respective est de 1,10 et 1,14 pour le site 2 et de 0,83 et 0,95 pour le site 3.

Deux éléments distinguent le site 2 du site 3. D'abord, l'estran et le haut-estran sont plus étroits sur le site 2. Ce dernier s'étend en moyenne sur 138 m jusqu'à un maximum de 144 m, alors que sur le site 3, il couvre en moyenne 158 m de largeur, et s'étend jusqu'à un maximum de 178 m.

Le deuxième élément concerne l'élévation moyenne de la plateforme. La plate-forme, située sur le bas-estran sur le site 3 est surélevée d'environ 0,5 m à 1,0 m par rapport à celle du site 2 (Figure 4.17 et 4.18). Par contre, l'altitude de la ligne de rivage y est plus basse que le site 2, avec une moyenne de 3,23 m d'altitude pour le site 2, et de 2,87 m d'altitude pour le site 3.

TAUX DE DEPLACEMENT DE LA COTE

Les tendances concernant le déplacement de la côte diffèrent pour la période 1993-2009 puisque le site 2 montre un faible recul de la côte, alors que le site 3 est resté relativement stable, avec des taux de déplacement mesurés de $-0,10$ m/an et $-0,001$ m/an respectivement (Tableau 4.13 et 4.14). Cependant, les deux sites tendent de manière plus importante à une érosion de la côte pour la période 2009-2012. Pour ces deux sites, le recul le plus important durant ces trois années est de $-8,57$ m et $-7,06$ m, mais le taux de déplacement moyen est de $-0,82$ m/an et $-0,71$ m/an respectivement.

Tableau 4. 13 : Statistiques descriptives sur le déplacement de la côte au site 2.

Intervalle	1993-2009	2009-2012
Taux de déplacement annuel moyen (m/an)	-0,10	-0,82
Écart-type du taux annuel	0,14	1,39
Recul total maximal (m)	-3,18	-8,57

Tableau 4. 14 : Statistiques descriptives sur le déplacement de la côte au site 3.

Intervalle	1993-2009	2009-2012
Taux de déplacement annuel moyen (m/an)	-0,001	-0,71
Écart-type du taux annuel	0,12	0,87
Recul total maximal (m)	-3,38	-7,06

4.2.5.3. SOUS-GROUPE 3 : LES SITES 4 ET 10

Les sites 4 et 10 sont très différents en termes de composition, mais leur morphologie est très similaire, s'apparentant à un estran dissipatif. Ils se distinguent des autres sites par leur très grande étendue ($L_{tot\ moyenne} > 200$ m)

COMPOSITION

Le site 4 est constitué d'un estran mixte de type 8 et le site 10 est constitué d'un estran à dominante rocheuse de type 2. Le site 4 comporte quelques zones de dallages de blocs d'une densité faible à moyenne, ainsi que des zones de placages sédimentaires de densité élevée couvrent la majorité du bas-estran. Pour le site 10, il ne comprend que

quelques dallages épars, uniquement dans la zone NE du site, et des zones de placage sédimentaire de densité moyenne suivant les creux formés par la plate-forme rocheuse (voir la carte à l'Annexe I).

La lithologie du site 4 est composée de grès, de mudrock et de calcaire, formant le *mélange de Cap-Chat 2* (MERN, 2015). Quatre affleurements de la plate-forme rocheuse couvrent environ le quart de la surface de l'estran du site 4. Quant au site 10, il est composé de mudstone, de siltstone, de grès et de calcaire, un mélange constituant la *formation de l'Original 1* (MERN, 2015). La plate-forme compose plus de 50% de l'estran, soit deux fois plus que le site 4.

Les algues au bas-estran et en avant-côte recouvrent sporadiquement entre 30 m et 100 m de largeur au site 4, tandis qu'elles sont quasi continues sur moins de 50 m de largeur au site 10.

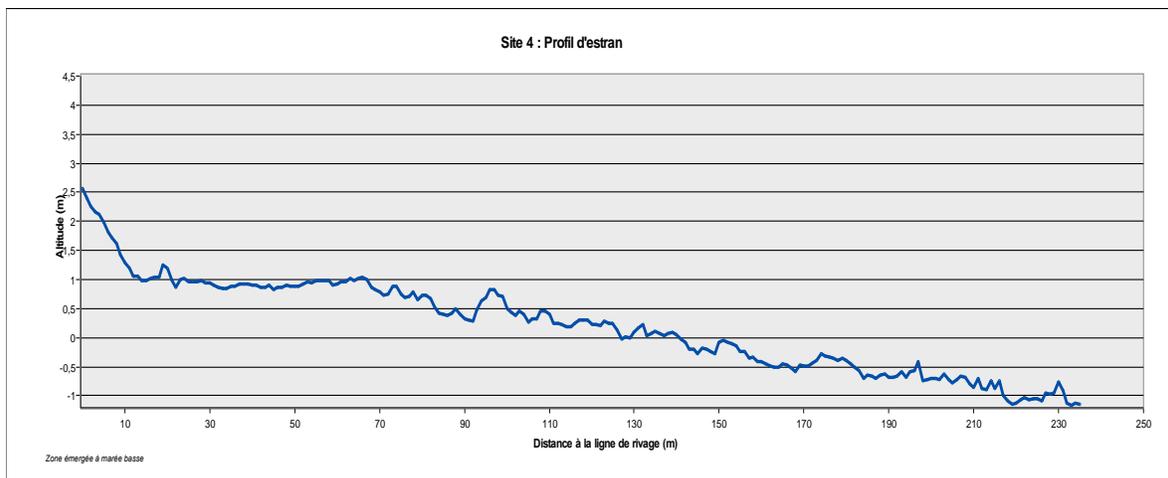


Figure 4. 19 : Exemple de profil d'estran représentant la morphologie moyenne du site 4

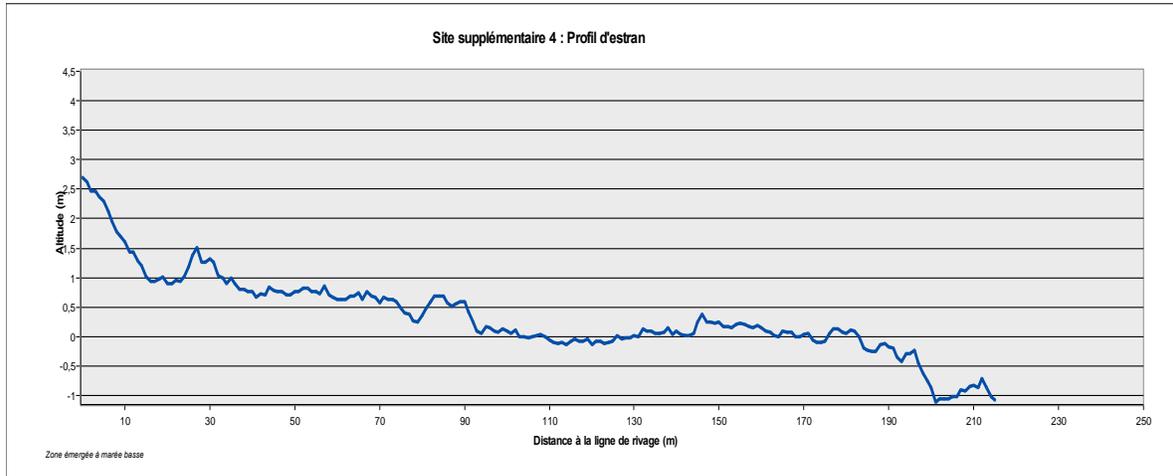


Figure 4. 20 : Exemple de profil d'estran représentant la morphologie moyenne du site 10.

MORPHOLOGIE

Du point de vue hydrodynamique, les sites 4 et 10 peuvent être décrits dans leur ensemble comme des estrans dissipatifs de par leur grande étendue et leur faible pente. En effet, ces estrans s'étendent sur 365 m et 220 m en moyenne jusqu'à un maximum de 443 m et 246,5 m respectivement. Le site 4 représente l'estran le plus large parmi les sites sélectionnés.

La pente de l'estran varie autour de $0,97^\circ$, mais présente aussi des extrêmes allant à $4,06^\circ$ pour le site 4. À l'opposé, la pente de l'estran du site 10 est pratiquement homogène avec une moyenne de $1,21^\circ$ avec une pente maximale de $1,38^\circ$ et un écart-type de $0,12^\circ$.

De plus, sur le site 4, la largeur du haut-estran varie entre 6,7 m et 24 m avec une pente moyenne de $6,61^\circ$. Quant à son bas-estran, il varie entre 174 m et 356 m avec une pente moyenne de $0,52^\circ$.

La ligne de rivage est similaire pour les deux sites. Elle s'élève en moyenne à 2,74 m et 2,98 m d'altitude respectivement.

Les indices de rugosité de l'estran (R_{std} et R_{rms}) varient beaucoup à l'intérieur même des sites. Leur valeur moyenne respective est de 0,75 et 0,81 pour le site 4, puis 0,75 et 0,85 pour le site 10.

TAUX DE DEPLACEMENT DE LA COTE

Contrairement aux précédents sous-groupes, la ligne de rivage des sites 4 et 10 est restée assez stable, avec en moyenne une légère accrétion, durant la période 1993-2009. Toutefois, on observe une grande opposition des résultats entre ces deux sites pour l'autre période. D'un côté, contrairement aux autres sites spécifiques étudiés, le site 4 a moins été sujet à l'érosion durant la période 2009-2012 (Tableau 4.15). En effet, le recul le plus important après ces trois années est de -2,27 m et le taux de déplacement moyen est de -0,36 m/an. Quant au site 10, le recul maximal mesuré pour la période 2009-2012 est de -10,4 m, ce qui est considérablement élevé, avec un taux de déplacement moyen record de -2,15 m/an (Tableau 4.16).

Tableau 4. 15 : Statistiques descriptives sur le déplacement de la côte au site 4.

Intervalle	1993-2009	2009-2012
Taux de déplacement annuel moyen (m/an)	0,09	-0,36
Écart-type du taux annuel	0,13	0,78
Recul total maximal (m)	-2,59	-2,27

Tableau 4. 16 : Statistiques descriptives sur le déplacement de la côte au site 10.

Intervalle	1993-2009	2009-2012
Taux de déplacement annuel moyen (m/an)	0,03	-2,15
Écart-type du taux annuel	0,12	0,92
Recul total maximal (m)	-2,97	-10,40

4.2.5.4. SITE 5

COMPOSITION

Le site 5 est constitué d'un estran à dominante rocheuse de type 2, dont la lithologie est composée de grès, de mudrock et de calcaire, formant le *mélange de Cap-Chat 2*. Il ne comporte aucun dallage de blocs, mais des zones de placages sédimentaires sont observables sporadiquement et ont une densité généralement faible. Aussi, la plate-forme rocheuse représente plus de 75 % de l'estran. Par ailleurs, la végétation aquatique s'étend sur plus de 100 m de largeur de manière quasi continue.

MORPHOLOGIE

Le site 5 est principalement caractérisé par une plate-forme convexe présentant un écueil rocheux important (près de 1 m d'élévation) sur une portion de sa partie distale, suivi d'un replat (Figure 6.21). L'estran couvre en moyenne 174 m de largeur, et s'étend jusqu'à un maximum de 194 m. La pente de l'estran varie autour de 1,78 °, mais présente aussi des extrêmes allant à 4,93 °. La largeur du haut-estran varie entre 5 m et 9 m avec une pente moyenne de 6,86 °. Quant au bas-estran, il varie entre 94 m et 159 m avec une pente moyenne de 0,89 °. Par ailleurs, la ligne de rivage s'élève en moyenne à 2,70 m d'altitude.

Les indices de rugosité de l'estran varient beaucoup à l'intérieur même du site, mais en général, ils sont classés comme moyenne par rapport aux autres sites. Leur valeur moyenne respective est de 0,86 et 0,96.

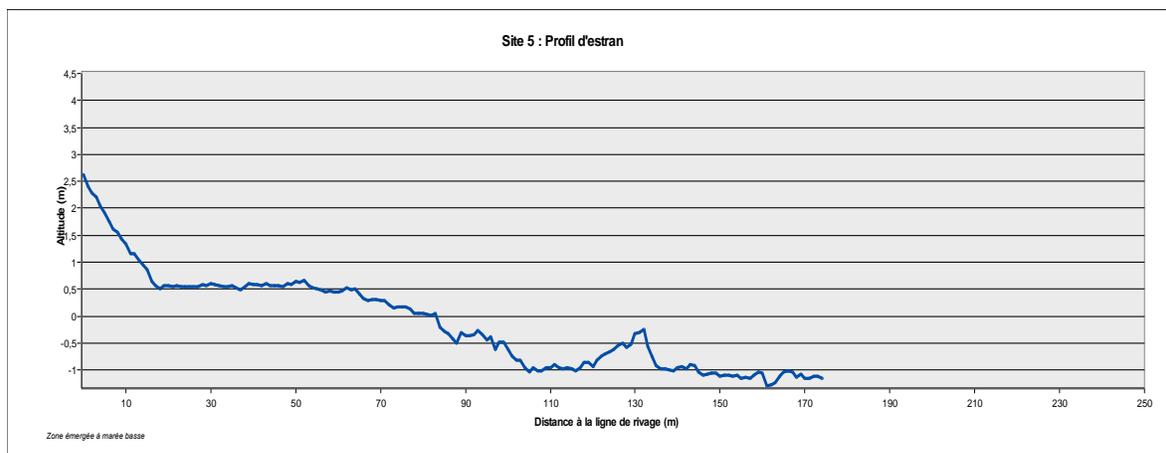


Figure 4. 21 : Exemple de profil d'estran représentant la morphologie moyenne du site 5.

TAUX DE DEPLACEMENT DE LA COTE

Tout comme les sites 4 et 10, la ligne de rivage du site 5 était en accrétion durant la période 1993-2009 avec une avancée moyenne de 0,11 m/an (Tableau 4.17). La progradation la plus importante est de 4,96 m durant cette période. Cette tendance s'est inversée à la période 2009-2012 où l'on note un taux de déplacement moyen de -1,34 m/an.

Tableau 4. 17 : Statistiques descriptives sur le déplacement de la côte au site 5.

Intervalle	1993-2009	2009-2012
Taux de déplacement annuel moyen (m/an)	0,11	-1,34
Écart-type du taux annuel	0,12	0,45
Recul total maximal (m)	-1,24	-5,65

4.2.5.5. SITE 6

COMPOSITION

Le site 6 est constitué d'un estran mixte de type 8 dont la lithologie est constituée de la *formation de l'Original 2*. Il est principalement composé de dallage de blocs et de placage sédimentaire de densité élevée. Aucune plate-forme rocheuse n'est visible à la surface. La végétation aquatique s'étend de manière sporadique sur une largeur variant entre 30 m et 100 m.

MORPHOLOGIE

L'estran du site 6, s'apparentant à un estran dissipatif, s'étend en moyenne sur 263 m de largeur jusqu'à un maximum de 311 m, ce qui en fait le deuxième plus large estran des sites spécifiques. La pente de l'estran est très faible, variant autour de 1,21 °, avec un écart-type de 0,73 °. La largeur du haut-estran est assez homogène, variant entre 5,7 m et 7,4 m, et possède une pente moyenne de 0,43 °. Quant au bas-estran, il varie entre 140 m et 190 m avec une pente moyenne de 0,43 °. La ligne de rivage s'élève en moyenne à 2,81 m d'altitude, alors que la ligne de flexure s'élève en moyenne à 0,12 m d'altitude, soit pratiquement au niveau du zéro topographique.

Les indices de rugosité de l'estran sont généralement classés comme faible à moyenne par rapport aux autres sites. Leur valeur moyenne respective est de 0,80 et 0,85. La figure 4.22 présente un profil typique du site 6.

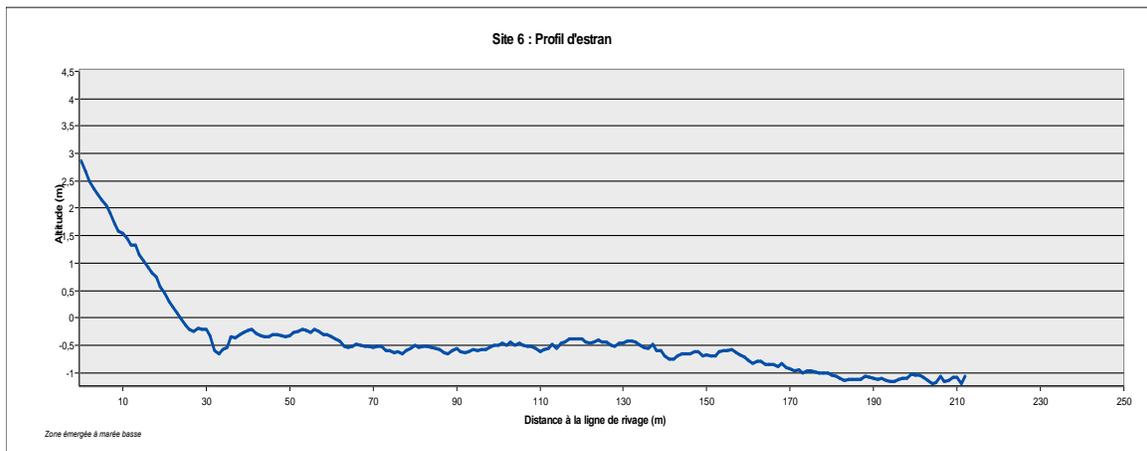


Figure 4. 22 : Exemple de profil d'estran représentant la morphologie moyenne du site 6.

TAUX DE DEPLACEMENT DE LA COTE

La ligne de rivage du site 6 est restée relativement stable durant la période 1993-2009, avec un taux de déplacement moyen de -0,04 m/an (Tableau 4.18). Cette tendance s'est légèrement accentuée durant la période 2009-2012 où l'on note un taux de déplacement moyen de -0,81 m/an. Des reculs extrêmes ont été mesurés à quelques endroits, dont le maximum correspond à -9,21 m en trois ans.

Tableau 4. 18 : Statistiques descriptives sur le déplacement de la côte au site 6.

Intervalle	1993-2009	2009-2012
Taux de déplacement annuel moyen (m/an)	-0,04	-0,81
Écart-type du taux annuel	0,09	0,71
Recul total maximal (m)	-3,26	-9,21

4.2.5.6. SITE 8

COMPOSITION

Le site 8 est constitué d'un estran à dominante rocheuse de type 2. Des dallages de blocs et des zones de placage sédimentaire de densité faible parsèment l'estran tout le long du site.

La lithologie du roc sous-jacent est composée de grès feldspathique, de mudslate et de mudrock, constituant la *formation de Tourelle 1* (MERN, 2015). La plate-forme est visible au travers des placages sédimentaires sur l'ensemble du site et compose plus de 50 % de l'estran.

La couverture végétale aquatique est très mince et généralement clairsemée. Elle s'étend en moyenne sur moins de 50 m de largeur.

MORPHOLOGIE

L'estran du site 8 est assez étroit et abrupt, ressemblant au site 7, mais se distingue des autres sites de par sa morphométrie beaucoup plus variable le long du site (voir Annexe I pour la carte du site). Il s'étend en moyenne sur 117 m de largeur, et s'étend jusqu'à un maximum de 175 m. La pente de l'estran varie autour de 2,92 °, avec un écart-type de 0,47 °. La ligne de rivage s'élève en moyenne à 3,48 m d'altitude.

Les indices de rugosité de l'estran varient beaucoup à l'intérieur même du site et indiquent un estran très rugueux. Leur valeur moyenne respective est de 1,06 et 1,25. Les figures 4.23 et 4.24 présentent des profils typiques du site 8, illustrant bien l'irrégularité de la topographie le long du profil, mais aussi sa variabilité dans l'espace.

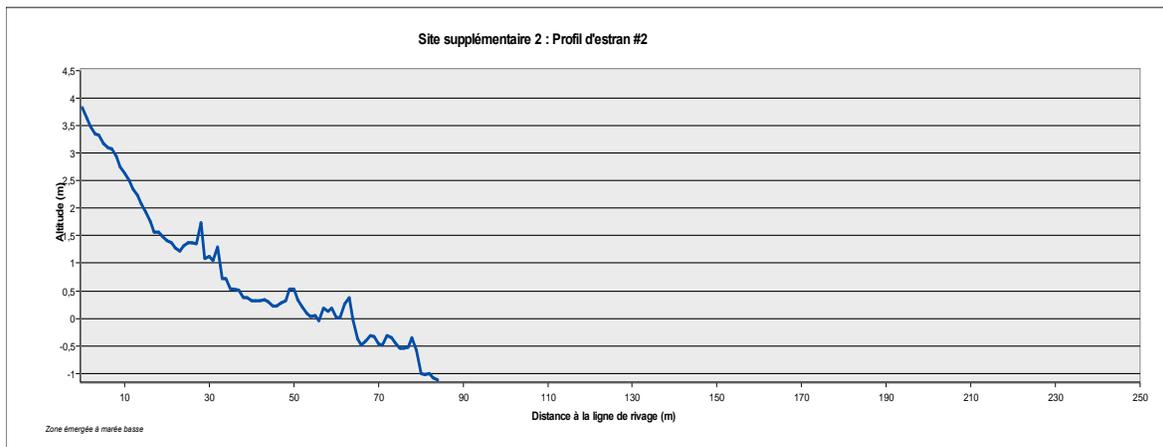


Figure 4. 23 : Exemple de profil d'estran représentant la morphologie moyenne du site 8 là où le profil traverse des écueils rocheux.

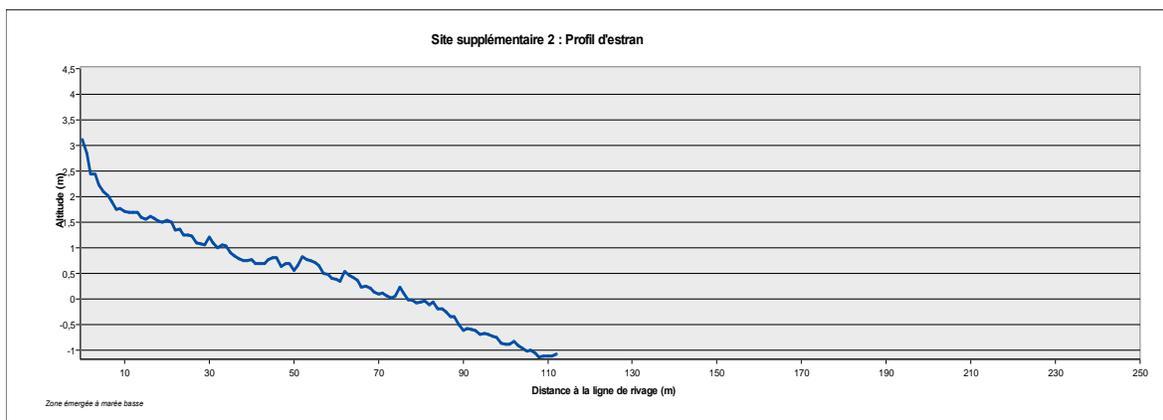


Figure 4. 24 : Exemple de profil d'estran représentant la morphologie moyenne du site 8 là où le profil correspond à une plate-forme rocheuse ayant une topographie plus régulière.

TAUX DE DEPLACEMENT DE LA COTE

La ligne de rivage du site 8 semble relativement stable avec une légère tendance au recul pour les deux périodes (Tableau 4.19). Contrairement aux autres sites spécifiques, on observe un recul moyen plus faible en 2009-2012 que durant la période 1993-2009 (respectivement -0,07 m/an et -0,03 m/an). Toutefois, les reculs maxima mesurés pour ces deux périodes sont assez importants, soit respectivement de -6,72 m et -4,36 m.

Tableau 4. 19 : Statistiques descriptives sur le déplacement de la côte au site 8.

Intervalle	1993-2009	2009-2012
Taux de déplacement annuel moyen (m/an)	-0,07	-0,03
Écart-type du taux annuel	0,16	0,96
Recul total maximal (m)	-6,72	-4,36

CHAPITRE 5

ANALYSES STATISTIQUES

Dans ce chapitre est détaillée la deuxième partie des résultats de recherche présentés en trois volets. D'abord, il s'agit de la présentation des résultats d'analyses exploratoires, ayant pour objectif principal d'identifier les caractéristiques descriptives et morphométriques des estrans ayant une influence sur le taux de déplacement de la côte (section 5.1). S'en suit des résultats d'analyses avancées qui consistent à évaluer les relations existant entre le taux de déplacement de la côte et les caractéristiques morphométriques de l'estran (section 5.2), et ce, pour l'ensemble des profils du site et pour tous les groupes de données rassemblés par type de côte et par combinaison à l'échelle de l'ensemble du site (5.2.1), à l'échelle d'une cellule hydrosédimentaire (section 5.2.2, 1- tout type de côte et d'estran confondus et 2- subdivisée par combinaison) et à l'échelle d'un site spécifique (section 5.2.3). Il faut noter que seules les combinaisons associées au type de côte à terrasse de plage (préfixe « A ») seront analysées en raison de la sous-représentation des autres types de côtes sur le site d'étude. Enfin, ce chapitre se terminera par les analyses comparatives des combinaisons, des échelles spatiales et des périodes temporelles analysées (section 5.3). La comparaison entre les combinaisons consiste à coupler les caractéristiques descriptives identifiées dans la section 5.1 avec les illustrations de chaque régression linéaire produite dans la section 5.2 dans le but de cerner une ou plusieurs caractéristiques descriptives pouvant contribuer à l'explication des relations identifiées entre le taux de déplacement et la morphométrie de l'estran. Les analyses comparatives des échelles spatiales et temporelles permettront de mettre en évidence les similitudes et les différences entre les périodes étudiées, en plus de vérifier si les résultats obtenus et les tendances observées se reproduisent à chaque échelle spatiale.

5.1. ANALYSES EXPLORATOIRES

5.1.1. DISTRIBUTION DES DONNEES QUANTITATIVES

La distribution des données pour chaque variable quantitative est illustrée sous forme d'histogrammes de fréquence et détaillée dans les tableaux présentés à l'annexe VII. Les distributions des données morphométriques et des taux de déplacement sont présentées pour l'ensemble du site d'étude aux figures 5.1 et 5.2. Étant donné que les histogrammes présentant la distribution des données morphométriques de base et supplémentaires du secteur de Baie-des-Sables à Matane sont similaires à ceux de l'ensemble du site d'étude, ils ont été placés à l'annexe VII afin d'alléger le texte.

La distribution des données des variables associées aux mesures de déplacement est relativement normale avec parfois une légère asymétrie vers la droite (Figure 5.1). La distribution des données de la majorité des variables associées aux caractéristiques morphométriques des estrans est asymétrique et, dans certains cas, comporte un palier plus ou moins important situé après la pente descendante de la courbe de distribution (Figure 5.2). Les seules caractéristiques morphométriques ayant une distribution normale à relativement normale sont l'altitude de la ligne de rivage, la pente du haut estran, l'altitude de la ligne de flexure et l'altitude de la limite inférieure de la zone émergée du bas-estran (Figure 5.2).

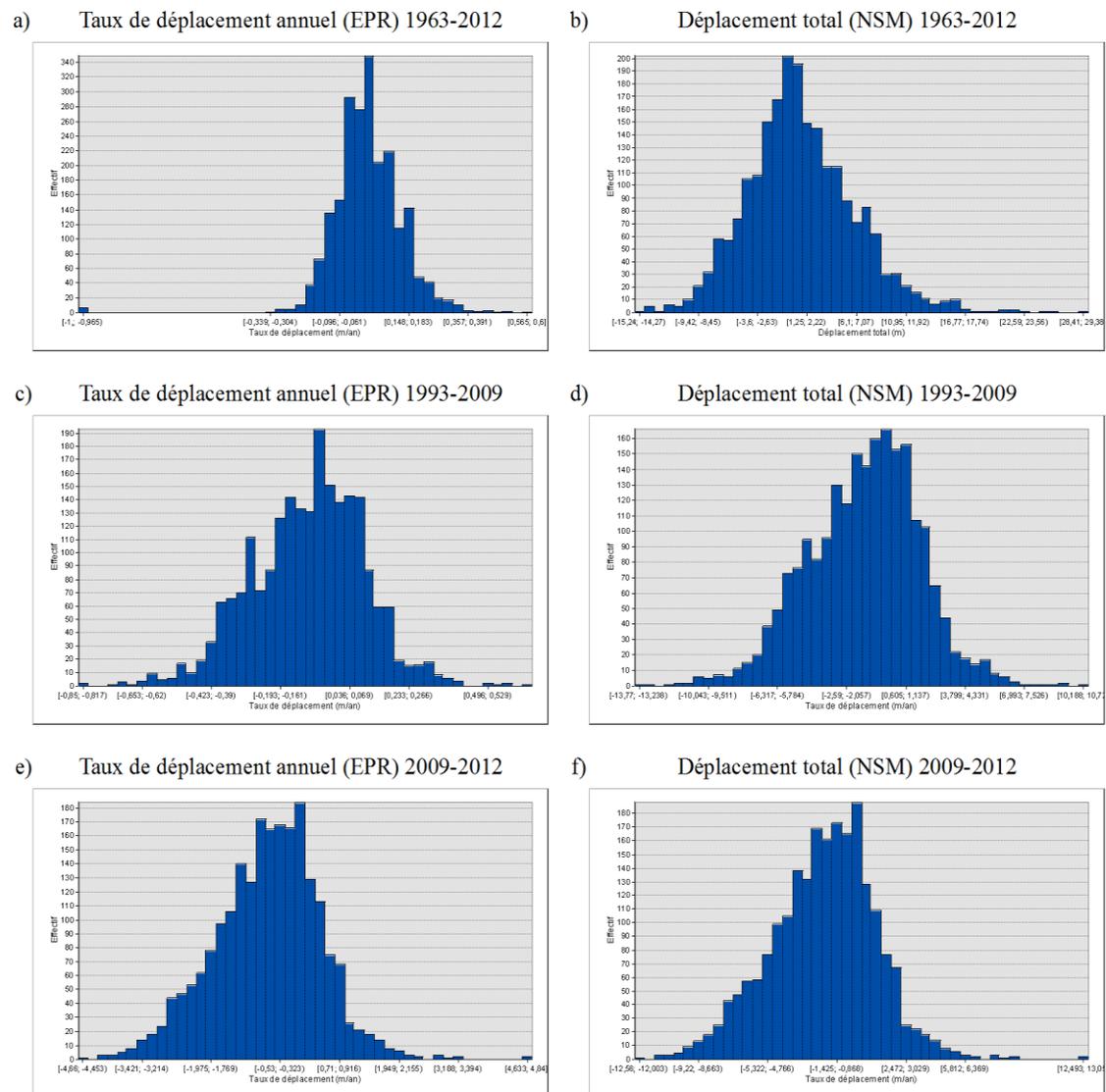


Figure 5. 1 : Histogramme de fréquences pour les taux de déplacement annuel (EPR) et le déplacement total (NSM) de la côte, calculés sur l'ensemble du site d'étude (N = 2176 profils).

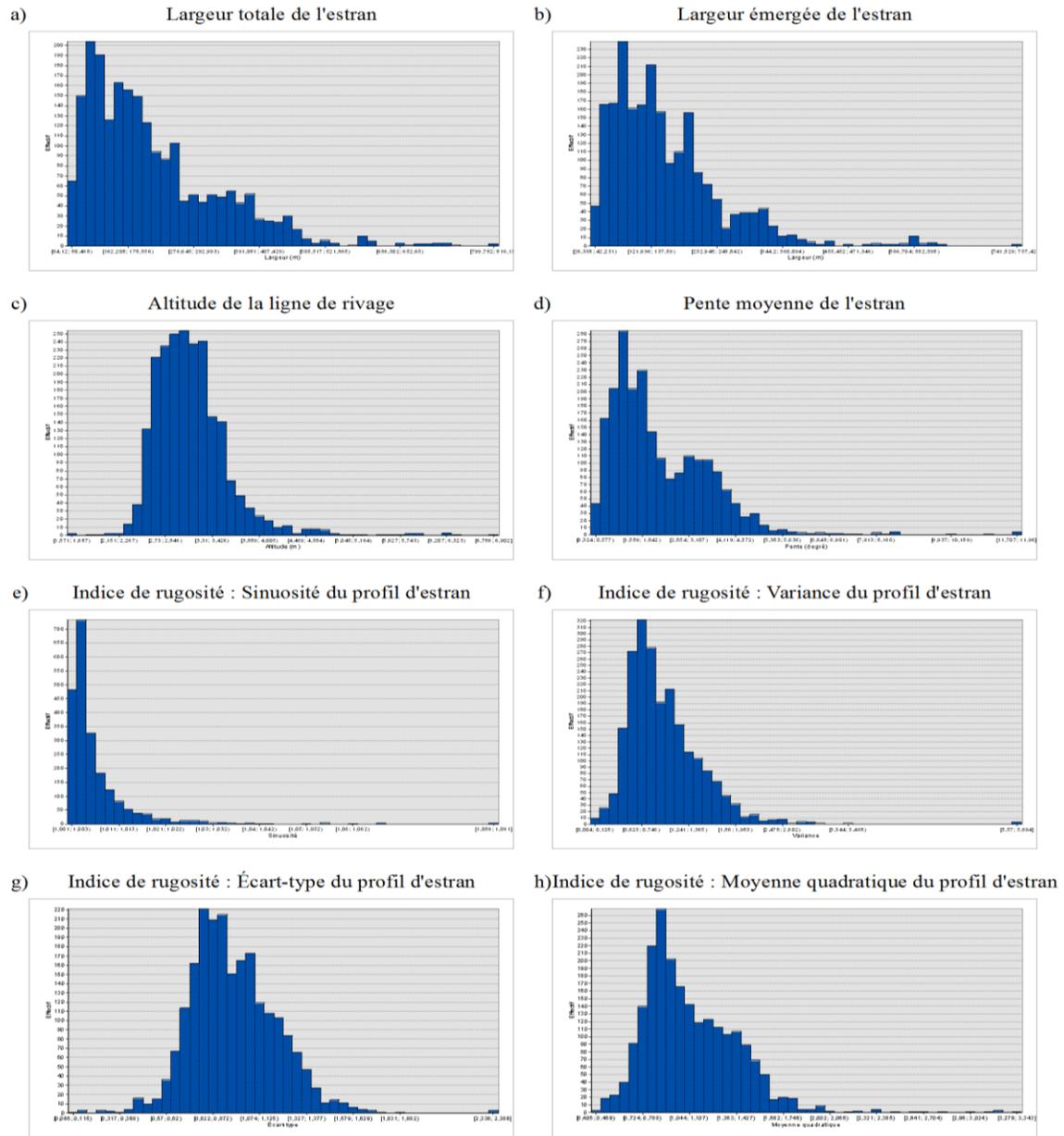


Figure 5. 2 : Histogramme de fréquence pour chacune des caractéristiques morphométriques calculées sur l'ensemble du site d'étude (N = 2176 profils).

5.1.2. RESULTATS DES ACP ET DES MATRICES DE CORRELATION DE SPEARMAN

D'après les résultats des analyses en composante principale (ACP), les caractéristiques morphométriques des estrans correspondant au 1^{er} facteur de l'ACP, expliquant le plus la variation dans les données, sont d'abord les indices de rugosité (principalement R_{std} , R_{var} et R_{rms}), puis la pente moyenne (S_{moy}) du côté positif de l'axe, suivi par la largeur totale et émergée de l'estran (L_{tot} et L_{em}) du côté négatif de l'axe. Les principales caractéristiques contribuant aux 2^e et 3^e facteurs de l'ACP sont les mesures d'orientation de la côte ($Orient_{cote}$) et des strates ($Orient_{pfr}$) de la plate-forme, ainsi que les mesures de taux de déplacement de la période 2009-2012 ($EPR_{2009-2012}$) pour le 2^e facteur, et 1993-2009 ($EPR_{1993-2009}$) pour le 3^e facteur. Toutefois, les caractéristiques associées aux sites spécifiques contribuant le plus aux trois premiers facteurs sont difficiles à identifier et sont assez variables. L'annexe VIII présente un échantillon des tableaux et graphiques produits avec les ACP présentant les tendances générales observées sur la trentaine de groupes de données évalués dans le cadre de ces analyses. Pour des fins de fluidité à la lecture du texte, un échantillon représentatif de ces résultats a été placé en annexe en raison du nombre élevé de tableaux et de graphiques produits par les ACP.

Pour la grande majorité des groupes de données à l'échelle globale, régionale et sectorielle, les ACP montrent que les indices de rugosité (R_{sin} , R_{std} , R_{var} et R_{rms}), l'altitude de la ligne de rivage (H_{LR}) et la pente moyenne (S_{moy}) sont corrélés entre eux, et inversement corrélés avec la largeur totale et émergée (L_{tot} et L_{em}) de l'estran (voir Annexe VIII pour consulter les exemples).

De plus, ces mêmes analyses montrent globalement que les variables de largeur d'estran (totale et émergée) présentent les mêmes corrélations, mais la largeur émergée semble légèrement mieux expliquer la variabilité dans les données que la largeur totale. De plus, la largeur totale et la largeur émergée sont parfois bien corrélées (côte à terrasse de

plage, combinaison A2 à l'échelle globale et régionale, et cellule de Tartigou) avec le taux de déplacement de la période 1993-2009, et d'autres fois elles sont indépendantes de cette période (côte à falaise rocheuse) (voir Annexe VIII). La variation du taux de déplacement entre 2009 et 2012 est pratiquement toujours indépendante de la variation des caractéristiques morphologiques des estrans, probablement en raison du niveau d'eau élevé lors de la tempête extrême de décembre 2010.

Les ACP et les matrices de corrélation de Spearman montrent que les indices de rugosité « sinuosité » et « variance » (R_{sin} et R_{var}) sont fortement corrélés avec la pente de l'estran. Il en va de même pour les deux autres indices (R_{std} et R_{rms}), mais le degré de corrélation semble y est plus faible. Afin de réduire le biais dans l'interprétation des résultats de régressions linéaires avec les indices de rugosité, les calculs ont été fait uniquement avec les indices de rugosité « écart-type » (R_{std}) et « moyenne quadratique » (R_{rms}). Toutefois, il faudra tout de même rester prudent dans l'interprétation des résultats impliquant la rugosité de l'estran, cette variable semblant dépendante de la pente de l'estran.

Le résultat des matrices de corrélation de Spearman a permis de cibler les groupes de chaque ensemble de données à l'intérieur desquels on retrouve les coefficients de détermination (R^2) les plus élevés entre les deux périodes évaluées et les caractéristiques morphométriques. Pour chaque ensemble de données, les groupes présentant de fortes corrélations sont :

- Types de côte : Terrasse de plage ;
- Combinaisons : A1, A2, A3 et A7 ;
- Cellules hydrosédimentaires : Baie de Mitis et Tartigou ;
- Sites spécifiques : tous ont de forts coefficients sauf le site 4 et le site 9.

Afin de mieux cibler les variables expliquant les variations du taux de déplacement de la côte, les données des caractéristiques morphométriques identifiées suites aux ACP ont été regroupées en classes selon la méthode des seuils observés. Ces classes ont été utilisées comme troisième composante dans les graphiques illustrant les régressions linéaires.

Tableau 5. 1 : Caractéristiques morphométriques ciblées par les ACP, regroupées en cinq classes selon la méthode des seuils observés.

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
S_{moy} (°)	[0,00 – 1,45 [	[1,45 – 2,56 [	[2,56 – 3,85 [	[3,85 – 6,36 [	[6,36 – 11,97]
R_{rms}	[0,00 – 0,85 [	[0,85 – 1,12 [	[1,12 – 1,42 [	[1,42 – 2,02 [	[2,02 – 3,34]
R_{std}	[0,00 – 0,64 [	[0,64 – 0,85 [	[0,85 – 1,03 [	[1,03 – 1,25 [	[1,25 – 2,39]
H_{LR} (m)	[0,00 – 2,80 [	[2,80 – 3,20 [	[3,20 – 3,74 [	[3,74 – 4,91 [	[4,91 – 6,91]
L_{tot} (m)	[0,00 – 145,98 [	[145,98 – 228,60 [	[228,60 – 334,76 [	[334,76 – 558,00 [	[558,00 – 1002,55]

5.1.3. ANOVA

Rappelons que l'objectif des analyses de variance (ANOVA) consiste à identifier les caractéristiques descriptives de l'estran (géologie, densité de placage sédimentaire, proportion couverte par la plate-forme, densité d'algues, orientation de la côte et des strates, degré d'anthropisation) qui sont reliés au taux de déplacement de la côte. Des ANOVA supplémentaires sur l'ensemble de la base de données ont aussi été conduites pour tester la différence entre les types de côte, les types d'estran (tout type de côte confondu) et les cellules hydrosédimentaires en fonction du taux de déplacement.

Les mesures de taux de déplacement utilisées pour les ANOVA correspondent à la période 1993-2009, période d'intérêt principale de la présente recherche. Dans le cadre de ces analyses exploratoires pour obtenir une vue d'ensemble des relations existantes, les analyses ont été produites à l'échelle globale uniquement, sur tous les profils du site d'étude à la fois, ainsi que sur chacune des combinaisons associées aux côtes à terrasse de plage, type de côte principal du site d'étude. Seuls les résultats positifs des calculs des tests d'homogénéité des variances, d'égalité des moyennes et des ANOVA, générés avec les combinaisons sur l'ensemble du site d'étude, seront présentés sous forme de tableaux synthèses (tableaux 5.2). Les tests post hoc effectués donnent des informations supplémentaires servant à identifier quelle(s) composante(s) de chaque variable ressortent du lot et qui pourrait fournir des éléments d'explication supplémentaires aux résultats de régressions linéaires (étape 5.2). Étant donné que le test ANOVA permet déjà d'atteindre l'objectif principal de l'étape d'analyse exploratoire (soit l'identification des variables qualitatives corrélées aux taux de déplacement), les résultats des tests post hoc comportant de nombreux tableaux ont été placés à l'annexe IX afin d'assurer la fluidité du texte.

Dans l'ensemble, ces tests ont révélé la présence de relations entre plusieurs caractéristiques descriptives et le taux de déplacement pour la période 1993-2009. Les résultats sont présentés d'abord pour l'ensemble des données, puis pour les combinaisons.

5.1.3.1. ENSEMBLE DES DONNEES

La prémisse d'homogénéité des variances de chacune des variables n'est pas respectée lors des tests effectués en utilisant tous les 2176 profils à la fois. Le test T2 de Tamhane a donc été choisi pour effectuer les tests post hoc sur ce groupe de données (voir Annexe IX pour le détail des résultats).

Par ailleurs, il est intéressant de noter qu'en prenant l'ensemble des profils pour les ANOVA, il n'y a pas de différence significative entre les taux moyens de déplacement des différents degrés d'anthropisation (p -value = 0,084). Toutefois, il existe une différence intergroupe pour les types d'estran, la géologie, les cellules hydrosédimentaires et l'étendue des algues. Il y aurait donc une corrélation entre ces paramètres et le taux de déplacement. Les tests post hoc corroborent ces résultats. Seuls les résultats positifs seront détaillés dans cette section.

Premièrement, il existe une différence significative entre les types d'estran lorsqu'on compare la moyenne des taux de déplacement 1993-2009 de chaque groupe (p -value < 0,001); les estrans rocheux et sableux (1, 2, 3, 4 et 5) sont différents des estrans vaseux et mixtes (7 et 8) ; les types rocheux 1 et 2 sont différents du type sableux 5. Il existe également une différence significative entre les types de côte (p -value < 0,001), mais, selon le test post hoc, cette différence existe uniquement entre les côtes à marais maritime et à tombolo et les autres types. Toutefois, puisque ces deux derniers types ne constituent que 0,37 % du site d'étude (Figure 4.9, chapitre 4), ils ne seront pas pris en compte dans les analyses avancées. On peut en conclure qu'il y a un lien entre le type d'estran et le taux de déplacement de la côte pour la période 1993-2009, mais que les moyennes des taux de déplacement sont considérées comme étant homogène entre les types de côtes principaux, soit : les côtes à terrasse de plage, les côtes à falaise meuble, les côtes à falaise rocheuse et les côtes rocheuses sans falaises.

Deuxièmement, il existe une différence significative entre les types de formation géologique (p -value < 0,001). Les résultats du post hoc montrent que les formations se distinguant le plus des autres sont : la formation des Landes, le mélange Cap-Chat 1, la formation de Tourelle 1 et la formation de Tourelle 2. Donc, nous pouvons affirmer que certaines formations géologiques du substrat sont reliées au taux de déplacement de la côte. Ce résultat est intéressant étant donnée la diversité lithologique de chaque formation.

Troisièmement, plusieurs cellules hydrosédimentaires se distinguent des autres selon les résultats (p -value $< 0,001$). En effet, 1) la cellule de Métis-sur-Mer se distingue de toutes les autres à l'exception de celle de l'Anse-au-Lard, 2) les cellules de Tartigou et de l'Anse-au-Lard sont différentes de celles de l'Anse-aux-Coques, de Ste-Flavie et de la baie de Mitis, et enfin, 3) la cellule de l'Anse-aux-Coques est différente de celles de Casse-Pierre et de St-Ulric/Matane. On peut donc affirmer que certaines cellules possèdent une moyenne des taux de déplacement 1993-2009 significativement différente des autres. Par conséquent, cela justifie de faire les analyses avancées (régressions linéaires) sur chacune des cellules hydrosédimentaires pour vérifier s'il y aura les mêmes relations entre le taux de déplacement et les caractéristiques morphométriques des estrans.

Finalement, il existe une différence significative entre les groupes catégorisant l'étendue d'algues situées en bas-estran et en avant-côte (p -value $< 0,001$). Le test post hoc montre que les groupes ayant une étendue continue (moins de 30 m, entre 30 m et 100 m, plus de 100 m) sont distincts entre eux. De plus, il y a une différence dans les moyennes entre une étendue d'algue continue entre 30 m et 100 m et une étendue discontinue entre 50 m et 100 m (p -value = 0,036). L'étendue d'algues aurait donc un lien avec le taux de déplacement de la côte.

5.1.3.2. ANALYSES PAR COMBINAISON

Les résultats des ANOVA effectuées sont présentés dans le tableau 5.4, où une valeur « p » (ou « p -value ») $< 0,05$ (en vert) indique l'existence d'une relation entre une caractéristique descriptive et le taux de déplacement 1993-2009 des côtes à terrasse de plage, selon les différents types d'estran (combinaisons A1 à A8). Rappelons que les résultats positifs des tests post hoc effectués avec chaque variable pour chaque groupe de données sont présentés à l'annexe IX.

Tableau 5. 2 : Résultats des ANOVA entre le taux de déplacement 1993-2009 et les caractéristiques descriptives analysées pour chaque combinaison des côtes à terrasse de plage pour l'ensemble du site d'étude. S/O : absence de la caractéristique, NA : 1 seul groupe présent.

	A1	A2	A3	A4	A5	A7	A8
Géologie	p = 0,144	p = 0*	p = 0*	p = 0,816	p = 0*	p = 0,003	p = 0*
<i>A_{pfr}</i>	p = 0	p = 0*	p = 0,006*	s/o	p = 0,898	p = 0,104	p = 0,074
<i>Orient_{pfr}</i> (en point cardinaux)	p = 0	p = 0*	p = 0*	s/o	p = 0,043*	p = 0,076	p = 0*
<i>Orient_{cote}</i> (en point cardinaux)	p = 0,025	p = 0*	p = 0,181	p = 0,251	p = 0,338	p = 0,006*	p = 0,271
<i>D_p</i>	p = 0,27	p = 0	p = 0,628	na	p = 0,749	p = 0*	p = 0
<i>D_a</i>	p = 0,002	p = 0*	p = 0	p = 0*	p = 0*	p = 0,011	p = 0,001*
Degré d'anthrop.	p = 0,008	p = 0*	p = 0,551	p = 0	p = 0,002	p = 0,005	p = 0,047

* La prémisses d'homogénéité des variances n'est pas respectée pour ce résultat, mais le test de Brown-Forsythe montre une différence significative entre les moyennes. Le test T2 de Tamhane a été utilisé dans ces cas.

D'après les résultats obtenus, les trois caractéristiques présentant une différence significative intergroupe pour presque toutes les combinaisons sont : la géologie, l'étendue d'algues et le degré d'anthropisation.

Concernant la géologie du substrat, les tests post hoc montrent plusieurs groupes qui se distinguent dans les combinaisons A2, A3, A5 et A8. Les groupes de la combinaison A2 (estran rocheux avec cordon littoral en haut-estran) sont presque tous différents les uns des autres. Quant à A3 (plate-forme rocheuse avec accumulation sédimentaire importante),

c'est surtout la formation Original 2 qui se distingue des autres, mais il y a aussi certaines différences entre les autres formations, notamment entre le mélange Cap-Chat 1 et la formation des Landes, la formation Tourelle 1 et le mélange Cap-Chat 2. Les formations de la combinaison A8 (estran mixte, en partie rocheux) qui se distinguent de presque toutes les autres sont celles de Tourelle 2 et du mélange de Cap-Chat 1. Dans la combinaison A5, la formation géologique de l'estran est moins pertinente celui-ci n'étant pas rocheux (plage avec dallage de bloc), la formation Original 2 est néanmoins significativement différente de toutes les autres, et il y a une différence entre la formation Tourelle 1 et le mélange de Cap-Chat 2. Cependant, ces différences sont difficilement interprétables dans la mesure où les formations sont composées de différents types de roche, en particulier le mélange de Cap-Chat 1 et 2 qui sont une combinaison de plusieurs types de roches. Certaines formations sont néanmoins plus marquée par une lithologie : arénites calcaires pour la formation Des Landes, mudstone et siltstone pour la formation de l'Original (MERN, 2015).

Un autre résultat intéressant est que, là où une plate-forme rocheuse est présente, l'orientation des strates qui la compose semble influencer le taux de déplacement puisqu'il y a une différence significative intergroupe pour les combinaisons d'estrans rocheux et les estrans pouvant comporter des affleurements rocheux (Tableau 5.4). Les estrans rocheux présentent également des différences intergroupes pour la proportion d'estran couverte par la plate-forme. Dans tous les cas, les groupes qui se distinguent significativement entre eux sont ceux qui possèdent le plus grand nombre d'individus, soit : « grande étendue » et « très grande étendue » pour la combinaison A1 ; « moyenne étendue » et « grande étendue » à « très grande étendue » pour la combinaison A2 ; « moyenne » et « grande étendue » pour la combinaison A3. Il est d'autant plus intéressant que, lorsqu'on analyse le résultat des post hoc pour l'orientation des strates de la plate-forme parmi les combinaisons d'estran rocheux, on peut y observer une différence significative entre les orientations qui tendent vers le NE-NNE et celle qui tendent vers le NW-NNW. Il existe également une différence entre l'orientation N et celle qui tendent vers le NE-NNE.

Par ailleurs, on retrouve un schéma similaire pour l'orientation de la côte, mais uniquement pour la combinaison A2. Quant à la combinaison A1, il existe une différence significative intergroupe pour l'orientation de la côte, mais seulement entre N et WNW. Cela peut soulever la question suivante : est-ce que le taux de déplacement de la côte est relié à la différence d'orientation entre la côte et les strates de la plate-forme ?

L'étendue des algues semble être associée aux variations du taux de déplacement davantage qu'on ne le supposait. En effet, les résultats d'ANOVA révèlent une différence significative entre les moyennes de taux de déplacement en fonction de l'étendue d'algues en bas-estran (Tableau 5.4). Selon les tests post hoc, les groupes distincts varient d'une combinaison à l'autre. Entre autres, on observe que :

- une étendue continue inférieure à 30 m se distingue des autres pour les combinaisons A1 (estran rocheux) et A8 (estran mixte) ;
- une étendue continue supérieure à 100 m se distingue des autres pour les combinaisons A2 (estran rocheux) et A5 (estran sableux) ;
- une étendue continue inférieure à 30 m diffère de celle continue de 30 m à 100m pour la combinaison A3 (estran rocheux);
- une étendue continue de 30 m à 100 m est différente d'une étendue discontinue de 50 m à 100 m, qui elle est différente d'une étendue discontinue supérieure à 100 m pour les combinaisons A2 (estran rocheux) et A4 (estran sableux) ;
- une étendue discontinue de 50 m à 100 m diffère de celle discontinue supérieure à 100m pour les combinaisons A5 (estran sableux) et A7 (estran vaseux).

Il faut noter que l'étendue d'algues, évaluée sur les photos aérienne de 2009, peut avoir quelque peu changée entre 1993 et 2009. Il s'agit d'une des limites de l'étude de cette variable. Il faut donc rester prudent dans l'interprétation de ces résultats. Lors d'une prochaine étude, il serait pertinent d'évaluer l'étendue des algues à divers moment de la période étudiée afin de tenir compte de son évolution.

En ce qui concerne le degré d'anthropisation, les ANOVA révèlent qu'il existe une différence significative entre les zones pour toutes les combinaisons exceptée la combinaison A3 (Tableau 5.4). Les résultats des tests post hoc montrent que, à l'exception de la combinaison A8, la moyenne des taux de déplacement est différente entre les segments anthropisés et les segments naturels. De plus, il existe une différence entre les segments anthropisés et les segments semi-anthropisés pour les combinaisons A2, A4 et A5, ainsi qu'une différence entre les segments semi-anthropisés et naturels pour les combinaisons A7 et A8. Cela implique que la délimitation du périmètre tampon autour des segments de côte artificialisée n'était probablement pas suffisamment étendue pour éliminer l'impact des infrastructures anthropiques sur le taux de déplacement de la côte.

Bref, la géologie du substrat, l'orientation de ses strates, l'étendue de la plate-forme, l'orientation de la côte, l'étendue du couvert algal ainsi que le degré d'anthropisation des côtes seraient reliés aux taux de déplacement de la côte entre 1993-2009, notamment pour les estrans rocheux. Les résultats des régressions linéaires vont permettre de mieux comprendre leur rôle respectif, notamment grâce aux illustrations des résultats par combinaison dans les sections 5.2.1.3 et 5.2.2.2.

5.2. ANALYSES AVANCEES

Dans cette section sont présentés les résultats des régressions linéaires où la relation est significative et le R^2 ajusté (c.-à-d. qui tient compte du nombre de variables analysées) est supérieur ou égal à 0,10. Rappelons que, pour qu'une relation soit acceptée comme étant significative, le p-value doit avoir une valeur inférieure à 0,05.

Le « a » et le « b » font référence à la pente de la régression et à son ordonnée à l'origine. L'axe des ordonnées correspondant toujours au taux de déplacement annuel dans ces régressions, les unités de l'ordonnée à l'origine (« b ») équivalent à des mètre/années, ou $m \cdot an^{-1}$. Quant à la pente de la régression (« a »), ses unités dépendent de la variable sur l'axe des abscisses. S'il s'agit d'une des pentes d'estran (S_{moy} , S_{HE} ou S_{BE}) ou de la différence d'orientation des strates de plate-forme par rapport à l'orientation de la côte ($Orient_{diff}$), alors les unités de a sont : $m \cdot an^{-1} \cdot degré^{-1}$. S'il s'agit d'un indice de rugosité (R_{rms} ou R_{std}), d'une largeur (L_{tot} , L_{em} , L_{HE} ou L_{BE}), ou d'une altitude (H_{LR} ou H_{flex}), alors les unités de « a » sont : an^{-1} .

Les résultats sont classés selon l'échelle d'analyse : ensemble du site (incluant l'échelle globale et régionale) (5.2.1), à l'échelle des cellules (5.2.2) et à l'échelle des sites spécifiques (5.2.3). Pour faciliter le repérage des meilleures relations et l'interprétation des résultats, un R^2 supérieur à 0,25 est mis de l'avant avec un encadré bleu, alors qu'un R^2 supérieur à 0,50 est mis de l'avant par un encadré vert. Le nombre de profils (N) contenus dans chaque groupe de données, correspondant au nombre de mesures de déplacement de la côte pris en compte, est indiqué dans le titre des tableaux correspondant.

Considérant le nombre élevé de tableaux présentant les résultats des régressions linéaires, leur présentation va comme suit : à l'échelle globale, régionale et locale, tous les tableaux sont présentés pour avoir une meilleure idée des tendances sur l'ensemble du site et sur les sites spécifiques, mais pour l'échelle des cellules, seuls les tableaux abordés

souvent dans le texte seront présentés afin de montrer un exemple des tendances générales observées. Cette manière de présenter a été choisie pour plus de fluidité et de clarté de la lecture des résultats puisque souvent, les autres tableaux de cette échelle présentent les mêmes tendances et il n'y a que le R^2 qui varie. Le cas échéant, les tableaux de résultats révélant une différence par rapport à la tendance générale ou montrant une information importante seront, bien entendu, présentés dans le texte. La signification des abréviations utilisées dans les tableaux pour les différentes variables se trouve au début du mémoire (p. xxxvii).

Les graphiques illustrant les relations identifiées dans l'ensemble du site, dans les types de côte et dans les cellules hydrosédimentaires présentent beaucoup de bruit autour de la courbe de tendance, empêchant d'observer nettement les relations. De plus, l'ensemble des graphiques produits pour valider les relations identifiées grâce aux régressions linéaires représente un peu plus de 900 graphiques. C'est pourquoi seuls quelques exemples des meilleures relations identifiées et validées dans les combinaisons, les cellules et les sites spécifiques sont illustrés par des graphiques « nuages de points » dans cette section. Ils serviront à appuyer les résultats de régressions présentés dans les tableaux auxquels ils sont associés.

5.2.1. RESULTATS A L'ECHELLE DE L'ENSEMBLE DU SITE D'ETUDE

5.2.1.1. RESULTATS AVEC L'ENSEMBLE DES DONNEES

À l'échelle du site d'étude, des relations faibles existent entre les caractéristiques morphométriques des estrans et le taux de déplacement annuel pour l'intervalle de temps 1993-2009 (Tableau 5.3). Quant à l'intervalle de temps 2009-2012, ces relations existent mais leur R^2 est inférieur à 0,10. La relation la plus forte est entre le taux de déplacement de

la période 1993-2009 et l'indice de rugosité « moyenne quadratique » pour l'ensemble du site.

Tableau 5. 3 : Régressions linéaires concluantes pour les données de l'ensemble du site d'étude avec le taux de déplacement 1993-2009. N = 2176 profils.

Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
S_{moy}	< 2.2e-16	0,146	-0,053	0,031	-
R_{rms}	< 2.2e-16	0,226	-0,278	0,215	-
R_{std}	< 2.2e-16	0,225	-0,385	0,282	-
H_{LR}	< 2.2e-16	0,135	-0,147	0,370	-
L_{tot}	< 2.2e-16	0,129	5,87e-04	-0,210	+
L_{em}	< 2.2e-16	0,150	7,51e-04	-0,202	+

En comparant les résultats pour l'ensemble du site avec ceux du secteur de Baie-des-Sables – Matane, on retrouve pratiquement les mêmes relations, mais elles tendent à être un peu plus fortes dans le secteur Baie-des-Sables – Matane (Tableau 5.4). La différence majeure entre ces deux ensembles est que la relation la plus forte avec le taux 1993-2009 est avec l'indice de rugosité « écart type », suivi par l'altitude de la ligne de rivage.

Tableau 5. 4 : Régressions linéaires concluantes pour les données du secteur Baie-des-Sables – Matane avec le taux de déplacement 1993-2009. N = 1006 profils.

Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
S_{moy}	< 2.2e-16	0,234	-0,086	0,092	-
S_{BE}	< 2.2e-16	0,191	-0,107	0,034	-
R_{rms}	< 2.2e-16	0,218	-0,263	0,192	-

Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
<i>R_{std}</i>	< 2.2e-16	0,316	-0,402	0,307	-
<i>H_{LR}</i>	< 2.2e-16	0,250	-0,226	0,597	-
<i>L_{tot}</i>	< 2.2e-16	0,145	8,96e-04	-0,265	+
<i>L_{em}</i>	< 2.2e-16	0,186	1,24e-03	-0,265	+

Les résultats montrent globalement que les estrans présentant une rugosité élevée, une pente forte et une altitude de la ligne de rivage élevée sont associés à un taux de déplacement négatif (soit un recul) de la côte plus important (sens de la relation négative). En complément, les estrans les plus étendus sont associés eux à un taux de déplacement nul ou positif (accumulation). Ces résultats se reproduisent dans tous les groupes de données avec les côtes de type meuble ou les côtes de type rocheux sans falaise, et ce peu importe la localisation spatiale et peu importe l'échelle spatiale, à l'exception de celle des sites spécifiques (Tableaux 5.7 à 5.47).

5.2.1.2. RESULTATS PAR TYPE DE COTE

Pour tous les types de côtes, l'indice de rugosité « écart-type » correspond à la caractéristique qui influence le plus le taux de déplacement de la côte par rapport aux autres caractéristiques morphométriques (Tableau 5.5 à 5.8). Dans chacun des groupes, plus la rugosité est élevée, plus l'érosion de la côte est importante. Les autres caractéristiques étant le plus reliées aux variations du taux de déplacement sont la pente moyenne et l'altitude.

Tableau 5. 5: Régressions linéaires concluantes pour les côtes à terrasse de plage avec le taux de déplacement 1993-2009. N = 1999 profils.

Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
S_{moy}	< 2.2e-16	0,206	-0,072	0,069	-
R_{rms}	< 2.2e-16	0,254	-0,310	0,247	-
R_{std}	< 2.2e-16	0,261	-0,443	0,335	-
H_{LR}	< 2.2e-16	0,200	-0,220	0,590	-
L_{em}	< 2.2e-16	0,170	8,04e-04	-0,210	+

Tableau 5. 6 : Régressions linéaires concluantes pour les côtes à falaise meuble avec le taux de déplacement 1993-2009. N = 42 profils.

Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
S_{moy}	0,040	0,079	-0,044	-0,077	-
R_{rms}	1,07e-04	0,299	-0,293	0,139	-
R_{std}	7,23e-05	0,312	-0,272	0,105	-
H_{LR}	5,84e-03	0,154	-0,093	0,143	-

Tableau 5. 7 : Régressions linéaires concluantes pour les côtes à falaise rocheuse.
N = 37 profils.

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₆₃₋₂₀₁₂	<i>S_{moy}</i>	0,027	0,107	0,008	-0,052	+
	<i>R_{rms}</i>	0,031	0,101	0,078	-0,114	+
	<i>R_{std}</i>	0,002	0,222	0,108	-0,136	+
	<i>H_{LR}</i>	0,005	0,184	0,024	-0,113	+
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>H_{LR}</i>	0,004	0,194	0,057	-0,304	+
EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>H_{LR}</i>	0,004	0,194	0,269	-1,407	+

Tableau 5. 8 : Régressions linéaires concluantes pour les côtes rocheuses sans falaise.
N = 91 profils.

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₆₃₋₂₀₁₂	<i>R_{std}</i>	1,47e-14	0,482	-0,452	0,462	-
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>H_{LR}</i>	2,94e-05	0,170	-0,073	0,171	-

Les R^2 des régressions pour les côtes rocheuses avec le taux de déplacement entre 1963-2012 sont globalement plus faibles que ceux des côtes meubles avec les taux de déplacement entre 1993-2009. Même si, sur le long terme, l'erreur est plus faible et que les marges d'erreur entre les images de 1963, 1993, 2009 et 2012 sont relativement similaires, il est possible que ce résultat soit dû au type de côte analysé ainsi qu'au cumul des biais potentiels. Les analyses effectuées sur les côtes rocheuses, s'érodant à un rythme très lent, ont pu être influencées par le cumul des marges d'erreur de géoréférencement (3 m), de traçage (5 m) ainsi que la résolution des images aériennes de 1963 (0,21 m), totalisant une

marge d'erreur de 8,21 m. En effet, une erreur de traçage de 5 m causera davantage de biais sur les taux de déplacement d'une côte rocheuse que sur ceux d'une côte meuble, pouvant reculer de quelques mètres par an.. La variable la mieux reliée au taux de déplacement de la côte est la rugosité pour tous les types de côte.

Les côtes à terrasse de plage et les côtes à falaise meuble présentent globalement les meilleures relations, avec un $R^2 > 0,25$ pour les indices de rugosité, en utilisant la période de 1993-2009. Aucune relation n'a été identifiée pour la période 2009-2012. Quant aux côtes rocheuses, elles ne présentent presque aucune relation avec la période 1993-2009 et généralement de plus faibles relations avec la période 1963-2012 que ce qu'on retrouve avec les côtes meubles pour la période 1993-2009. La seule exception est la relation normale inverse entre la rugosité et le taux de déplacement entre 1963 et 2009 pour les côtes rocheuses sans falaises. Cette relation correspond également à la plus forte relation mesurée à cette échelle, tout groupe confondu (type de côte, combinaison).

5.2.1.3. RESULTATS PAR COMBINAISON

POUR L'ENSEMBLE DU SITE D'ETUDE : POINTE-AU-PERE – MATANE

Les résultats des régressions linéaires effectuées avec l'intervalle 1993-2009 montrent que, à l'exception des combinaisons A2 et A4, soit celles avec une plage en haut estran, la rugosité de l'estran est l'élément expliquant le mieux les variations du taux de déplacement. Il s'agit d'une relation linéaire inverse dont le R^2 est supérieur à 0,25 pour les combinaisons A1, A3 et A7, et inférieur pour les combinaisons A5 et A8 (Tableau 5.9 à 5.15). Autrement dit, plus la rugosité est élevée, plus la côte tend à reculer, comme cela a été remarqué pour les côtes à terrasse de plage dans leur globalité (ex. : Figure 5.3 et 5.4).

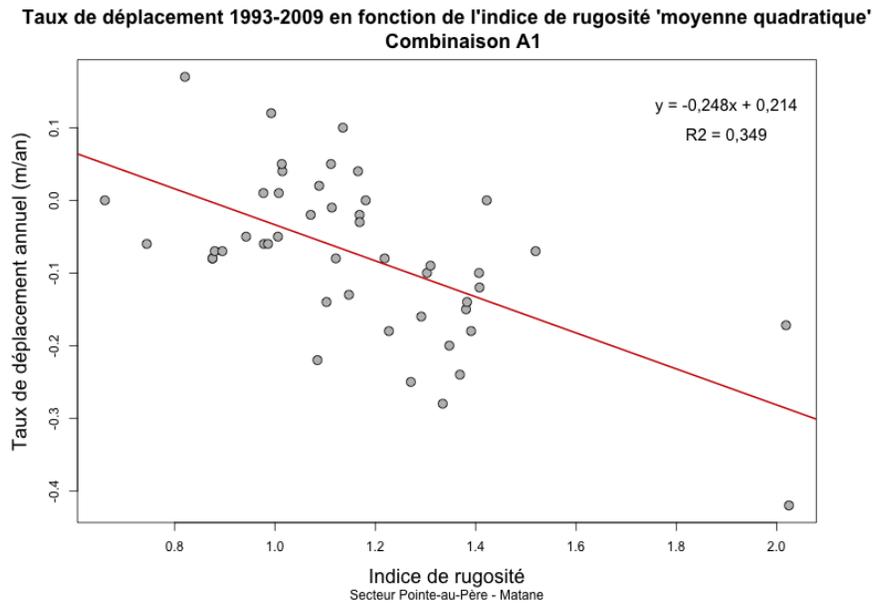


Figure 5. 3 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la côte 1993-2009 en fonction de l'indice de rugosité "moyenne quadratique" pour la combinaison A1.

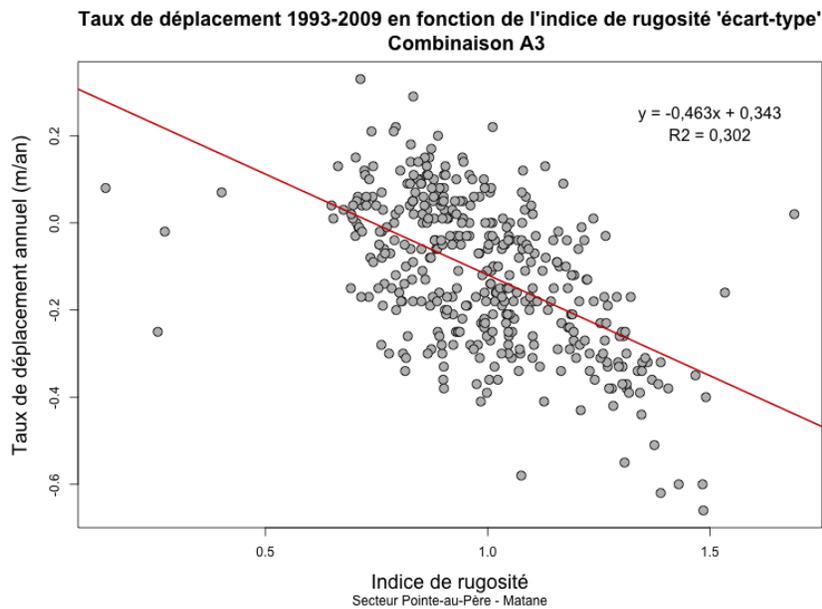


Figure 5. 4 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la côte 1993-2009 en fonction de l'indice de rugosité "écart-type" pour la combinaison A3.

Tableau 5. 9 : Régressions linéaires concluantes pour les estrans de la combinaison A1.
N = 47 profils.

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{moy}</i>	0,002	0,172	-0,039	0,008	-
	<i>R_{rms}</i>	7,40e-06	0,349	-0,248	0,214	-
	<i>H_{LR}</i>	8,07e-06	0,347	-0,090	0,220	-
EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>S_{moy}</i>	0,0025	0,167	0,293	-0,978	+
	<i>R_{rms}</i>	7,41e-04	0,208	1,489	-2,092	+
	<i>H_{LR}</i>	8,56e-04	0,204	0,539	-2,114	+
	<i>L_{em}</i>	0,013	0,110	-0,004	0,301	-

Pour la combinaison A2 (bas-estran rocheux avec cordon littoral en haut-estran), le paramètre le plus significatif est la pente moyenne, avec une relation linéaire inverse où le $R^2 = 0,332$ (Figure 5.5, Tableau 5.10). L'indice de rugosité y est quand même le deuxième élément le plus important avec un $R^2 = 0,296$ pour l'indice « moyenne quadratique » et 0,264 pour l'indice « écart-type ». Donc, plus la pente et la rugosité sont élevées, plus le taux de déplacement négatif (érosion) est important.

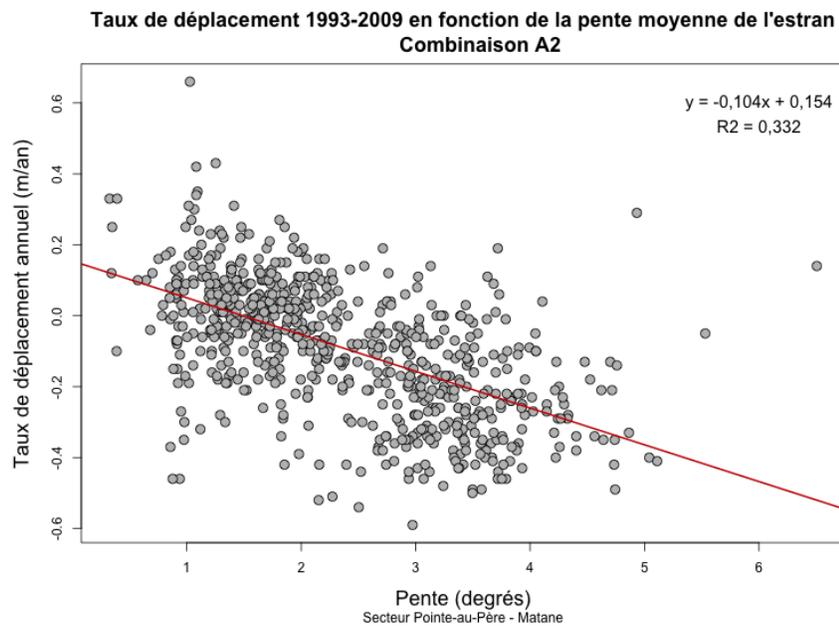


Figure 5. 5 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la côte 1993-2009 en fonction de la pente pour la combinaison A2.

Tableau 5. 10 : Régressions linéaires concluantes pour les estrans de combinaison A2.
N = 714 profils.

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{moy}</i>	< 2.2e-16	0,332	-0,104	0,154	-
	<i>R_{rms}</i>	< 2.2e-16	0,296	-0,330	0,280	-
	<i>R_{std}</i>	< 2.2e-16	0,264	-0,440	0,338	-
	<i>H_{LR}</i>	< 2.2e-16	0,190	-0,201	0,538	-
	<i>L_{em}</i>	< 2.2e-16	0,203	0,001	-0,233	+
	<i>L_{tot}</i>	< 2.2e-16	0,212	9,73e-04	-0,257	+

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>S_{moy}</i>	< 2.2e-16	0,194	0,485	-1,944	+
	<i>R_{rms}</i>	< 2.2e-16	0,168	1,521	-2,512	+
	<i>H_{LR}</i>	< 2.2e-16	0,110	0,937	-3,733	+

Concernant la combinaison A4 (estran constitué d'une plage), la caractéristique morphologique expliquant le mieux les variations du taux de déplacement de la ligne de rivage est la largeur de l'estran avec un $R^2 = 0,461$ pour la largeur émergée (Figure 5.6, Tableau 5.12). On pouvait s'attendre à ce résultat puisqu'il s'agit de la caractéristique distinctive de cette combinaison. Il s'agit également du coefficient de détermination (R^2) le plus élevé parmi toutes les variables testées sur les différentes combinaisons.

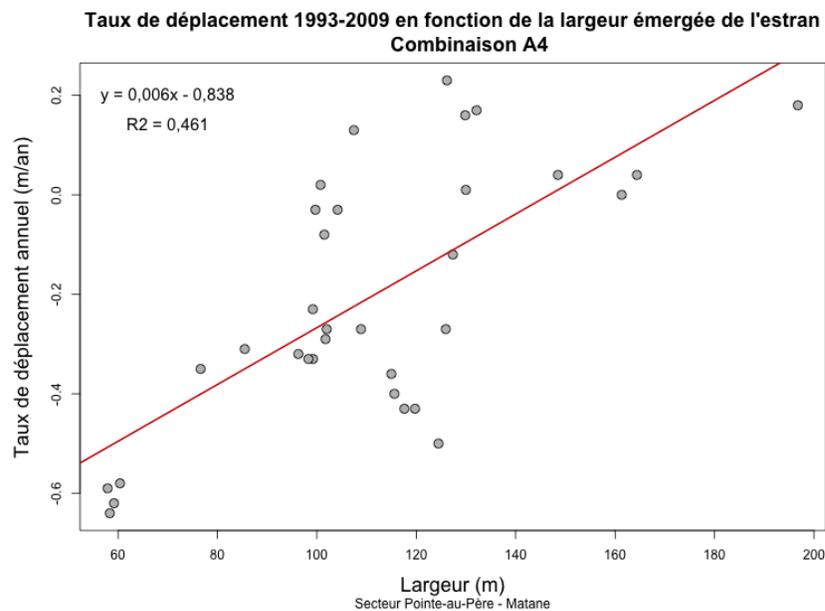


Figure 5. 6: Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 1993-2009 en fonction de la largeur émergée pour la combinaison A4.

Tableau 5. 11 : Régressions linéaires concluantes pour les estrans de combinaison A3.
N = 395 profils.

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{moy}</i>	5,32e-15	0,142	-0,050	0,002	-
	<i>R_{rms}</i>	< 2.2e-16	0,230	-0,265	0,188	-
	<i>R_{std}</i>	< 2.2e-16	0,302	-0,463	0,343	-
	<i>H_{LR}</i>	< 2.2e-16	0,293	-0,260	0,696	-
	<i>L_{tot}</i>	8,06e-12	0,110	6,66e-04	-0,233	+

Tableau 5. 12 : Régressions linéaires concluantes pour les estrans de combinaison A4.
N = 33 profils.

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{moy}</i>	3,35e-03	0,221	-0,010	0,056	-
	<i>R_{rms}</i>	0,011	0,166	-0,344	0,267	-
	<i>R_{std}</i>	2,75e-05	0,420	-0,550	0,489	-
	<i>H_{LR}</i>	0,003	0,221	-0,279	0,727	-
	<i>L_{tot}</i>	8,85e-06	0,459	0,003	-0,846	+
	<i>L_{em}</i>	8,39e-06	0,461	0,006	-0,838	+
EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>S_{moy}</i>	0,009	0,172	0,534	-1,243	+
	<i>R_{rms}</i>	0,003	0,222	2,330	-3,038	+
	<i>R_{std}</i>	2,20e-04	0,34	2,978	-3,604	+
	<i>H_{LR}</i>	5,14e-04	0,305	1,925	-6,264	+
	<i>L_{em}</i>	0,010	0,170	-0,022	2,580	-

Tableau 5. 13 : Régressions linéaires concluantes pour les estrans de combinaison A5.
N = 96 profils.

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>R_{rms}</i>	2,09e-05	0,167	-0,397	0,288	-
	<i>R_{std}</i>	1,80e-06	0,208	-0,490	0,367	-
	<i>H_{LR}</i>	1,63e-04	0,132	-0,186	0,426	-
EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>L_{tot}</i>	3,45e-04	0,119	0,005	-2,127	+
	<i>L_{em}</i>	6,93e-05	0,147	0,010	-2,080	+

Tableau 5. 14 : Régressions linéaires concluantes pour les estrans de combinaison A7.
N = 79 profils.

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{moy}</i>	1,76e-04	0,157	-0,155	0,136	-
	<i>R_{rms}</i>	8,06e-04	0,125	-0,313	0,229	-
	<i>R_{std}</i>	5,63e-07	0,270	-0,657	0,444	-
	<i>H_{LR}</i>	7,59e-04	0,127	-0,326	0,928	-
	<i>L_{em}</i>	1,53e-05	0,207	7,14e-04	-0,246	+

Tableau 5. 15 : Régressions linéaires concluantes pour les estrans de combinaison A8.
N = 638 profils.

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{moy}</i>	< 2.2e-16	0,145	-0,059	0,056	-
	<i>R_{rms}</i>	< 2.2e-16	0,186	-0,293	0,235	-
	<i>R_{std}</i>	< 2.2e-16	0,155	-0,414	0,315	-
	<i>H_{LR}</i>	< 2.2e-16	0,145	-0,233	0,636	-
	<i>L_{em}</i>	< 2.2e-16	0,153	7,790e-04	-0,196	+

La deuxième caractéristique expliquant le mieux les variations du taux de déplacement, pour l'intervalle 1993-2009, diffère d'un type d'estran à l'autre. Pour les combinaisons A1 et A3, il s'agit de l'altitude de la ligne de rivage, alors que pour la combinaison A2, il s'agit de la rugosité de l'estran (Tableau 5.9 à 5.11). Pour la combinaison A4, il s'agit de l'indice de rugosité « moyenne quadratique » de l'estran (Tableau 5.12, Figure 5.7). Tel qu'observable sur la figure 5.7, il arrive parfois d'avoir des données extrêmes pouvant potentiellement diminuer le résultat du coefficient de détermination (R^2). Les points correspondant à des valeurs erronées ont été retirés des bases de données. Ces valeurs extrêmes peuvent correspondre à l'emplacement de la limite d'un changement de typologie ou de morphologie de l'estran, à la présence d'un écueil rocheux ou d'une autre particularité locale. Toutefois, étant donné le nombre important de régressions et de graphiques produits, il n'était pas possible de tester l'impact des quelques données extrêmes sur chaque relation, faute de temps. Il serait pertinent d'effectuer davantage de tests statistiques pour vérifier l'influence de ces quelques données extrêmes sur la force des relations lors de futures recherches. Enfin, pour les combinaisons A5, A7 et A8, la deuxième caractéristique la mieux reliée aux variations du taux de déplacement est la largeur émergée de l'estran (Tableau 5.13 à 5.15).

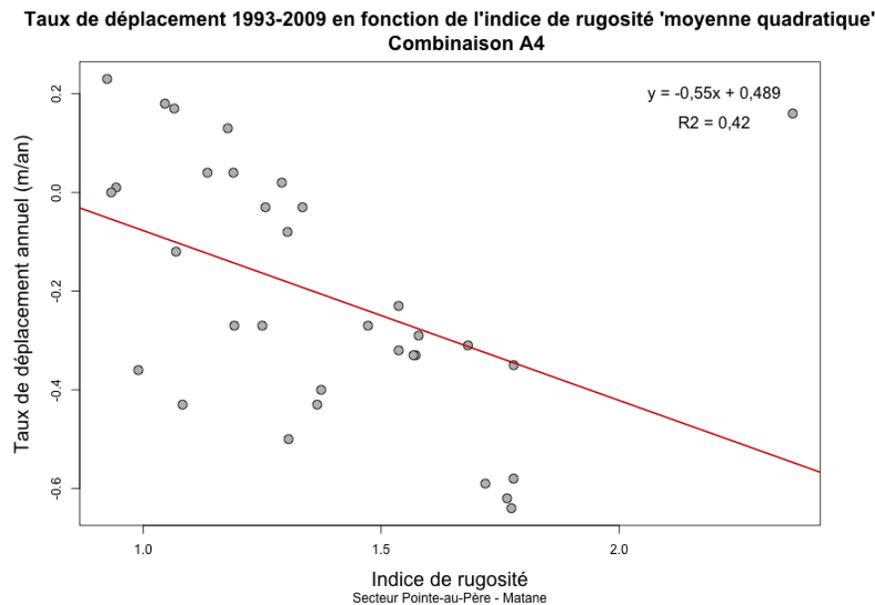


Figure 5. 7 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 1993-2009 en fonction de l'indice de rugosité "moyenne quadratique" pour la combinaison A4.

La combinaison A8 comporte les relations les plus faibles parmi les combinaisons. Ce résultat est probablement dû au fait qu'il s'agit d'un estran de type mixte ayant une composition hétérogène trop variable dans l'ensemble du site.

Il existe également une relation entre l'altitude de la ligne de rivage et le taux de déplacement entre 1993 et 2009 et ce, pour chacune des sept combinaisons. D'après les résultats, l'augmentation de la ligne de rivage est associée à une érosion plus importante de la côte. Cette relation pourrait simplement être un indicateur du recul de la côte. En effet, étant donné que la terrasse de plage, ayant un très faible gradient de pente du pied de la falaise Micmac jusqu'au trait de côte (Dionne, 2002) et souvent caractérisée par une microfalaise sur le site d'étude, un recul de la côte résultant de l'érosion de cette microfalaise implique nécessairement une élévation de la ligne de rivage puisqu'on recule vers les terres où l'altitude est plus élevée.

En observant les résultats de chaque combinaison pour le taux de déplacement 2009-2012, on retrouve les mêmes relations dominantes qu'avec la période 1993-2009 pour les combinaisons A1 et A2, soit l'indice de rugosité « moyenne quadratique » pour la combinaison A1 et la pente moyenne pour la combinaison A2. À l'opposé, les relations les plus fortes sont différentes entre les deux intervalles de temps pour les combinaisons A4 et A5. Il s'agit respectivement de l'indice de rugosité « écart-type » et de la largeur totale de l'estran. De plus, pour ces quatre combinaisons (A1, A2, A4, A5), le sens de ces relations est toujours l'opposé de celui de l'intervalle 1993-2009, et ce pour toutes les caractéristiques testées. La combinaison A4 est celle où l'on retrouve les relations les plus fortes entre les caractéristiques morphométriques et le taux de déplacement, comme en 1993-2009. Toutefois, dans l'ensemble des résultats, les relations sont majoritairement plus fortes pour l'intervalle 1993-2009. Les combinaisons A3, A7 et A8 n'ont pas de relations significatives entre les caractéristiques morphométriques et le taux de déplacement de la côte entre 2009-2012.

PROFILS DU SECTEUR BAIE-DES-SABLES – MATANE

Rappelons que ce secteur comprend uniquement les combinaisons A2, A3, A5 et A8.

Dans l'ensemble des résultats du secteur Baie-des-Sables – Matane pour la période 1993-2009, on retrouve un plus grand nombre de caractéristiques morphométriques reliées significativement aux taux de déplacement et dont la force de la relation est plus importante que dans l'analyse des combinaisons pour l'ensemble du site. Les résultats sont présentés aux tableaux 5.16 à 5.19.

La relation la plus importante (en terme de R^2) pour les combinaisons A2, A3 et A5 est l'indice de rugosité « écart-type », avec respectivement un R^2 de 0,362, 0,419 et 0,201 (Tableau 5.16 à 5.19). La relation dominante de A8 est la pente moyenne, avec un $R^2 =$

0,276 (Tableau 5.19). Il est également possible de constater que toutes les composantes morphométriques de l'estran (pente, rugosité et largeur d'estran, ainsi que l'altitude de la ligne de rivage) ont une influence significative sur le taux de déplacement 1993-2009, plus ou moins forte selon la variable concernée et la combinaison.

Tableau 5. 16 : Régressions linéaires concluantes pour les estrans de combinaison A2 pour le secteur Baie-des-Sables – Matane. N = 371 profils.

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	S_{moy}	< 2.2e-16	0,262	-0,109	0,175	-
	S_{HE}	2,10e-05	0,045	0,027	-0,254	+
	S_{BE}	< 2.2e-16	0,358	-0,157	0,136	-
	R_{rms}	< 2.2e-16	0,173	-0,234	0,179	-
	R_{std}	< 2.2e-16	0,362	-0,456	0,383	-
	H_{LR}	< 2.2e-16	0,276	-0,250	0,681	-
	H_{flex}	2,51e-07	0,067	-0,089	0,001	-
	L_{tot}	< 2.2e-16	0,314	0,003	-0,487	+
	L_{em}	< 2.2e-16	0,304	0,003	-0,406	+
EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	S_{moy}	5,37e-11	0,108	0,429	-1,940	+
	R_{rms}	1,48e-07	0,070	0,915	-1,955	+
	R_{std}	4,35e-11	0,109	1,535	-2,500	+
	H_{LR}	2,27e-14	0,144	1,104	-4,310	+
	L_{tot}	6,09e-08	0,074	-0,008	0,284	-
	L_{em}	8,18e-12	0,117	0,067	-2,201	+

Tableau 5. 17 : Régressions linéaires concluantes pour les estrans de combinaison A3 pour le secteur Baie-des-Sables – Matane. N = 197 profils.

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	S_{moy}	2,59e-16	0,288	-0,092	0,103	-
	S_{HE}	0,002	0,044	0,025	-0,260	+
	S_{BE}	< 2,2e-16	0,299	-0,142	0,075	-
	R_{rms}	2,27e-16	0,289	-0,288	0,215	-
	R_{std}	< 2,2e-16	0,419	-0,454	0,356	-
	H_{LR}	< 2,2e-16	0,387	-0,312	0,853	-
	L_{tot}	1,82e-11	0,203	0,002	-0,364	+
	L_{em}	3,64e-11	0,198	0,001	-0,289	+
	L_{HE}	< 2,2e-16	0,362	-0,019	0,288	-
	$Orient_{diff}$	1,58e-12	0,234	0,003	-0,099	+

Tableau 5. 18 : Régressions linéaires concluantes pour les estrans de combinaison A5 pour le secteur Baie-des-Sables – Matane. N = 69 profils.

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	S_{HE}	3,60e-03	0,107	0,065	-0,552	+
	S_{BE}	2,12e-03	0,119	-0,097	0,001	-
	R_{rms}	6,36e-04	0,148	-0,376	0,285	-
	R_{std}	6,68e-05	0,201	-0,473	0,372	-
	H_{flex}	1,90e-04	0,177	-0,219	-0,018	-
	L_{tot}	4,71e-04	0,156	0,002	-0,488	+

Tableau 5. 19 : Régressions linéaires concluantes pour les estrans de combinaison A8 pour le secteur Baie-des-Sables – Matane. N = 275 profils.

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	S_{moy}	< 2,2e-16	0,276	-0,111	0,109	-
	S_{BE}	4,17e-13	0,172	-0,165	0,066	-
	R_{rms}	5,60e-16	0,210	-0,307	0,233	-
	R_{std}	5,34e-07	0,084	-0,264	0,181	-
	H_{LR}	1,99e-10	0,134	-0,205	0,541	-
	L_{tot}	2,09e-15	0,203	9,08e-04	-0,286	+
	L_{em}	1,50e-15	0,205	0,001	-0,262	+

Les caractéristiques présentes dans les deux ensembles de données présentent le même sens des relations, soit :

- Une relation linéaire inverse entre le taux de déplacement 1993-2009 et la pente moyenne, les indices de rugosité ainsi que l'altitude de la ligne de rivage ;
- Une relation linéaire normale entre le taux de déplacement 1993-2009 et la largeur totale et émergée de l'estran ;
- Le sens inverse de ces relations pour le taux de déplacement 2009-2012.

On observe cependant une différence entre caractéristiques du haut-estran et celle du bas-estran, qui étaient disponibles uniquement dans le secteur Baie-des-Sables – Matane. En effet, il existe une relation normale entre la pente du haut-estran et le taux de déplacement 1993-2009, et une relation inverse entre la pente du bas-estran et le taux de

déplacement 1993-2009 d'une part, et entre la largeur du haut-estran et le taux de déplacement 1993-2009 d'autre part (dans ce cas pour une seule combinaison). Parmi les pentes analysées sur ce secteur, et contrairement aux autres groupes de données, la pente du bas-estran est la pente la mieux reliée au taux de déplacement 1993-2009, à l'exception de la combinaison A8 où c'est la pente moyenne qui possède la plus forte relation.

Les régressions linéaires effectuées avec le taux de déplacement 2009-2012 n'ont révélé que de faibles relations dans la combinaison A2, et aucune parmi les autres combinaisons. Il convient de souligner que les relations avec la période 2009-2012 sont toujours inverses à celle de 1993-2009. Toutefois, il est intéressant de noter que les nouveaux paramètres testés (pente du haut-estran et du bas-estran, largeur du haut-estran et du bas-estran, hauteur de la ligne de flexure) et significatifs, selon la combinaison, ne suivent pas la même tendance que les autres paramètres. Ainsi, les taux d'érosion sont plus élevés lorsque la pente du haut-estran diminue (pour les combinaisons A2, A3 et A5) et lorsque la largeur du haut-estran augmente (dans le cas de A3).

5.2.2. RESULTATS A L'ECHELLE DES CELLULES HYDROSEDIMENTAIRES

Rappelons que, étant donné que les tendances générales observées aux échelles précédentes se retrouvent également dans la grande majorité des groupes à l'échelle des cellules hydrosédimentaires, seulement quelques tableaux de résultats seront présentés en exemple et les autres seront présentés à l'annexe X pour faciliter la lecture de cette sous-section.

5.2.2.1. POUR L'ENSEMBLE DES PROFILS DE CHAQUE CELLULE

Les régressions linéaires calculées avec le taux de déplacement 1993-2009 et 2009-2012 en fonction des caractéristiques morphométriques de l'estran présentent très peu de relations significatives pour certaines cellules hydrosédimentaires. Les cellules de l'Anse-aux-Coques, de Saint-Ulric – Matane et de Tartigou sont les seules montrant une influence de chaque composante morphométrique sur le taux de déplacement 1993-2009 (Tableau 5.20 à 5.22). Pourtant, ces cellules ont une composition et une morphologie très différentes, et leur proportion de zones naturelles diffère. Quant à l'intervalle 2009-2012, à l'exception des cellules de l'Anse-au-Lard et de Sainte-Flavie, les relations sont inexistantes ou possèdent un $R^2 < 0,102$.

Tableau 5. 20 : Régressions linéaires concluantes pour les données de la cellule de l'Anse-aux-Coques. N = 253 profils.

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{moy}</i>	8,36E-11	0,152	-0,130	0,179	-
	<i>R_{rms}</i>	< 2,2E-16	0,276	-0,587	0,528	-
	<i>R_{std}</i>	< 2,2E-16	0,295	-0,721	0,615	-
	<i>H_{LR}</i>	4,85E-09	0,124	-0,244	0,737	-
	<i>L_{tot}</i>	1,07E-07	0,103	7,04E-04	-0,200	+
	<i>L_{em}</i>	6,51E-10	0,138	0,001	-0,230	+
EPR₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>H_{LR}</i>	1,57E-07	0,100	1,150	-4,570	+

Tableau 5. 21 : Régressions linéaires concluantes pour les données de la cellule de Saint-Ulric - Matane. N = 251 profils.

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{moy}</i>	2,83E-11	0,160	-0,080	-0,055	-
	<i>R_{rms}</i>	2,87E-14	0,204	-0,321	-0,235	-
	<i>R_{std}</i>	< 2.2E-16	0,275	-0,402	0,294	-
	<i>H_{LR}</i>	5,07E-08	0,109	-0,161	0,394	-
	<i>L_{tot}</i>	9,35E-13	0,182	0,002	-0,451	+

Tableau 5. 22 : Régressions linéaires concluantes pour les données de la cellule de Tartigou. N = 790 profils.

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{moy}</i>	2,2E-16	0,262	-0,089	0,109	-
	<i>R_{rms}</i>	2,20E-16	0,223	-0,254	0,189	-
	<i>R_{std}</i>	< 2,2e-16	0,316	-0,390	0,303	-
	<i>H_{LR}</i>	< 2,2e-16	0,277	-0,223	0,596	-
	<i>L_{tot}</i>	< 2,2e-16	0,151	0,001	-0,245	+
	<i>L_{em}</i>	< 2,2e-16	0,192	0,001	-0,255	+
	<i>Orient_{diff}</i>	< 2,2e-16	0,192	0,001	-0,255	+

La caractéristique ayant la meilleure relation avec le taux de déplacement est différente d'une cellule à l'autre, mais celle qui revient le plus souvent est l'indice de rugosité, autant celui de l'« écart-type » que celui de la « moyenne quadratique ». Les cellules ayant les plus forts coefficients de détermination avec cette variable sont Tartigou ($R^2 = 0,316$), Anse-aux-Coques ($R^2 = 0,295$) et Saint-Ulric – Matane ($R^2 = 0,275$). La cellule de l'Anse-aux-Coques illustre un bel exemple de cette relation à la figure 5.8. Pour les cellules de Casse-Pierre et Saint-Flavie, les meilleures relations sont obtenues avec la variable de l'altitude de la ligne de rivage ($R^2 = 0,294$; $R^2 = 0,167$), tandis que pour la cellule de l'Anse-au-Lard, il s'agit de la largeur d'estran ($R^2 = 0,311$), qui est d'ailleurs la seule composante ayant une influence sur le taux de déplacement 1993-2009 (voir Annexe X pour plus d'information).

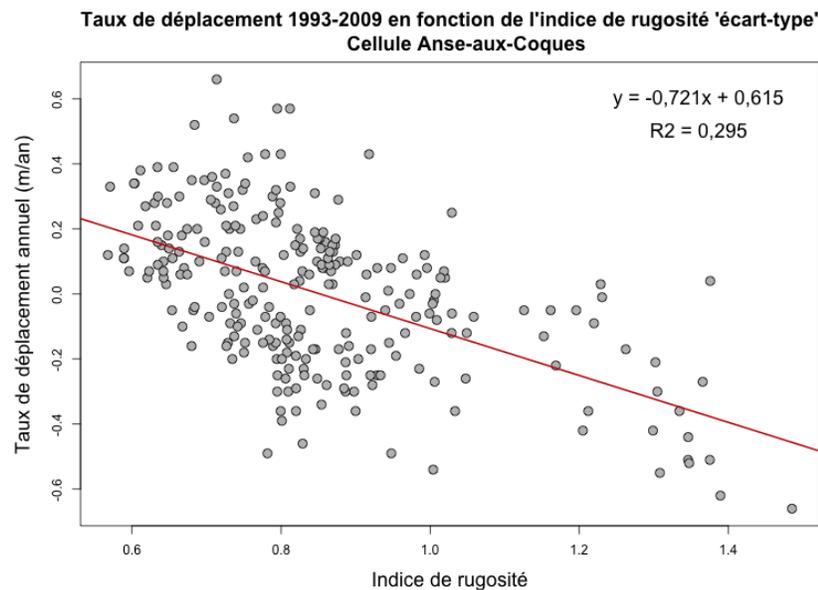


Figure 5. 8 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 1993-2009 en fonction de l'indice de rugosité "écart-type" pour la cellule de l'Anse aux Coques.

La force des relations est similaire à ce qui a été observé dans les résultats des régressions par combinaison sur l'ensemble du site d'étude, ce qui va à l'encontre de l'hypothèse initiale selon laquelle la signification des relations augmenterait en affinant les

groupes de données. Le sens des relations identifiées suit le même patron que pour les groupes de données précédentes, soit 1) une relation normale entre la largeur de l'estran et le taux de déplacement 1993-2009, 2) et une relation inverse entre ce même taux de déplacement et la pente et la rugosité de l'estran et l'altitude de la ligne de rivage.

Dans la grande majorité des régressions, les illustrations valident les relations identifiées parce qu'il y a très peu de points de mesure excentrés, c'est-à-dire qui s'éloignent de la droite de la régression (Figure 5.3 à 5.8). Toutefois, dans le cas de Métis-sur-Mer, des « clusters » sont observables et posent un biais dans le calcul de la régression. Cette cellule inclue la partie exposée, sur environ 300 m de côte linéaire, du cap rocheux au centre de l'Anse du Petit Mitis ainsi qu'une portion de côte d'environ 500 m linéaires où l'orientation de la côte varie entre ENE et N (cluster 1 ; N = 57), contrairement au reste de la cellule où la côte est orientée NNW à NW (cluster 2 ; N = 333) (Figure 5.9, annexe XII).

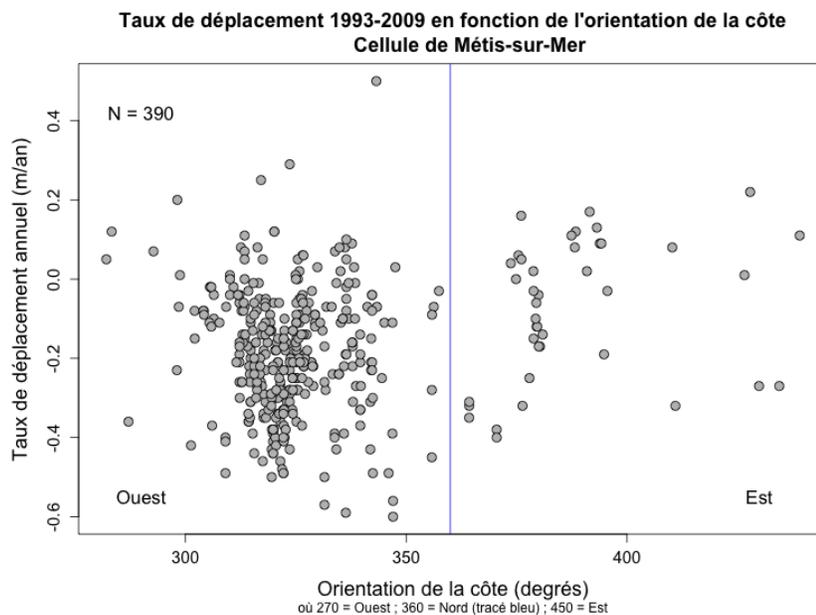


Figure 5. 9 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 1993-2009 en fonction de l'orientation de la côte pour la cellule de Métis-sur-Mer.

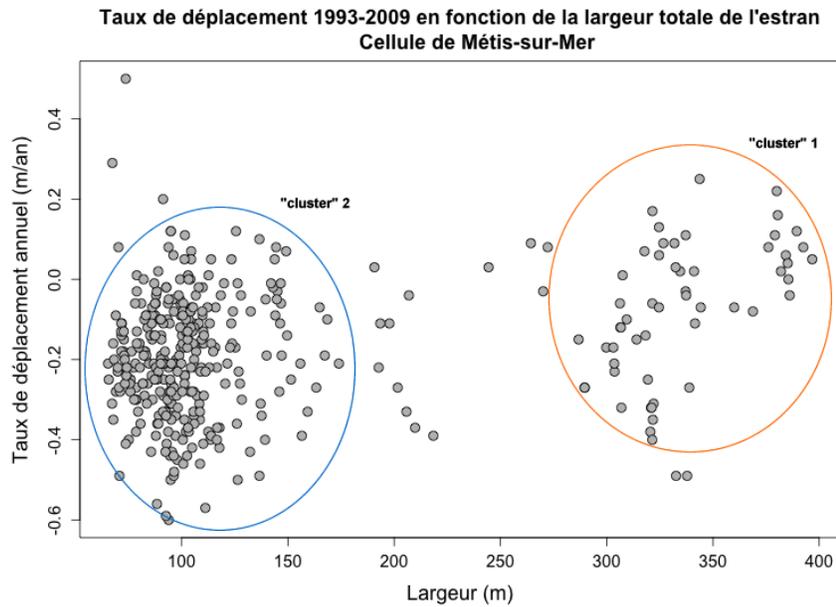


Figure 5. 10 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 1993-2009 et la largeur totale de l'estran pour la cellule de Métis-sur-Mer. Deux groupes (« clusters ») distincts sont observables.

Il y a aussi une différence marquée en termes de largeur d'estran (cluster 1 : $L_{tot} > 230$ m ; cluster 2 : $L_{tot} < 230$ m) (Figure 5.10). Cette division marquée formant deux groupes distincts dans la cellule de Métis-sur-Mer pourrait expliquer pourquoi on n'y retrouve qu'une seule relation significative, très faible de surcroît, avec la rugosité « moyenne quadratique » pour les deux périodes de temps (voir Annexe X). Il est à noter qu'il s'agit de l'unique cellule où des groupes distincts sont identifiables en raison de la morphologie particulière de cette cellule (voir Annexe II pour la carte des cellules).

5.2.2.2. POUR CHAQUE COMBINAISON DE CHAQUE CELLULE

Les relations identifiées par les régressions linéaires sont beaucoup plus fortes dans les cellules lorsqu'on isole chaque combinaison présente. Les résultats de chaque combinaison pour les cellules de l'Anse aux Coques et de Tartigou sont présentés en exemple aux tableaux 5.23 et 5.24. Les autres résultats peuvent être consultés à l'Annexe XI. Les combinaisons A2 et A3 (estran constitué d'une plate-forme rocheuse avec placage sédimentaire plus ou moins dense et d'un cordon littoral de haut-estran) présents dans la cellule de l'Anse-aux-Coques comportent notamment de nombreuses relations ayant un R^2 supérieur à 0,50 (Tableau 5.23). Le maximum atteint est un $R^2 = 0,702$ avec l'indice de rugosité « moyenne quadratique », ce qui est particulièrement remarquable comme puissance de relation dans un milieu naturel et côtier comportant un grand nombre de variables (Figure 5.11).

Tableau 5. 23 : Régressions linéaires concluantes pour les combinaisons la cellule de l'Anse-aux-Coques

Combin	Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
A2 N = 43	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	S_{moy}	1,45E-05	0,356	-0,178	0,396	-
		R_{rms}	1,46E-12	0,702	-0,958	1,060	-
		R_{std}	1,86E-12	0,699	-1,061	1,070	-
		H_{LR}	2,40E-03	0,185	-0,344	1,130	-
		L_{em}	9,23e-8	0,493	0,003	-0,403	+
		L_{tot}	1,30E-08	0,536	0,0025	-0,422	+
A3 N = 44	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	S_{moy}	5,40E-08	0,498	-0,232	0,250	-
		R_{rms}	4,87E-08	0,500	-0,681	0,587	-

Combin	Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
		R_{std}	3,28E-09	0,559	-0,938	0,775	-
		H_{LR}	2,76E-03	0,179	-0,310	0,859	-
		L_{tot}	5,11E-07	0,442	0,0022	-0,610	+
	EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	S_{moy}	1,45E-04	0,227	0,876	-2,590	+
		R_{rms}	3,87E-04	0,244	2,420	-3,710	+
		R_{std}	1,09E-04	0,286	3,400	-4,44	+
A8 N = 140	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	S_{moy}	1,90E-05	0,118	-0,259	0,297	-
		R_{rms}	6,73E-07	0,158	-0,679	0,579	-
		R_{std}	1,12E-07	0,179	-0,755	0,627	-
		H_{LR}	1,19E-05	0,124	-0,269	0,839	-
	EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	H_{LR}	5,35E-09	0,214	1,990	-7,020	+

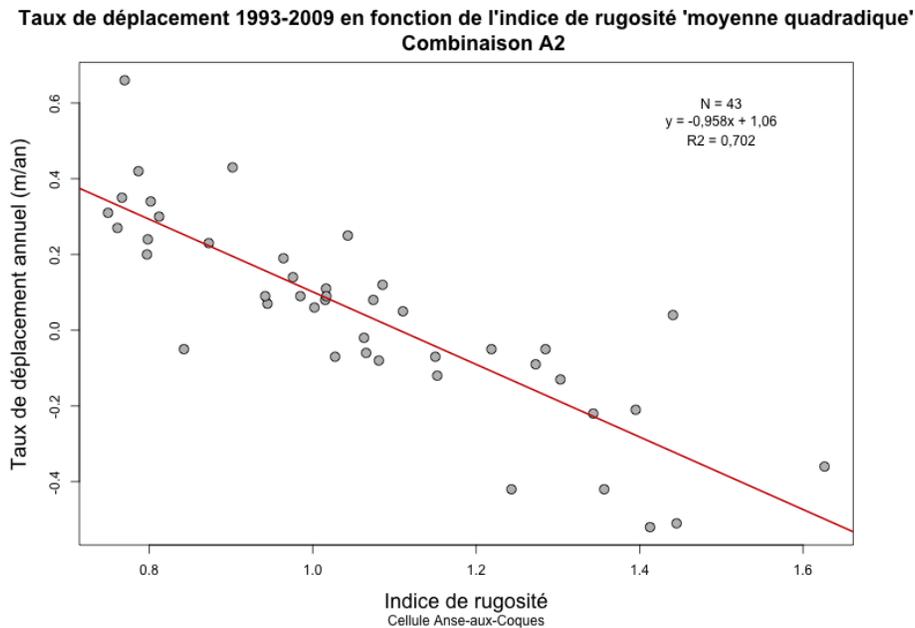


Figure 5. 11 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 1993-2009 en fonction de l'indice de rugosité "moyenne quadratique" pour la combinaison A2 de la cellule Anse-aux-Coques.

Par ailleurs, le sens des relations suit toujours la même tendance que celle des autres groupes de données. Aussi, on remarque que plusieurs relations ayant un fort coefficient de détermination se retrouvent parmi les groupes de données ayant un effectif plus faible que les autres, mais ce n'est pas une règle générale puisque ça dépend surtout de la combinaison et de l'échelle spatiale analysée (Tableaux 5.23 et 5.24 et Annexe XI). Par exemple, pour la cellule de Tartigou, les meilleures relations se trouvent parmi la combinaison dominante (A2 dans ce cas-ci), ayant un effectif deux fois plus élevé que les deux suivantes en effectif (soit A3 et A8) (Tableau 5.24). Pour la cellule de Saint-Ulric et Casse-Pierre, la majorité des fortes relations identifiées sont reliées respectivement à la combinaison A4 et A1, qui ne correspondent pas la combinaison au plus petit effectif de leur cellule respective (voir Annexe XI).

Tableau 5. 24 : Régressions linéaires concluantes pour les combinaisons la cellule de Tartigou.

Combin	Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
A1 N = 16	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{moy}</i>	2,40E-02	0,265	-0,051	0,088	-
		<i>R_{rms}</i>	2,79E-02	0,251	-0,191	0,163	-
		<i>R_{std}</i>	1,94E-02	0,285	-0,201	0,168	-
		<i>H_{LR}</i>	4,88E-02	0,196	-0,063	0,158	-
		<i>L_{tot}</i>	8,83E-03	0,355	0,001	0,197	+
		<i>L_{em}</i>	1,62E-03	0,486	0,002	-0,240	+
		<i>Orient_{diff}</i>	2,59E-02	0,258	-0,003	-0,052	-
	EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>H_{LR}</i>	1,18E-02	0,329	0,373	-1,526	+
		<i>L_{tot}</i>	1,22E-02	0,327	-0,004	0,403	-
		<i>L_{em}</i>	5,96E-03	0,387	-0,007	0,551	-
A2 N = 367	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{moy}</i>	< 2,2e-16	0,269	-0,110	0,175	-
		<i>R_{rms}</i>	< 2,2e-16	0,178	-0,236	0,180	-
		<i>R_{std}</i>	< 2,2e-16	0,378	-0,460	0,387	-
		<i>H_{LR}</i>	< 2,2e-16	0,326	-0,282	0,780	-
		<i>L_{tot}</i>	< 2,2e-16	0,309	0,003	-0,495	+
		<i>L_{em}</i>	< 2,2e-16	0,306	0,003	-0,406	+
	EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>S_{moy}</i>	7,964E-11	0,107	0,421	-1,901	+
		<i>R_{std}</i>	5,777E-11	0,109	1,501	-2,444	+
		<i>H_{LR}</i>	9,961E-16	0,160	1,197	-4,571	+
	A3	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{moy}</i>	< 2,2e-16	0,305	-0,091	0,108

Combin	Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
N = 187		R_{rms}	< 2,2e-16	0,332	-0,297	0,232	-
		R_{std}	< 2,2e-16	0,464	-0,460	0,367	-
		H_{LR}	< 2,2e-16	0,433	-0,321	0,891	-
		L_{tot}	3,278E-12	0,227	0,002	-0,361	+
		L_{em}	1,664E-10	0,194	0,001	-0,277	+
A5 N = 34	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	S_{moy}	1,22E-03	0,260	-0,092	0,075	-
		R_{rms}	2,32E-03	0,232	-0,323	0,215	-
		R_{std}	9,01E-03	0,170	-0,311	0,184	-
		H_{LR}	3,20E-03	0,217	-0,166	0,373	-
		L_{tot}	2,62E-03	0,226	0,001	-0,340	+
N = 34	EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	S_{moy}	1,34E-03	0,256	-0,427	0,658	-
		R_{rms}	1,22E-02	0,155	-1,271	1,047	-
		R_{std}	1,76E-02	0,138	-1,334	1,047	-
		L_{tot}	3,98E-03	0,207	0,004	-1,243	+
		L_{em}	5,07E-04	0,297	0,009	-1,445	+
A8 N = 132	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	S_{moy}	1,15E-15	0,386	-0,117	0,131	-
		R_{rms}	4,73E-11	0,279	-0,324	0,257	-
		R_{std}	5,67E-05	0,111	-0,283	0,202	-
		H_{LR}	4,72E-09	0,227	-0,291	0,781	-
		L_{tot}	7,09E-13	0,323	0,001	-0,346	+
		L_{em}	9,32E-11	0,271	0,001	-0,274	+

D'autres exemples de représentations des meilleures relations entre les caractéristiques morphométriques des estrans et le taux de déplacement de la série 1993-2009 sont illustrés dans les figures 5.12 à 5.14.

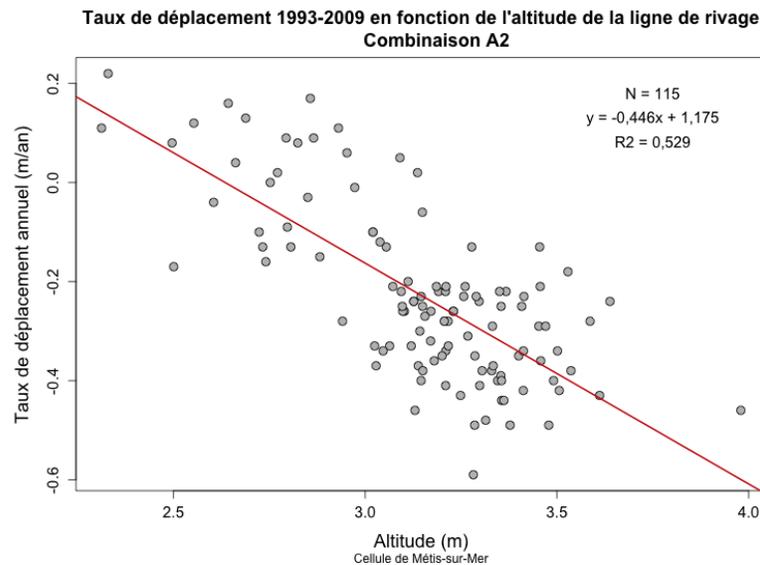


Figure 5. 12 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 1993-2009 en fonction de l'altitude de la ligne de rivage pour la combinaison A2 de la cellule Métis-sur-Mer

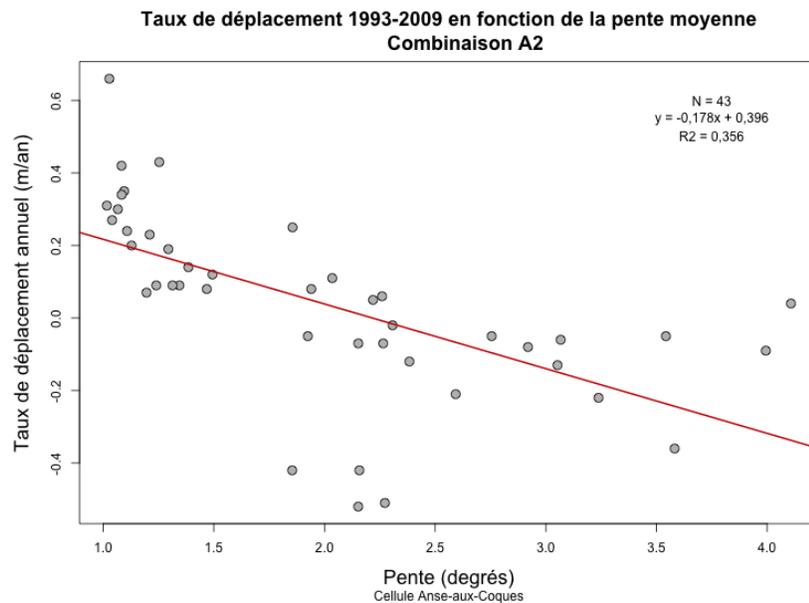


Figure 5. 13 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 1993-2009 en fonction de la pente moyenne de l'estran pour la combinaison A2 de la cellule Anse-aux-Coques.

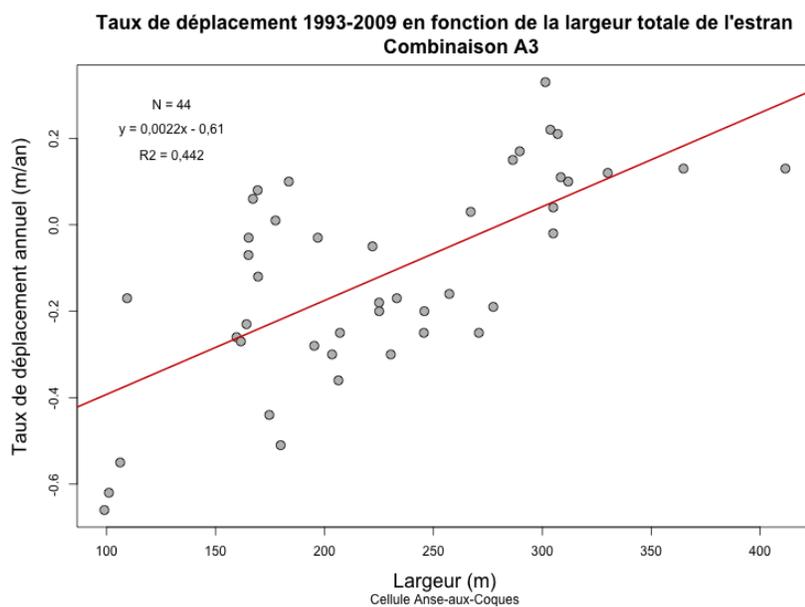


Figure 5. 14: Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 1993-2009 en fonction de la largeur totale de l'estran pour la combinaison A3 de la cellule Anse-aux-Coques.

Dans la majorité des combinaisons au sein des cellules hydrosédimentaires, il existe, d'une part, davantage de relations entre les caractéristiques morphométriques et les taux de déplacement 1993-2009, qu'avec ceux de la série 2009-2012, et, d'autre part, que ces relations sont plus fortes pour la première période que pour la seconde. On constate que la relation la plus fréquemment retrouvée dans les estrans rocheux (combinaisons A1, A2 et A3) concerne soit l'indice de rugosité « moyenne quadratique » ou l'altitude de la ligne de rivage pour les deux périodes (1993-2009 et 2009-2012). De plus, tout comme avec les groupes de données par combinaison et par cellule hydrosédimentaire, le sens des relations obtenues pour la série 2009-2012 est opposé à celui des relations obtenues avec la série 1993-2009. La figure 5.15, présentant le résultat de la régression au sein de la combinaison A3 dans la cellule Sainte-Flavie, illustre un bon exemple de cette relation pour la période 2009-2012. Pour les autres combinaisons, il ne semble pas y avoir de patron particulier quant aux caractéristiques morphométriques étant le mieux reliées au taux de déplacement des deux périodes.

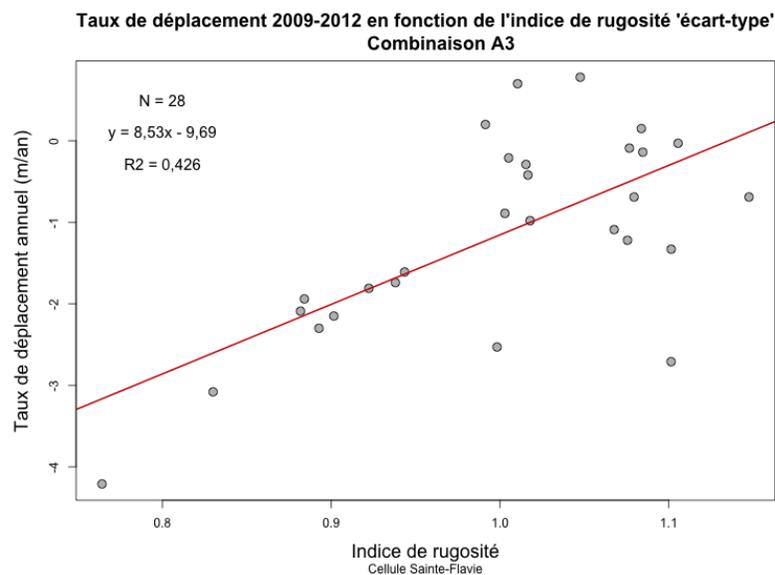


Figure 5.15: Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 2009-2012 en fonction de l'indice de rugosité « écart-type » de l'estran pour la combinaison A3 de la cellule Sainte-Flavie.

Les résultats montrent que la combinaison qui est la plus fréquente pour chacune des cellules ne correspond pas toujours à la combinaison comportant les meilleures relations entre les composantes morphométriques et le taux de déplacement. Par exemple, malgré le fait que la combinaison A8 soit dominante dans les cellules de l'Anse-aux-Coques, Casse-Pierre et Saint-Ulric – Matane, on y retrouve très peu de relations entre les caractéristiques des estrans et les taux de déplacement de la côte. Dans ce cas, ce résultat pourrait à nouveau être expliqué par l'hétérogénéité et de la variété trop importante de la composition des estrans de A8.

Enfin, concernant les coefficients de détermination élevés obtenus pour la cellule de Métis-sur-Mer, il faut tenir compte de la présence des clusters, présentés à la fin de la section 5.2.2.1. Les combinaisons A2 et A5, présentant les plus fortes relations, sont séparées géographiquement en deux groupes distincts (voir Annexe XII pour la représentation des clusters sur la carte de la cellule Métis-sur-Mer). Ces « clusters » sont particulièrement bien observables dans le cas de la combinaison A2 (Figure 5.16). Dans ce cas, la relation forte entre la largeur de l'estran et le taux de déplacement est artificielle et s'explique plutôt par la présence de deux clusters de transects éloignés n'ayant pas la même orientation de la côte et donc, une exposition différente aux vagues. Par ailleurs, le cluster 1 montre que la côte est relativement stable ou en accrétion, tandis que le cluster 2 est en érosion. Par conséquent, il est important de tenir compte des spécificités locales (p. ex. irrégularité du tracé de la côte, présence d'écueil rocheux ou d'embouchure d'un ruisseau) associées à chaque échelle spatiale.

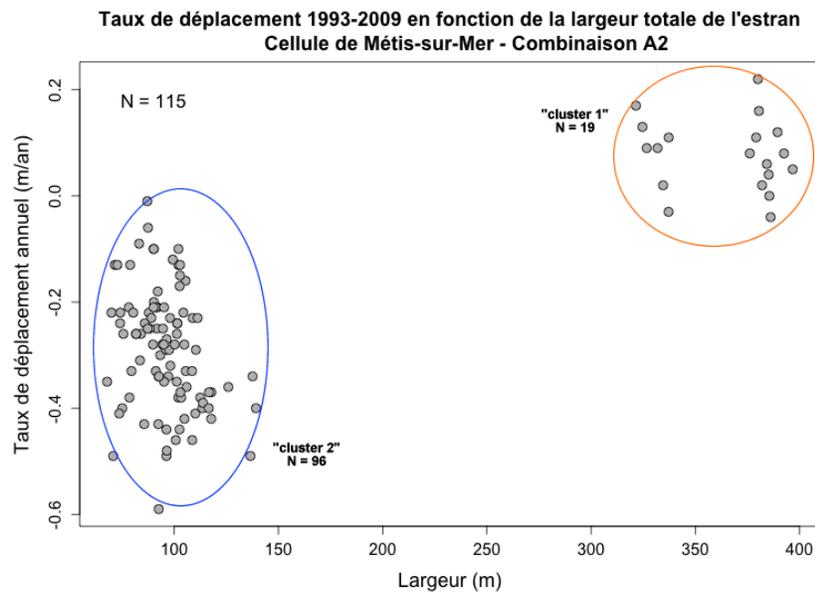


Figure 5. 16 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 1993-2009 et la largeur totale de l'estran pour la combinaison A2 de la cellule de Métis-sur-Mer. Deux groupes (« clusters ») distincts sont observables.

5.2.3. RESULTATS A L'ECHELLE DES SITES SPECIFIQUES

Rappelons que les sites représentent les combinaisons A2, A3 et A8, correspondant aux combinaisons les plus fréquentes sur la côte à l'étude. Les sites 1 à 6 se situent dans le secteur Baie-des-Sables – Matane, les sites 7 et 9 se retrouvent dans le secteur de Métis-sur-Mer, le site 8 est situé près de la Pointe Leggatt et le site 10 se situe à l'est de Sainte-Flavie. Leur composition est la plus homogène possible afin de limiter un biais qu'aurait induit une trop grande variabilité dans la couverture de plate-forme rocheuse, la densité de placage sédimentaire, la couverture d'algue ou la largeur totale de l'estran. Selon notre hypothèse, les analyses produites à une échelle plus fine permettent d'isoler une variable à la fois, afin d'identifier plus clairement quelles caractéristiques morphométriques influencent le plus le

taux de déplacement pour les périodes 1993-2009 et 2009-2012. Travailler à cette échelle permet également de comparer les relations obtenues (force, sens et pente de la régression) entre les sites et de faire le pont entre ces relations et les caractéristiques descriptives ainsi que le profil topographique moyen de chaque site (présenté au chapitre 4, section 4.2.5).

Les ensembles de profils constituant les sites spécifiques présentent le plus grand nombre de relations identifiées ainsi que la plus grande proportion de relations décrites par un R^2 supérieur à 0,25 et 0,50 entre les caractéristiques morphométriques des estrans et les taux de déplacement. Ainsi, plus de 70 % des relations sont décrites par un $R^2 > 0,25$, toutes dans la période 1993-2009. Selon les combinaisons, on compte presque autant de relations avec les taux de déplacement entre 1993 et 2009 qu'avec ceux entre 2009 et 2012 (combinaisons A2 et A3), ou un peu plus de deux fois plus (combinaison A8). L'ensemble des relations significatives identifiées pour chaque site spécifique est présenté succinctement dans les tableaux 5.25 à 5.34.

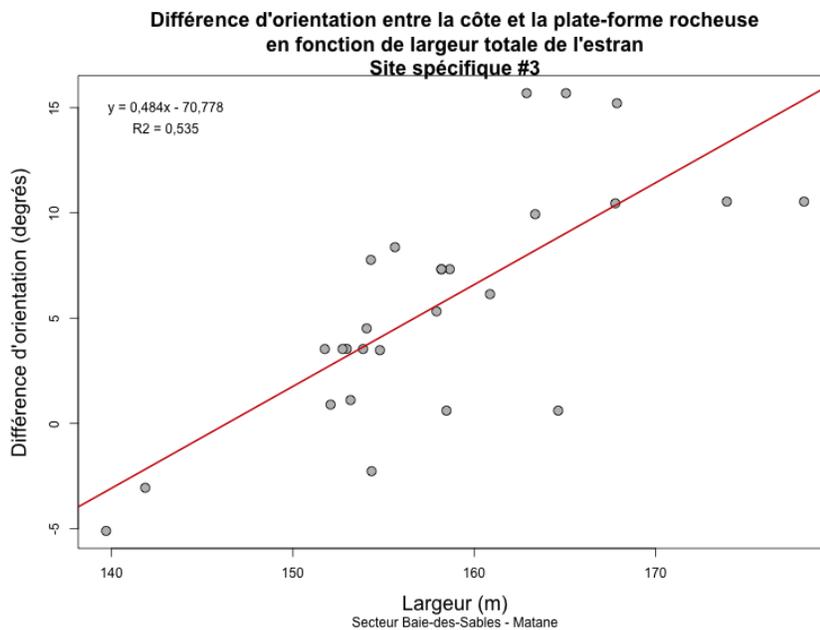


Figure 5. 17 : Relation entre la différence d'orientation côte – strate de la plate-forme en fonction de la largeur totale de l'estran le site spécifique #3.

Tableau 5. 25 : Régressions linéaires concluantes pour le site spécifique #1 (A3).
N = 30 profils

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	S_{moy}	0,021	0,147	-0,233	0,442	-
	R_{rms}	1,97e-07	0,612	-0,696	0,663	-
	R_{std}	1,19e-06	0,560	-1,092	1,100	-
	H_{LR}	2,87e-06	0,532	-0,430	1,210	-
	L_{HE}	5,80e-05	0,424	-0,02	0,254	-
EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	S_{moy}	2,69e-04	0,361	3,762	-12,686	+
	R_{rms}	4,57e-05	0,434	6,485	-9,880	+
	R_{std}	8,65e-04	0,308	9,083	-12,579	+
	H_{LR}	0,002	0,270	3,463	-13,082	+
	L_{HE}	1,08e-06	0,563	0,249	-7,737	+
	$Orient_{diff}$	0,004	0,232	0,026	-0,166	+

Tableau 5. 26 : Régressions linéaires concluantes pour le site spécifique #2 (A2).
N = 47 profils

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	H_{LR}	0,002	0,178	-0,198	0,532	-
EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	S_{moy}	1,53e-04	0,259	1,620	-5,09	+
	R_{rms}	1,90e-05	0,322	5,846	-7,506	+
	R_{std}	6,08e-05	0,288	6,273	-7,706	+
	H_{LR}	2,96e-04	0,238	2,249	-8,069	+
	L_{tot}	0,001	0,197	-0,052	6,346	-
	L_{HE}	3,86e-05	0,301	0,149	-3,724	+
	$Orient_{diff}$	1,11e-04	0,269	0,041	0,296	+

Tableau 5. 27 : Régressions linéaires concluantes pour le site spécifique #3 (A2).
N = 27 profils

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{BE}</i>	3,42e-05	0,483	-0,304	0,364	-
	<i>H_{flex}</i>	4,05e-05	0,477	-0,290	0,250	-
	<i>L_{em}</i>	0,004	0,252	0,005	-0,568	+
	<i>L_{HE}</i>	0,005	0,246	0,020	-0,327	+
EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>S_{BE}</i>	1,53e-05	0,514	-2,295	2,050	-
	<i>H_{flex}</i>	1,55e-06	0,594	-2,361	1,333	-
	<i>L_{tot}</i>	0,008	0,221	0,052	-8,912	+
	<i>L_{em}</i>	7,84e-04	0,343	0,042	-5,479	+
	<i>L_{HE}</i>	1,11e-05	0,527	0,210	-4,071	+

Tableau 5. 28 : Régressions linéaires concluantes pour le site spécifique #4 (A8).
N = 46 profils

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{BE}</i>	0,001	0,190	-0,490	0,341	-
	<i>H_{LR}</i>	0,003	0,160	-0,241	0,748	-
	<i>Orient_{diff}</i>	3,20e-04	0,256	0,002	0,138	+
EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>H_{LR}</i>	0,002	0,193	-64,520	151,130	-
	<i>H_{flex}</i>	0,002	0,195	-42,780	19,410	-

Tableau 5. 29 : Régressions linéaires concluantes pour le site spécifique #5 (A2).
N = 22 profils

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{moy}</i>	1,95e-04	0,502	-0,389	0,741	-
	<i>S_{BE}</i>	6,11e-03	0,299	-0,436	0,498	-
	<i>R_{rms}</i>	0,018	0,224	-1,240	1,208	-
	<i>L_{tot}</i>	2,26e-05	0,600	0,008	-1,286	+
	<i>L_{em}</i>	3,55e-05	0,581	0,005	-0,531	+
	<i>Orient_{diff}</i>	0,018	0,221	-0,002	0,124	-
EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>S_{BE}</i>	0,005	0,302	-0,071	1,900	-

Tableau 5. 30 : Régressions linéaires concluantes pour le site spécifique #6 (A8).
N = 36 profils

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{moy}</i>	0,002	0,227	0,461	-0,596	+
	<i>S_{BE}</i>	5,70e-05	0,365	0,773	-0,373	+
	<i>R_{rms}</i>	0,004	0,192	-0,698	0,555	-
	<i>H_{flex}</i>	3,33e-04	0,299	0,344	-0,078	+
	<i>L_{tot}</i>	3,36e-07	0,526	-0,003	0,711	-
	<i>L_{HE}</i>	0,001	0,254	-0,030	0,685	-
EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>R_{rms}</i>	0,030	0,101	-4,010	2,599	-

Tableau 5. 31 : Régressions linéaires concluantes pour le site spécifique #7 (A8).
N = 43 profils

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{moy}</i>	0,006	0,147	0,079	-0,464	+
	<i>H_{LR}</i>	1,71e-05	0,351	-0,217	0,551	-
	<i>L_{tot}</i>	2,75e-05	0,336	-0,006	0,210	-
EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>S_{moy}</i>	0,004	0,162	1,317	-2,34	+
	<i>H_{LR}</i>	1,90e-02	0,107	-0,014	0,865	-

Tableau 5. 32 : Régressions linéaires concluantes pour le site spécifique #8(A2).
N = 28 profils

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{moy}</i>	1,51e-04	0,408	-0,142	0,349	-
	<i>R_{rms}</i>	5,33e-07	0,612	-0,684	0,787	-
	<i>R_{std}</i>	3,40e-05	0,47	-0,694	0,667	-
	<i>H_{LR}</i>	5,50e-06	0,538	-0,264	0,851	-
	<i>L_{tot}</i>	0,018	0,166	0,003	-0,458	+
	<i>L_{em}</i>	0,033	0,130	0,003	-0,346	+
EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>S_{moy}</i>	0,002	0,285	0,708	-2,096	+
	<i>R_{rms}</i>	6,08e-04	0,447	3,462	-4,345	+
	<i>R_{std}</i>	0,002	0,281	3,221	-3,428	+
	<i>H_{LR}</i>	2,63e-04	0,384	1,322	-4,627	+

Tableau 5. 33 : Régressions linéaires concluantes pour le site spécifique #9 (A3).
N = 27 profils

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	H_{LR}	7,40e-04	0,335	-0,271	0,673	-
	R_{rms}	3,60e-04	0,369	-0,435	0,442	-
	L_{em}	0,034	0,129	-0,006	0,106	-
EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	L_{tot}	0,009	0,206	-0,030	1,736	-

Tableau 5. 34 : Régressions linéaires concluantes pour le site spécifique #10 (A2).
N= 25 profils

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	S_{moy}	6,72e-05	0,484	-0,727	0,906	-
	H_{LR}	3,54e-04	0,408	-0,425	1,295	-
	R_{rms}	3,10e-04	0,414	-1,193	1,040	-
	L_{em}	0,002	0,329	0,004	-0,817	+
EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	R_{rms}	0,024	0,168	6,233	-7,450	+

Le nombre important de relations identifiées et le R^2 plus élevé que l'on retrouve dans ces ensembles de données plus restreints pourraient s'expliquer par le fait que les variables sont isolées au maximum possible, tout en gardant un effectif de profils qui demeure intéressant statistiquement, ce qui permet d'identifier plus précisément les caractéristiques morphométriques qui expliqueraient le taux de déplacement mesuré de la côte pour les deux périodes.

Les sites où l'on retrouve le plus grand nombre de relations où $R^2 > 0,25$ pour la période 1993-2009, sont les sites #1, #5, #8 et #10 (Tableaux 5.25, 5.29, 5.32 et 5.34). Pour la période 2009-2012, il s'agit des sites #1, #2, #3 et #8 (Tableaux 5.25, 5.26, 5.27 et 5.32). À l'exception du site #1, tous les autres sites précédemment mentionnés correspondent à des combinaisons A2 (plate-forme rocheuse avec cordon littoral en haut-estran). En comparaison avec les résultats obtenus aux autres échelles spatiales, la combinaison A2 correspond souvent à celle où l'on retrouve le plus grand nombre de relations identifiées, mais pas nécessairement les coefficients de détermination les plus élevés. On peut donc supposer que, à l'échelle locale, cette combinaison possède certains attributs prédisposant l'estran à influencer davantage le taux de déplacement de la côte par rapport aux autres combinaisons, mais que d'autres facteurs environnementaux, tels le degré d'anthropisation, la proportion couverte par une plate-forme rocheuse et la couverture algale, doivent être pris en compte lors des analyses aux plus grandes échelles spatiales pour mieux cerner les variables influençant réellement le taux de déplacement.

Étonnamment, le sens des relations ne suit pas la même tendance que tous les autres ensembles de données. Cette variation du sens d'un site à l'autre est difficile à expliquer. L'hypothèse la plus probable que l'on puisse poser, c'est que la présence de particularités locales (p.ex. : écueil, densité d'algues, présence de mégablocs, cordon littoral en avant-côte) influencerait la manière dont la morphologie de l'estran influence le taux de déplacement.

Afin d'éviter ce biais, les sites similaires (même combinaison, même géologie et même cellule hydrosédimentaire), situés à quelques kilomètres les uns des autres, pourraient être rassemblés en un seul et même ensemble de données à analyser. Cela permettrait d'augmenter le nombre de profils étudiés tout en réduisant le biais potentiellement induit par une particularité très locale. D'autres analyses seraient nécessaires pour valider cette hypothèse.

Finalement, quatre exemples des plus fortes relations identifiées à cette échelle sont présentés dans les figures 5.18 à 5.21. Il est possible d'observer qu'il n'y a pas de valeur extrême qui aurait pu induire un biais dans le calcul des coefficients de détermination (R^2).

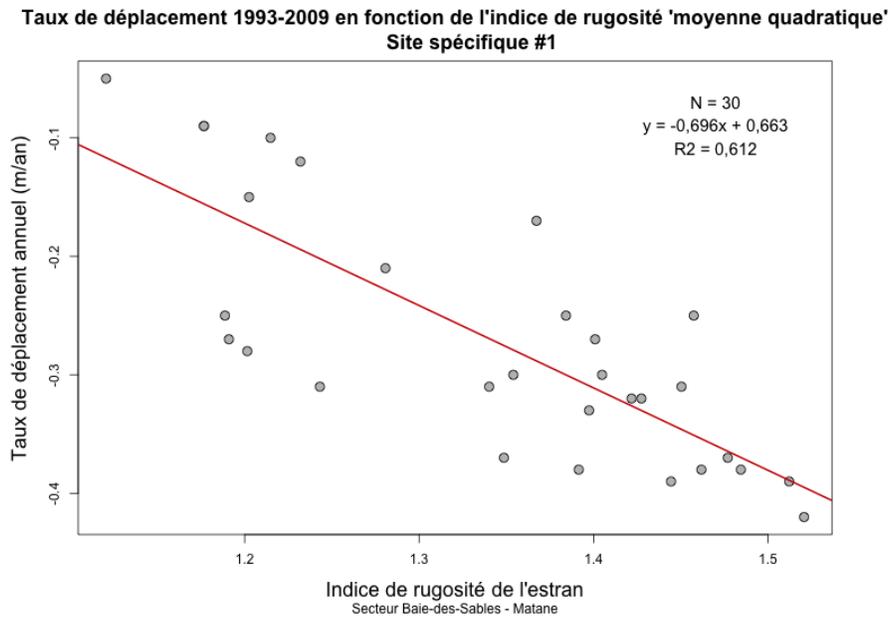


Figure 5. 18 : Relation entre le taux de déplacement annuel du trait de côte 1993-2009 en fonction de l'indice de rugosité « moyenne quadratique » de l'estran pour le site spécifique #1.

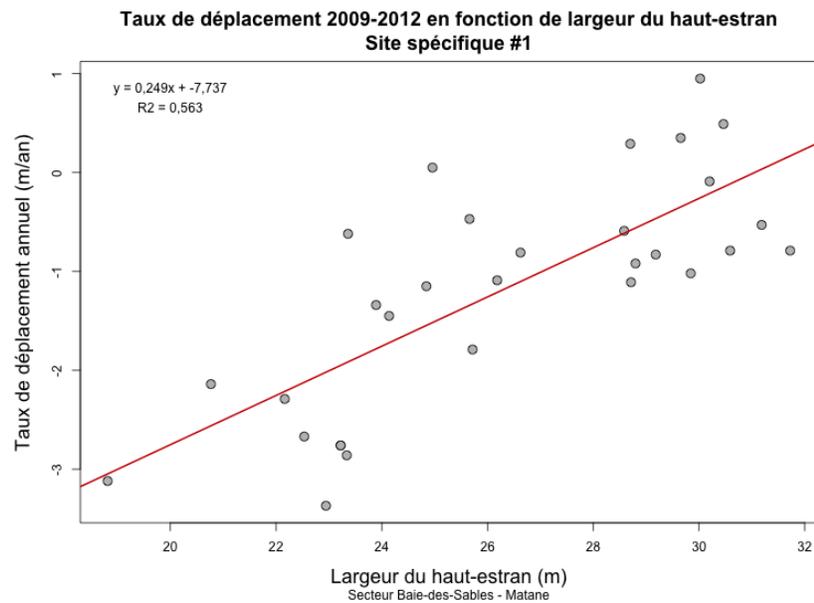


Figure 5. 19 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 2009-2012 en fonction de la largeur du haut-estran pour le site spécifique #1.

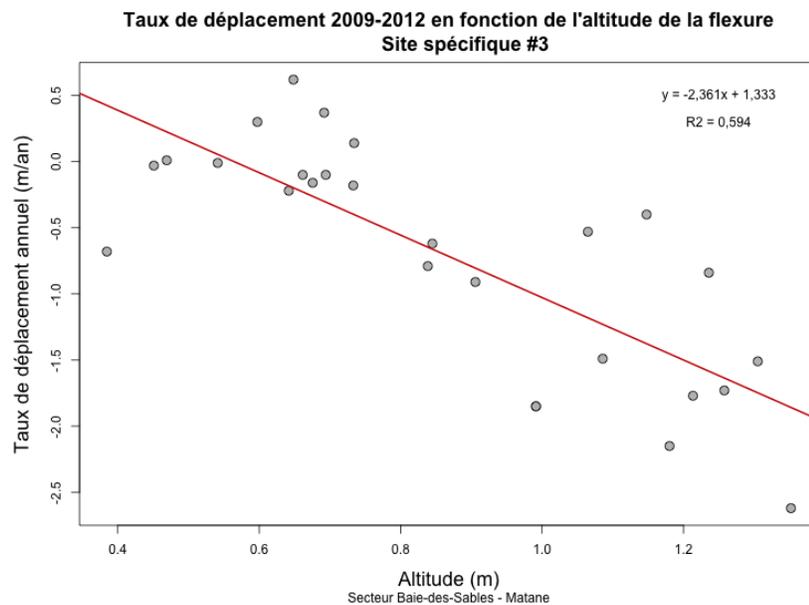


Figure 5. 20 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 2009-2012 en fonction de l'altitude de la ligne de flexure pour le site spécifique #3.

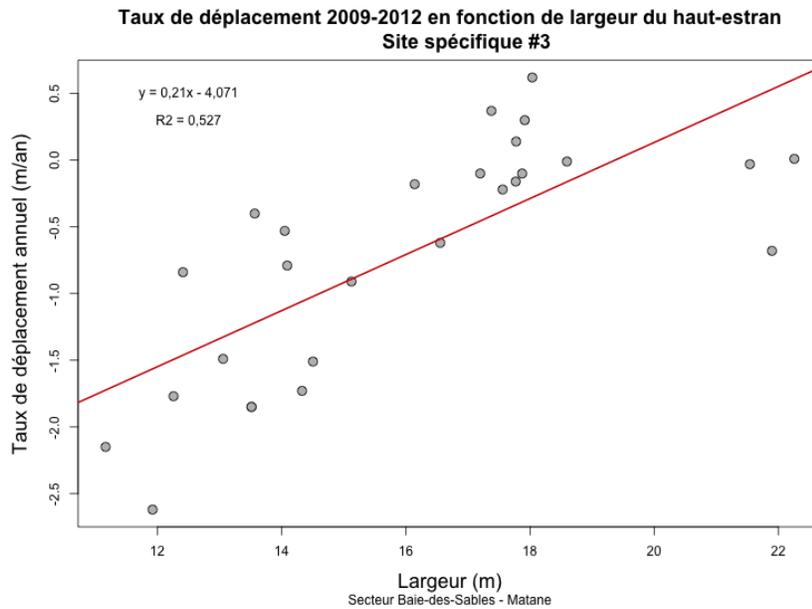


Figure 5. 21 : Relation entre le taux de déplacement annuel de la ligne de rivage 2009-2012 en fonction de la largeur du haut-estran pour le site spécifique #3.

5.3.ANALYSES COMPARATIVES

En réponse à la principale question de recherche de la présente étude, les résultats des analyses avancées présentés à la section 5.2 permettent d'affirmer que la géomorphologie de l'estran joue bel et bien un rôle sur l'aléa érosion, plus spécifiquement sur les côtes à terrasse de plage (représentée par la lettre « A » dans les combinaisons). Les caractéristiques impliquées ainsi que la force et le sens des relations sont variables puisqu'ils dépendent d'une combinaison de paramètres environnementaux, principalement la morphologie de l'estran et l'échelle d'analyse. Pour tenter d'expliquer cette variabilité, une troisième variable, correspondant aux caractéristiques descriptives identifiées suite aux analyses ANOVA, a été intégrée aux illustrations des relations significatives résultantes des régressions linéaires. Les résultats sont présentés à la section 5.3.1.

De plus, des différences notables sont observables selon l'échelle spatiale utilisée, soit 1) à l'échelle globale (Pointe-au-Père – Matane), 2) à l'échelle régionale (Baie-des-Sables – Matane), 3) à l'échelle sectorielle (une cellule hydrosédimentaire) et 4) à l'échelle locale (un site spécifique d'une étendue variant entre 400 m et 900 m). On observe également des relations différentes selon la période analysée (1993-2009 ou 2009-2012) pour le calcul du taux de déplacement annuel des côtes à terrasse de plage. Les analyses comparatives des résultats selon l'échelle spatiale sont détaillées dans la section 5.3.2, et selon l'échelle temporelle dans la section 5.3.3.

5.3.1. COUPLAGE DES CARACTERISTIQUES DESCRIPTIVES ET MORPHOMETRIQUES

Cette section consiste en un résumé des observations faites à partir des illustrations des régressions linéaires auxquelles sont incorporées les classes de caractéristiques morphométriques, ainsi que les caractéristiques descriptives identifiées (suite aux analyses ANOVA) comme ayant une relation avec la variation du taux de déplacement. Étant donné que les analyses ANOVA n'ont été effectuées que sur les combinaisons de l'échelle globale et l'ensemble des 2176 profils, seuls les groupes de données classés par combinaison sont analysés puisqu'il y a trop de bruit dans les graphiques illustrant l'ensemble des données du site d'étude.

Rappelons que dans le cadre des analyses ANOVA pour la présente recherche, seule l'existence d'une différence significative intergroupe a été testée puisqu'il s'agit d'un projet exploratoire. C'est pourquoi, une fois illustrées, certaines caractéristiques (p. ex. le degré d'anthropisation) peuvent paraître non reliées avec le taux de déplacement puisque les relations sont trop faibles pour être visibles. Parmi les caractéristiques descriptives identifiées dans les ANOVA, la géologie du substrat (5.3.1.2) et l'orientation de la côte (5.3.1.3) sont les deux variables dont les différences intergroupes sont visibles dans

différentes relations de plusieurs combinaisons. Cela laisse à supposer que les relations les concernant sont plus fortes que pour les autres caractéristiques. Il serait pertinent de tester la force et le sens de ces relations pour approfondir cette question dans une future recherche.

5.3.1.1. RELATION AVEC LE DEGRE D'ANTHROPISATION

Les analyses ANOVA, présentées au chapitre 5, montrent qu'il existe une relation entre le degré d'anthropisation et le taux de déplacement mesuré entre 1993 et 2009. En effet, la moyenne des taux de déplacement des côtes « anthropisées » est différente de celle des côtes « naturelles » pour les combinaisons A1, A2, A4, A5 et A7.

Outre la différence de moyenne du taux de déplacement en fonction des segments « naturels » et « anthropisés », on peut également observer une différence entre ces deux zones en fonction de la pente et de la rugosité des estrans de combinaison A1 et en fonction de la largeur des estrans de combinaison A7. Par exemple, la figure 5.22, montre que la différence entre les moyennes de taux de déplacement pourrait aussi s'expliquer par la différence de la moyenne des pentes de l'estran de ces deux degrés d'anthropisation (autres exemples présentés à l'Annexe XIII). Quant aux autres combinaisons concernées (A2, A4 et A7), cette différence intergroupe, identifiée dans les ANOVA, n'est pas visible sur les graphiques illustrant les relations entre les caractéristiques morphométriques et le taux de déplacement, et ce, pour les deux intervalles de temps. La figure 23 illustre cette absence de distinction claire entre les degrés d'anthropisation. Il est probable que la différence entre les moyennes soit très faible.

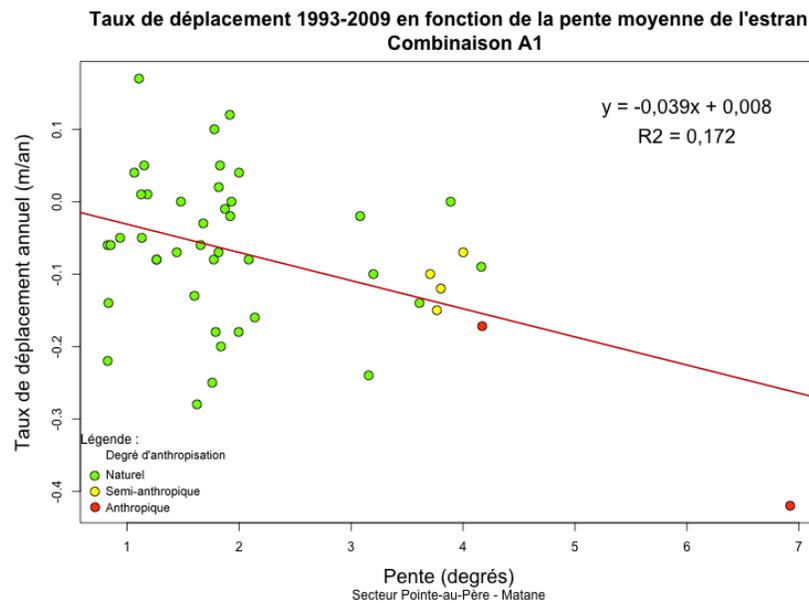


Figure 5. 22 : Illustration de la variable "degré d'anthropisation" avec la relation entre la pente moyenne de l'estran et le taux de déplacement 1993-2009 pour A1.

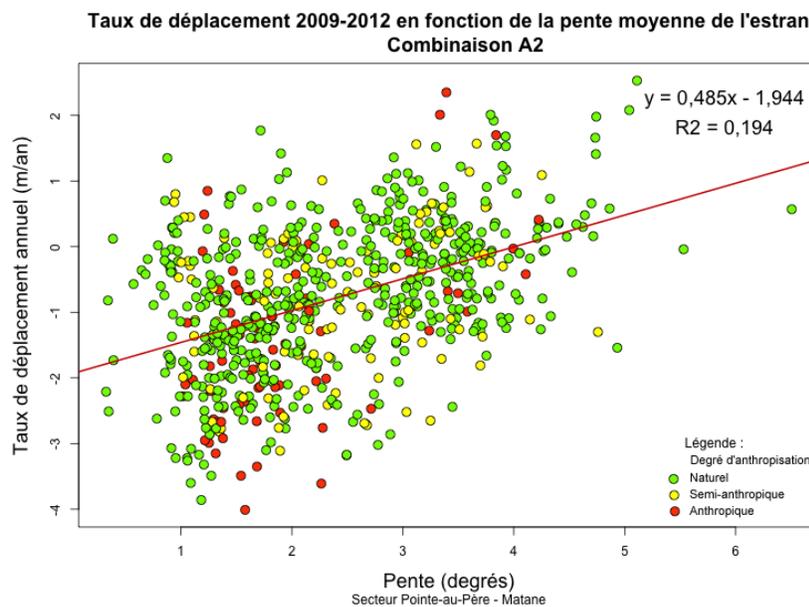


Figure 5. 23 : Illustration de la variable "degré d'anthropisation" avec la relation entre la pente moyenne de l'estran et le taux de déplacement 2009-2012 pour A2.

Par ailleurs, l'existence de cette corrélation entre le degré d'anthropisation et le taux de déplacement remet en question l'étendue de la zone tampon à utiliser en périphérie des infrastructures anthropiques. Étant donné qu'il existe un biais potentiel sur les résultats des profils d'une côte « anthropisée », il y aurait lieu de prévoir un périmètre tampon qui s'étende jusqu'aux limites du segment « anthropisé » avoisinant, soit environ 50 mètres supplémentaires au périmètre tampon prédéfini dans la méthodologie de la présente recherche. Davantage de recherches sont nécessaires afin d'établir avec précision la portée d'influence de chaque type d'infrastructure anthropique présenté au chapitre 1 sur la dynamique hydrosédimentaire du Québec maritime.

5.3.1.2. RELATION AVEC LA FORMATION GEOLOGIQUE SUBSTRAT

En observant les graphiques illustrant la géologie du substrat, quelques groupes semblent se distinguer également en fonction des caractéristiques morphométriques des estrans. Par exemple, la formation géologique de Cap-Chat 1, dans la combinaison A2 et A3, est décrite par un estran plus étroit et une pente plus élevée que les autres formations géologiques (Figures 5.24 et 5.25). Cette observation concorde avec le résultat du test post hoc qui montrait une différence significative entre le mélange de Cap-Chat 1 et les autres formations. Par exemple, on peut constater par observation que le mélange Cap-Chat 1 se distingue des deux autres groupes au point de vue de la pente moyenne de l'estran, et non selon le taux de déplacement (Figure 5.26). Ce résultat concorde avec le résultat négatif de l'analyse ANOVA de ces variables. Toutefois, il faut rester prudent dans l'interprétation puisque les formations regroupent des roches très différentes, à l'exception des formations de *Des Landes* et de *l'Orignal* qui sont plus homogènes.

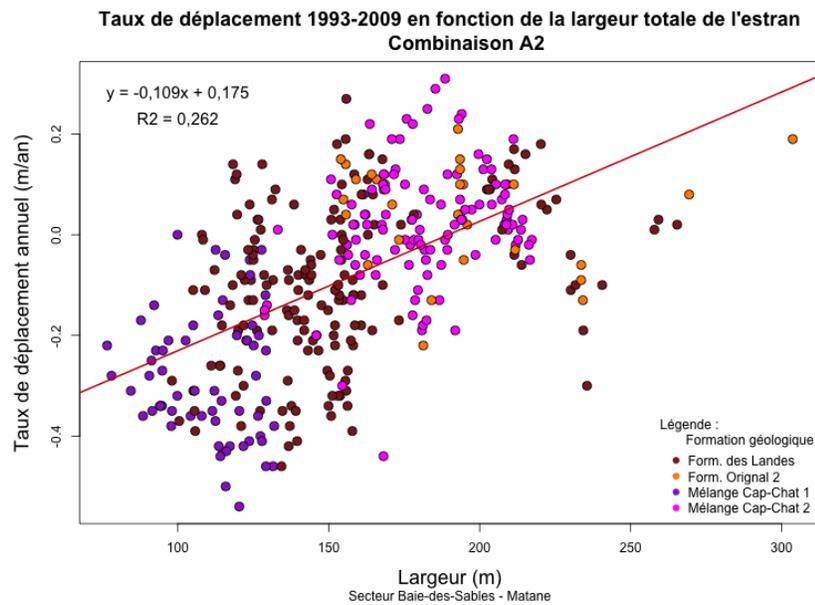


Figure 5. 24 : Illustration de la variable "géologie du substrat" avec la relation entre la largeur totale de l'estran et le taux de déplacement 1993-2009 pour A2.

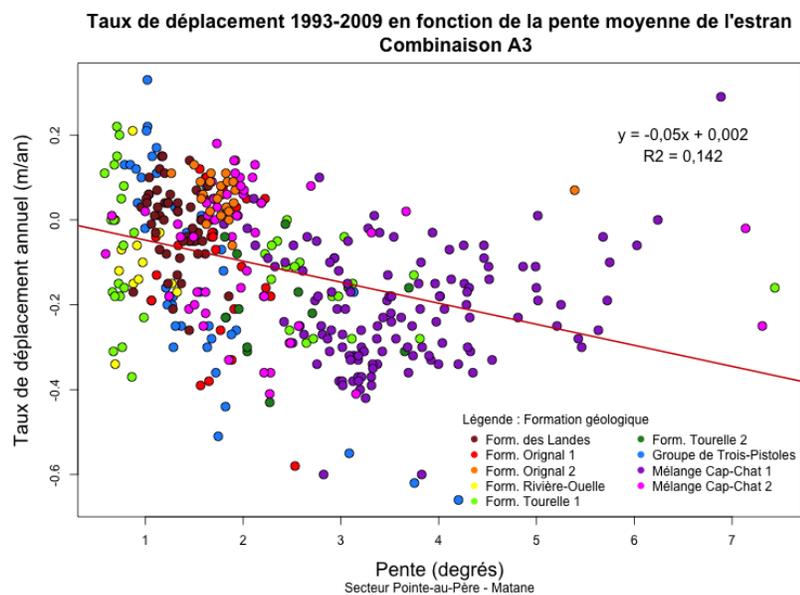


Figure 5. 25 : Illustration de la variable "géologie du substrat " avec la relation entre la pente moyenne de l'estran et le taux de déplacement 1993-2009 pour A3.

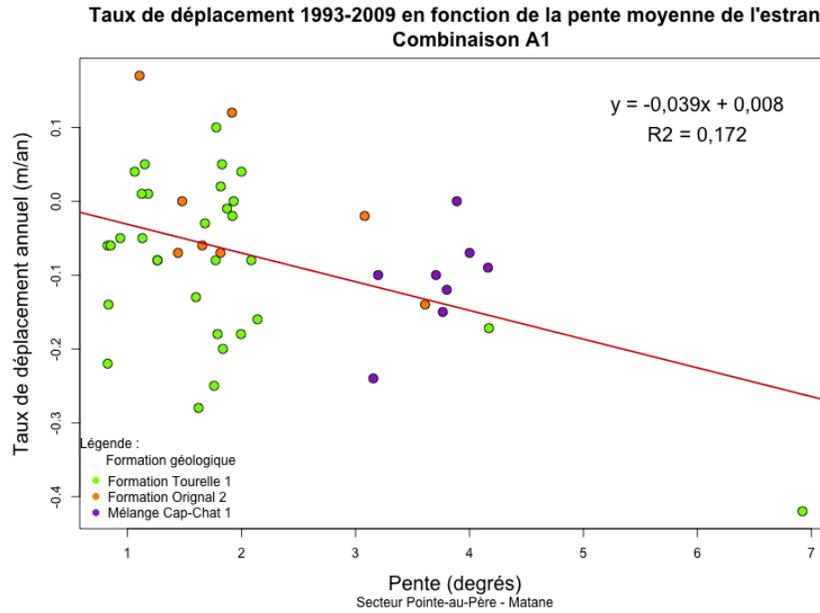


Figure 5. 26 : Illustration de la variable "géologie du substrat " avec la relation entre la pente moyenne de l'estran et le taux de déplacement 1993-2009 pour A1.

5.3.1.3. RELATION AVEC L'ORIENTATION DE LA CÔTE

Tel que révélé par les analyses ANOVA, l'orientation de la côte est un paramètre relié au taux de déplacement 1993-2009 pour les combinaisons A1, A2 et A7. La figure 5.23 permet d'observer que, pour la combinaison A1, les estrans d'une côte orientée vers le N ou le NNW possèdent une rugosité plus élevée et sont associés à un recul plus important de la côte que ceux où la côte est orientée vers le NW, WNW et W.

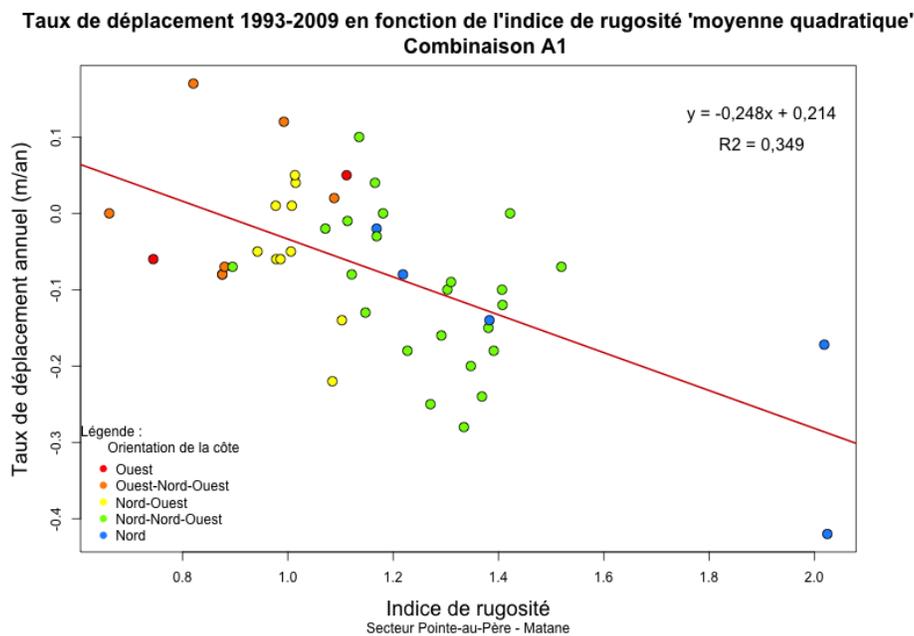


Figure 5. 27 : Illustration de la variable "orientation de la côte" avec la relation entre l'indice de rugosité « moyenne quadratique » et le taux de déplacement 1993-2009 pour A1.

5.3.1.4. RELATION ENTRE LES CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES

Enfin, on peut observer des relations évidentes entre certaines caractéristiques morphométriques des estrans. En effet, on peut observer que les indices de rugosité sont fortement liés à la pente moyenne et la largeur de l'estran et ce, dans toutes les combinaisons (Figure 5.28 et 5.29). Les relations sont plus fortes lorsqu'on prend l'indice de rugosité « moyenne quadratique » ($R^2 = 0,725$ avec la pente ; $R^2 = 0,628$ avec la largeur) plutôt que l'indice « écart-type » ($R^2 = 0,401$ avec la pente ; $R^2 = 0,356$ avec la largeur). La relation rugosité/largeur est également plus forte avec la largeur émergée plutôt que la largeur totale, probablement en raison de la longueur des profils qui diffère entre les deux largeurs : la rugosité et la largeur émergée ont été calculées jusqu'à la limite des données LiDAR valides, alors que la largeur totale va au-delà de cette limite. En mettant directement en relation la rugosité de l'estran et sa pente moyenne sur l'ensemble des 2176 profils, on peut observer une forte relation linéaire positive (Figure 5.30). En faisant la même analyse avec la rugosité et la largeur émergée de l'estran (choisie parce que les profils sont de même longueur), on obtient une forte relation de puissance (Figure 5.31). Puisque la pente est calculée en utilisant la largeur ($S_{moy} = \tan^{-1} \left(\frac{H_{LR}}{L_{em}} \right)$), et que nous venons de montrer la forte relation existante entre les indices de rugosité et la pente, il est logique d'observer une relation entre l'indice de rugosité et la largeur : plus la largeur augmente, plus l'indice de rugosité est faible.

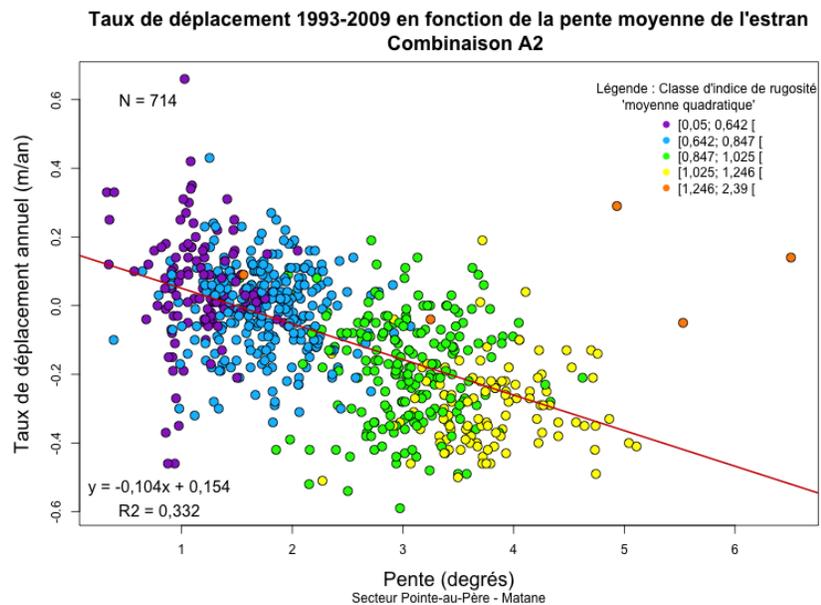


Figure 5. 28 : Illustration des classes de rugosité « moyenne quadratique » avec la relation entre la pente moyenne et le taux de déplacement 1993-2009 pour A2.

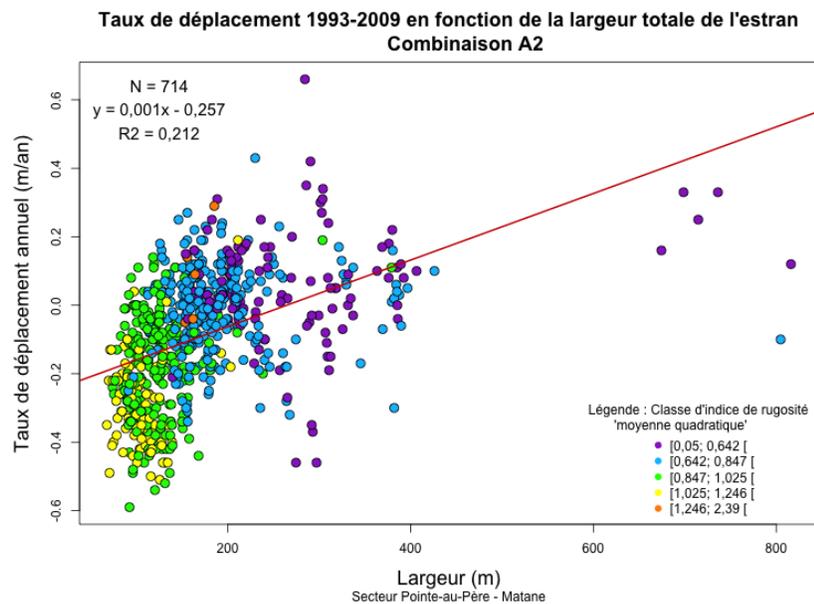


Figure 5. 29 : Illustration des classes de rugosité « moyenne quadratique » avec la relation entre la largeur totale et le taux de déplacement 1993-2009 pour A2.

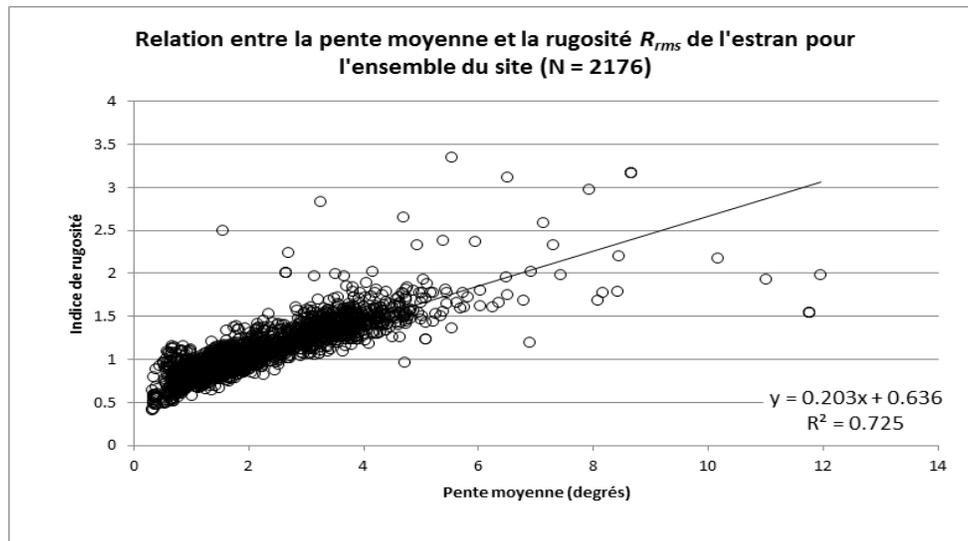


Figure 5. 30 : Relation linéaire positive entre l'indice de rugosité en fonction de la pente moyenne sur l'ensemble des estrans étudiés.

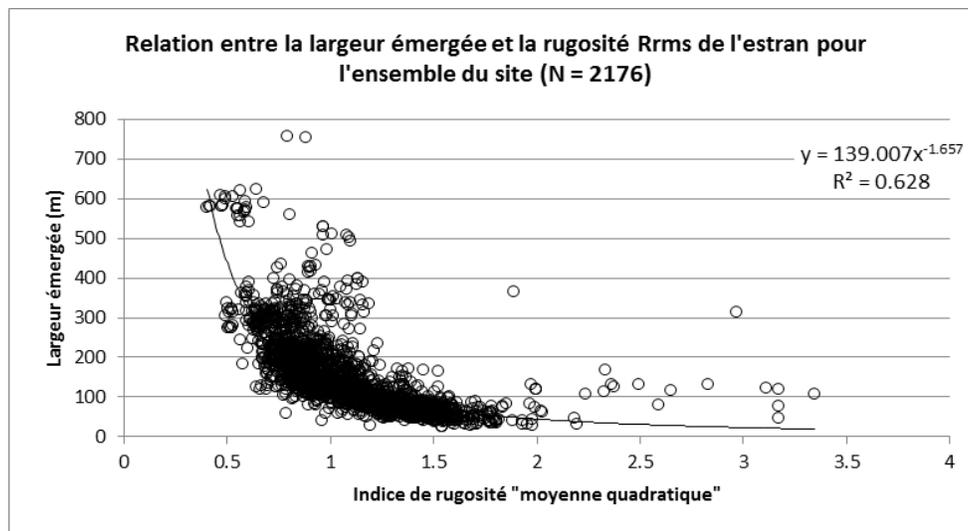


Figure 5. 31 : Relation de puissance négative entre l'indice de rugosité en fonction de la largeur émergée sur l'ensemble des estrans étudiés.

5.3.2. ANALYSES COMPARATIVES DES ECHELLES SPATIALES

En observant les résultats de chaque échelle spatiale, soit l'ensemble du site (échelle globale), le secteur Baie-des-Sables – Matane (échelle régionale), les cellules hydrosédimentaires (échelle sectorielle) et les sites spécifiques (échelle locale), on note trois faits importants.

Premièrement, on observe généralement un coefficient de détermination (R^2) plus élevé lorsqu'on réduit la taille du secteur d'analyse. Ce résultat n'est pas surprenant puisqu'il pourrait s'expliquer par la diminution de la variabilité spatiale et du nombre de mesures, ce qui diminue le bruit dans les données. Par ailleurs, en comparant les résultats de chaque échelle spatiale pour une même caractéristique, on observe que les plus fortes relations sont généralement aux échelles plus fines. En effet, on peut observer une augmentation de la force de la relation lorsqu'on passe de l'échelle globale à l'échelle régionale, puis à l'échelle locale (ex. Figure 5.32). Cependant, la force des relations à l'échelle sectorielle (c.-à-d. des cellules) ne suit pas cette logique. En fait, elle est bien souvent similaire, et parfois même plus faible, que celle de l'échelle globale. Ce résultat pourrait s'expliquer par la variabilité intercellulaire des conditions environnementales telles que le degré d'anthropisation, le type de côte et d'estran principal, ainsi que les spécificités morphologiques de la côte. La figure 5.32 montre un exemple de comparaison des échelles spatiales concernant la relation entre la largeur émergée et le taux de déplacement 1993-2009. La cellule de l'Anse-aux-Coques (échelle sectorielle) et le site #1 (échelle locale) ont été choisis parce que ces groupes présentent le plus grand nombre de relations à leur échelle respective. Les figures présentant les autres caractéristiques sont présentées à l'annexe XIV.

Relation entre le taux de déplacement de la côte en fonction de la largeur émergée de l'estran à différentes échelles spatiales

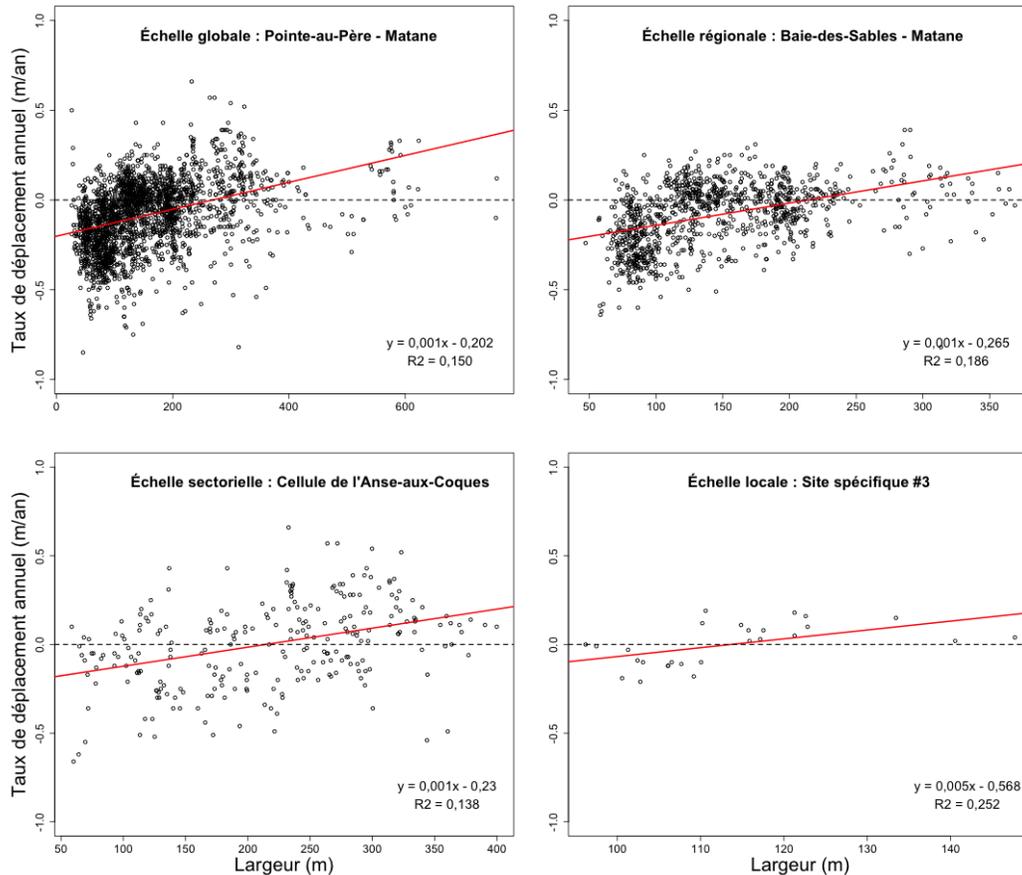


Figure 5. 32 : Comparaison de la relation entre le taux de déplacement 1993-2009 et la largeur émergée de l'estran pour l'ensemble des données de chaque échelle spatiale utilisée.

Deuxièmement, pour chaque échelle spatiale, on obtient généralement de meilleurs résultats en isolant les mesures selon leur combinaison (types d'estran / côte à terrasse de plage « A » uniquement) plutôt qu'en prenant l'ensemble des mesures. On peut en déduire que la segmentation par type d'estran permet de mieux cibler les caractéristiques morphométriques influençant davantage l'aléa érosion. La figure 5.33 présente un exemple de la comparaison des résultats en utilisant la combinaison A2, où l'on peut observer que la

relation est plus forte à toutes les échelles que celle à la figure 5.32. La combinaison A2 a été sélectionnée parce qu'elle est la plus fréquente sur le site d'étude. La cellule Anse-aux-Coques a été choisie pour l'échelle sectorielle, car les profils de la combinaison A2 de cette cellule présente les plus fortes relations retrouvées dans l'ensemble des groupes de données. Enfin, le site #10 a été choisi pour représenter l'échelle locale puisqu'il est le seul inclus dans la cellule Anse-aux-Coques, et qu'il présente des relations parmi les plus fortes pour chaque caractéristique morphométrique. Les figures illustrant les autres caractéristiques sont présentées à l'annexe XV.

Relation entre le taux de déplacement de la côte en fonction de la largeur émergée de l'estran à différentes échelles spatiales pour la combinaison A2

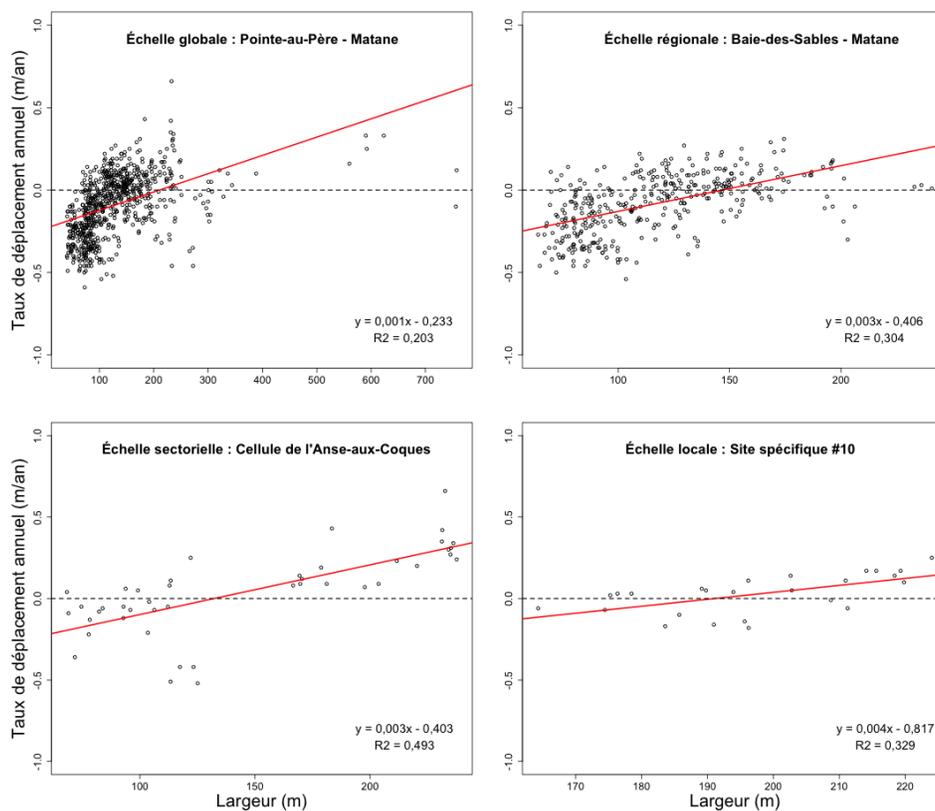


Figure 5. 33 : Comparaison de la relation entre le taux de déplacement 1993-2009 et la largeur émergée de l'estran pour la combinaison A2 de chaque échelle spatiale utilisée.

Troisièmement, nous avons observé que le sens des relations suit le même patron à l'échelle globale, à l'échelle régionale et à l'échelle sectorielle (Figure 5.32, 5.33 et 5.34, voir Annexe XIV et XV pour plus d'exemples). De manière générale, pour la période 1993-2009, une côte tend à s'éroder davantage lorsque l'estran est caractérisé par un estran large à pente forte et à rugosité élevée (Figure 5.34).

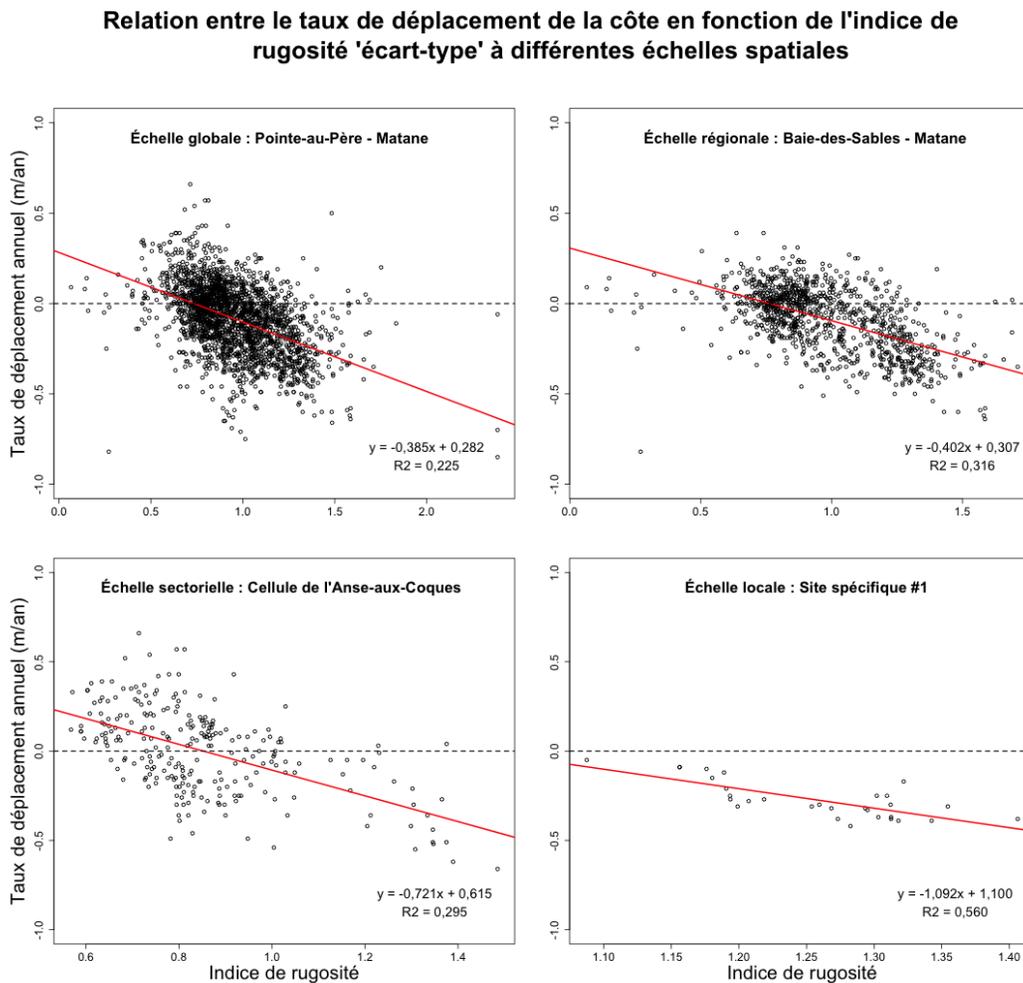


Figure 5. 34 : Comparaison de la relation entre le taux de déplacement 1993-2009 et l'indice de rugosité « écart-type » de l'estran de chaque échelle spatiale utilisée.

Toutefois, ce n'est pas toujours le cas lorsqu'on prend les résultats à l'échelle locale (sites spécifiques). Dans certains cas particuliers, il arrive qu'une ou deux caractéristiques soient décrites par une relation opposée à la tendance générale, notamment dans les sites #6, #7 et #8. En comparant les autres échelles spatiales pour chaque combinaison, les groupes de données composés d'un nombre de profils du même ordre que celui des sites spécifiques présentent les mêmes tendances que celles observées dans les groupes composés d'un plus grand nombre de profils. Contrairement aux groupes de données des sites spécifiques, représentant un segment de côte de moins d'un kilomètre, les profils composant les autres groupes sont répartis sur une étendue de côte allant de plusieurs kilomètres à plusieurs dizaines de kilomètres. L'hypothèse expliquant cette différence en fonction de l'échelle d'analyse est que les groupes de données des échelles globale, régionale et sectorielle représentent les tendances générales associées à chaque type d'estran retrouvé sur les côtes à terrasse de plage, alors que les groupes de données à l'échelle locale pourraient illustrer des tendances particulières, liées à une composition ou une géomorphologie spécifique affectant la dynamique locale. Davantage de mesures sur le terrain seraient nécessaires pour la compréhension de ces différences et l'identification des spécificités locales affectant ces relations à l'échelle locale.

5.3.3. ANALYSE COMPARATIVE DES PERIODES 1993-2009 ET 2009-2012

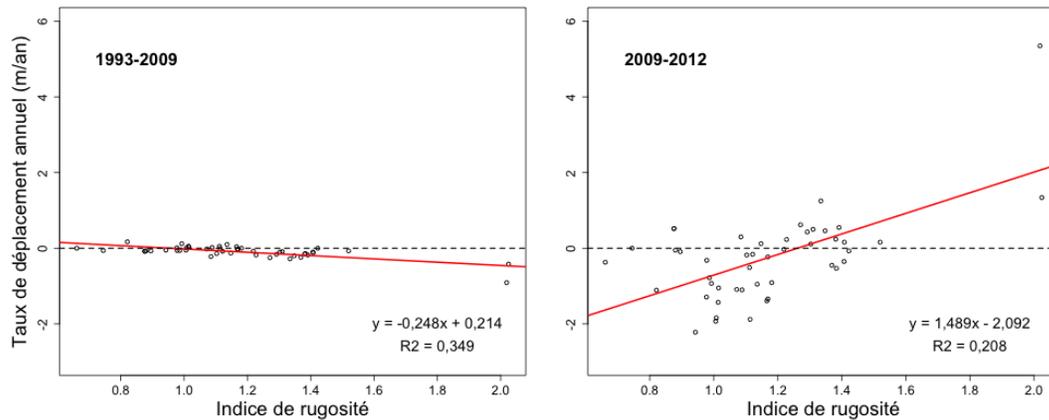
En comparant les relations identifiées avec la période 1993-2009 et la période 2009-2012 pour les côtes à terrasse de plage, trois constats importants retiennent notre attention :

- 1) Le sens des relations identifiées pour la période 1993-2009 est généralement l'opposé de celui des relations identifiées pour la période 2009-2012 ;
- 2) Les relations identifiées pour la période 1993-2009 sont plus nombreuses et mieux corrélées que celles identifiées pour la période 2009-2012 ;
- 3) Les constats 1) et 2) sont observables dans presque tous les groupes de données à l'exception de ceux à l'échelle locale.

5.3.3.1. SENS DES RELATIONS

À l'exception de l'échelle locale, les relations identifiées pour la période 1993-2009 vont dans le sens contraire de celles identifiées pour la période 2009-2012 dans presque tous les groupes de données à toutes les échelles spatiales. En résumé, un estran caractérisé par une pente forte, une rugosité élevée et une petite étendue est associé à un recul de la côte pour la période entre 1993 et 2009, alors qu'il est associé à une stabilité ou une avancée de la côte entre 2009 et 2012. À l'opposé, un estran caractérisé par une pente faible, une rugosité faible et une grande étendue concorde avec une stabilité ou une faible avancée de la côte entre 1993 et 2009, tandis qu'il concorde avec un important recul de la côte entre 2009 et 2012. Les figures 5.35, 5.36 et 5.37 montrent trois exemples de cette tendance pour la combinaison A1 et A3, où la caractéristique de rugosité y est plus importante que les autres types d'estran. Deux figures pertinentes supplémentaires montrant cette tendance avec d'autres caractéristiques morphologiques sont présentées dans l'annexe XVI.

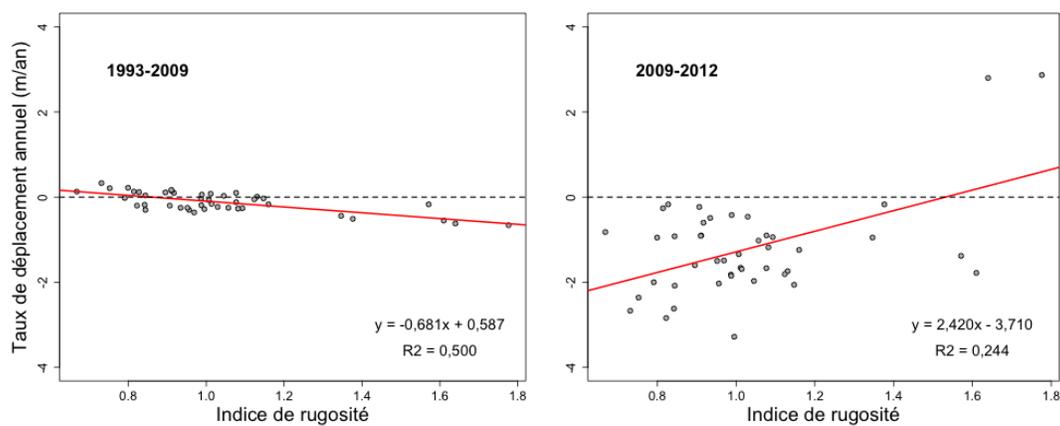
Taux de déplacement de la côte en fonction de l'indice de rugosité 'moyenne quadratique'



Combinaison A1 - Échelle globale (Pointe-au-Père - Matane)

Figure 5. 35 : Comparaison des relations entre les taux de déplacement et l'indice de rugosité « moyenne quadratique » pour la combinaison A1 à l'échelle globale.

Taux de déplacement de la côte en fonction de l'indice de rugosité 'moyenne quadratique'



Combinaison A3 - Échelle sectorielle (cellule Anse-aux-Coques)

Figure 5. 36 : Comparaison des relations concernant l'indice de rugosité « moyenne quadratique » pour la combinaison A3 à l'échelle sectorielle.

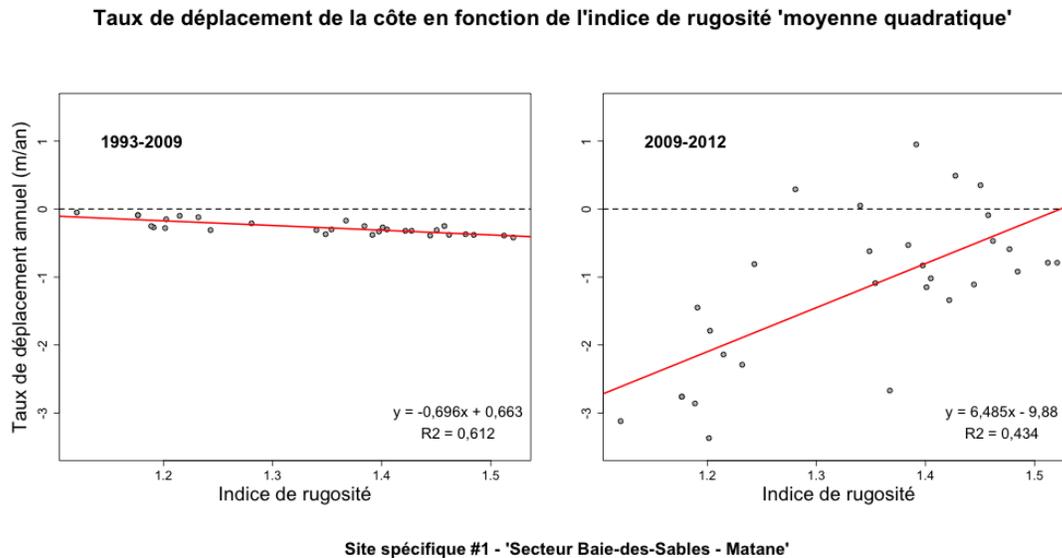


Figure 5. 37 : Comparaison des relations concernant l'indice de rugosité « moyenne quadratique » pour le site 1, caractérisé par une combinaison A3.

À l'échelle locale, on retrouve des relations ayant le même sens pour les deux périodes dans sept des dix sites spécifiques. On constate aux sites #3 et #5, caractérisés par un estran de type 2 (plate-forme rocheuse avec cordon littoral), qu'une augmentation de la pente du bas-estran et/ou de la pente moyenne concorde avec une augmentation du taux d'érosion de la côte, et ce, pour les deux périodes de temps (Figure 5.38). En s'appuyant sur les résultats obtenus à d'autres échelles spatiales avec les autres groupes de combinaison A2, on pourrait alors en conclure que la pente moyenne de l'estran constitue un des facteurs clés expliquant la variation du taux de déplacement pour la combinaison A2 en général, mais que le sens de la relation peut changer dans certaines circonstances, qui restent encore à déterminer, à l'échelle locale.

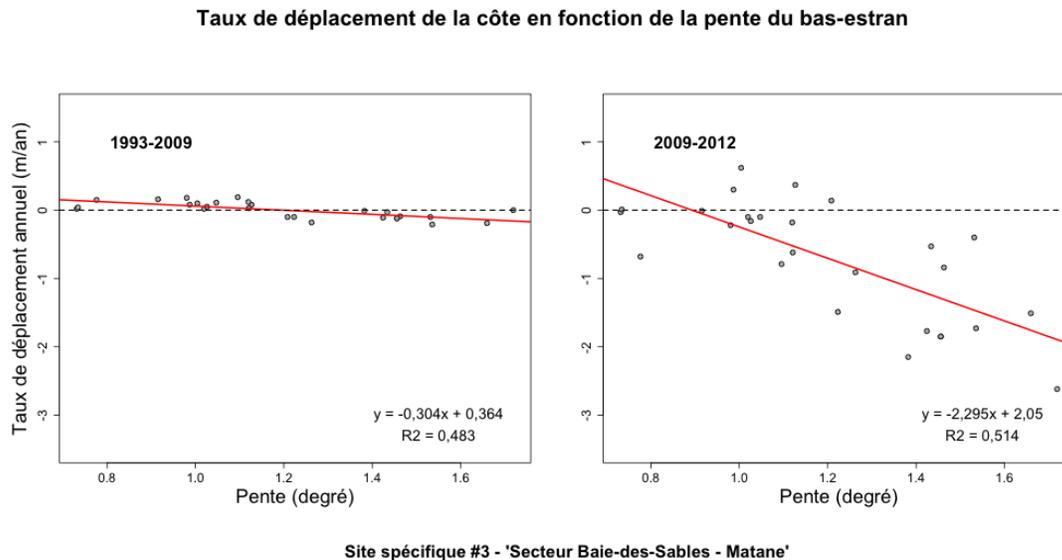


Figure 5. 38 : Comparaison des relations entre les taux de déplacement et la pente moyenne pour le site 3.

Contrairement aux sites #3 et #5, les sites #6 et #7, caractérisés par un estran de type 8 (mixte), montrent qu'une réduction de la pente est associée à une augmentation du taux d'érosion pour les deux périodes. Cependant, il faut noter que les coefficients de détermination (R^2) y sont beaucoup moins élevés et que les points sont plus éloignés de la courbe de tendance que pour la plupart des autres sites (voir Annexe XVI). Il est probable que des facteurs non identifiés ou des conditions particulières à ces sites occasionnent un biais dans les calculs de la relation entre la pente et le taux de déplacement, d'autant plus que les relations retrouvées dans les groupes de données de combinaison A8 aux autres échelles spatiales ne concordent pas avec le résultat de ces deux sites.

5.3.3.2. FORCE ET NOMBRE DE RELATIONS PLUS IMPORTANTES ENTRE 1993 ET 2009

Les relations identifiées pour la période 1993-2009 sont globalement plus nombreuses et possèdent généralement un coefficient de détermination plus élevé que celles observées pour la période 2009-2012. D'ailleurs, on observe davantage de variabilité dans les données pour la période 2009-2012 comparativement à la période 1993-2009, et ce aussi bien à l'échelle globale (Figure 5.39) qu'à l'échelle locale (Figure 5.37). Cependant, il est important de noter qu'on observe dans la période 2009-2012 plusieurs relations mieux corrélées avec la pente et la rugosité de l'estran au sein de plusieurs groupes de données à l'échelle sectorielle et locale, ainsi qu'une amplitude des déplacements de la ligne de rivage en moyenne cinq (5) fois plus grande que ce qu'on observe pour la période 1993-2009.

La figure 5.38 résume bien les tendances générales observées à l'échelle globale concernant la force des relations et l'amplitude du taux de déplacement pour chaque intervalle de temps étudié.

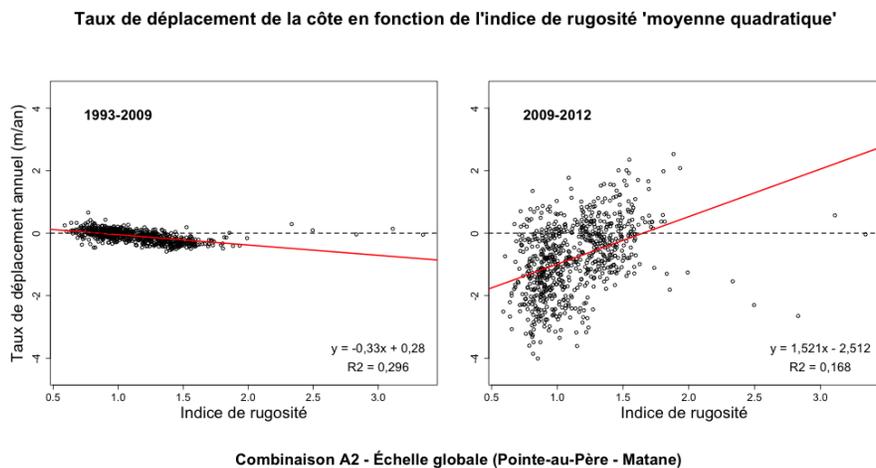


Figure 5. 39 : Comparaison des relations entre les taux de déplacement et l'indice de rugosité « moyenne quadratique » pour la combinaison A2 à l'échelle globale.

5.3.4. TESTS COMPARATIFS AVEC LES TAUX D'ÉROSION ET D'ACCÉTION

Pour la présente étude, la question principale portait sur l'influence des caractéristiques géomorphologiques de l'estran sur l'évolution de la ligne de rivage. Le taux de déplacement, qui inclut tant les valeurs de recul que les valeurs d'avancée, a été choisi pour être mis en relation avec ces caractéristiques. Toutefois, les facteurs influençant les processus d'érosion ne sont pas nécessairement les mêmes que ceux qui influencent les processus d'accrétion. C'est pourquoi il était pertinent de tester les mêmes relations avec les taux de recul et d'accrétion sur quelques groupes d'estrans de même combinaison à plusieurs échelles spatiales pour vérifier s'il y a une différence selon le taux utilisé pour les régressions linéaires. Les tableaux 5.35 à 5.38 présentent les coefficients de détermination (R^2) supérieurs à 0.10 obtenus pour les régressions linéaires entre les variables morphométriques (S_{moy} , R_{rms} , R_{std} , H_{LR} , L_{es} , L_{em}) et les taux de déplacement ($T_{XDépl.}$), de recul (T_{XRecul}) et d'accrétion ($T_{XAccr.ion}$), et ce pour les deux périodes de temps. Si le p-value > 0.05 (indiquant l'absence de relation significative) ou le $R^2 < 0.10$, le résultat est marqué d'un tiret dans les tableaux.

Tableau 5. 35 : Comparaison des coefficients de détermination obtenus les 2176 profils.

	1993-2009			2009-2012		
	$T_{XDépl.}$	T_{XRecul}	$T_{XAccr.ion}$	$T_{XDépl.}$	T_{XRecul}	$T_{XAccr.ion}$
S_{moy}	0,146	-	-	-	-	-
R_{rms}	0,226	0,125	-	-	-	0,116
R_{std}	0,225	0,125	-	-	-	-
H_{LR}	0,135	-	-	-	-	-
L_{es}	0,150	-	-	-	-	-
L_{em}	0,129	-	-	-	-	-

Tableau 5. 36 : Comparaison des coefficients de détermination obtenus pour les estrans de combinaison A2

	1993-2009			2009-2012		
	TxDépl.	TXRecul	TXAccrétion	TxDépl.	TXRecul	TXAccrétion
<i>S_{moy}</i>	0,332	0,190	-	0,194	0,109	-
<i>R_{rms}</i>	0,296	0,224	-	0,168	-	-
<i>R_{std}</i>	0,264	0,166	-	-	-	-
<i>H_{LR}</i>	0,190	0,111	-	0,110	-	0,100
<i>L_{es}</i>	0,212	0,101	-	-	-	-
<i>L_{em}</i>	0,203	-	0,100	-	-	-

Tableau 5. 37 : Comparaison des coefficients de détermination obtenus pour les estrans de combinaison A2 de la cellule hydrosédimentaire de l'Anse-aux-Coques.

	1993-2009			2009-2012		
	TxDépl.	TXRecul	TXAccrétion	TxDépl.	TXRecul	TXAccrétion
<i>S_{moy}</i>	0,356	-	0,227	-	-	-
<i>R_{rms}</i>	0,702	0,453	-	-	-	-
<i>R_{std}</i>	0,699	0,528	0,332	-	-	-
<i>H_{LR}</i>	0,185	-	-	-	0,169	-
<i>L_{es}</i>	0,536	-	0,289	-	-	-
<i>L_{em}</i>	0,493	0,218	0,384	-	-	-

Tableau 5. 38 : Comparaison des coefficients de détermination obtenus pour le site 6 (A2)

	1993-2009			2009-2012		
	TxDépl.	TXRecul	TXAccrétion	TxDépl.	TXRecul	TXAccrétion
S_{moy}	0,227	-	0,265	-	-	-
R_{rms}	0,192	0,124	-	-	-	-
R_{std}	-	-	-	-	-	-
H_{LR}	-	-	0,681	-	-	-
L_{es}	0,526	0,404	-	-	-	-
L_{em}	0,145	-	-	-	-	-

Il s'est avéré que, pour les paramètres testés, les relations avec les taux d'érosion ou d'accrétion étaient toujours moins bonnes qu'avec les taux de déplacement pour l'échelle globale et sectorielle (Tableau 5.35 à 5.37). Quant à l'échelle locale, les résultats sont moins clairs. On note également, pour les quelques paramètres testés, de moins bonnes relations avec le taux de recul, mais pour ce qui est du taux d'accrétion, il est parfois mieux corrélé aux caractéristiques morphométriques que ne l'est le taux de déplacement (Tableau 5.38). Par conséquent, il semble avoir été judicieux de choisir le taux de déplacement pour faire l'ensemble des analyses dans le cadre de ce projet de recherche exploratoire. Il serait tout de même intéressant de faire le même exercice sur les autres combinaisons d'estran pour vérifier si le résultat serait similaire.

CHAPITRE 6

DISCUSSION

Dans le présent chapitre, plusieurs pistes d'explication seront discutées au sujet des relations existant entre les caractéristiques géomorphologiques des estrans et le taux de déplacement de la côte, essentiellement pour la période 1993-2009. Nous concentrerons davantage nos interprétations sur les côtes à terrasse de plage puisque les analyses avancées ont été plus détaillées pour ce type de côte étant donné qu'il compose la grande majorité (92 %) du site d'étude. Nous y aborderons la manière dont chaque composante de la géomorphologie de l'estran semble affecter l'hydrodynamique des vagues, l'énergie transmise à la côte et la dynamique glacielle qui participe à la morphogenèse des côtes du sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent.

6.1. INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES GÉOMORPHOLOGIQUES SUR L'HYDRODYNAMIQUE DES VAGUES

Il est important de souligner que l'influence de la géomorphologie de l'estran sur l'aléa érosion est en fait le reflet du rôle que joue sa géomorphologie sur les processus hydrodynamiques. Ces derniers constituent les principaux processus d'érosion des côtes à terrasse de plage de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent (Bernatchez et Dubois, 2004). L'énergie des vagues gravitaires, dont la période varie entre 0,25 et 7 secondes (Drapeau, 1992) est directement reliée à la profondeur d'eau (Marshall et Stephenson, 2011 ; Trenhaile et Kanyaya, 2007). Dans cette section, nous aborderons les caractéristiques morphométriques affectant la profondeur d'eau et, du même coup, l'énergie et les caractéristiques des vagues (Ogawa *et al.*, 2015), pour tenter d'expliquer les tendances observées suite aux analyses avancées et comparatives.

6.1.1. RUGOSITE DE L'ESTRAN

Selon l'hypothèse initiale, appuyée par Ogawa *et al.* (2015), la dissipation de l'énergie des vagues devrait être plus importante sur une plate-forme dont la topographie est fortement irrégulière (très rugueuse) en raison du coefficient de friction plus élevé. Cette hypothèse pourrait fonctionner pour l'évolution de la côte entre 2009 et 2012. Toutefois, la tendance des résultats obtenus pour la période 1993-2009 semble indiquer le contraire de cette hypothèse puisqu'on observe plutôt une augmentation du taux d'érosion lors d'une augmentation de la rugosité de l'estran (voir p. ex. figures 5.4, 5.8, 5.18). D'ailleurs, ce paramètre est celui qui explique le mieux les variations du taux de déplacement de la côte dans la majorité des groupes, peu importe l'échelle spatiale analysée. Ce résultat n'est donc pas négligeable. Deux hypothèses pourraient expliquer ce résultat.

La première hypothèse consisterait à changer notre perception initiale de la relation de causalité entre l'érosion et la rugosité. Il est possible que l'érosion accrue de la côte ne soit pas la conséquence de la rugosité de l'estran, mais peut-être l'une des causes de l'augmentation des indices de rugosité.

En effet, la rugosité des estrans rocheux est généralement plus forte là où une plus grande proportion d'estran est couverte par une plate-forme rocheuse. Puisque les plates-formes rocheuses peuvent être associées à des systèmes en érosion (Kennedy, 2016), cela implique que, pour des estrans composite ayant une configuration et une orientation de la côte similaire, une plus grande étendue d'affleurement rocheux sur les estrans du site d'étude, synonyme de plus de rugosité, pourrait s'expliquer par un déficit sédimentaire sur l'estran (moins de dépôts meubles sur le bas estran, cordon littoral du haut estran amoindri) en raison de l'érosion de la côte. La rugosité de l'estran pourrait traduire également l'influence d'autres paramètres, tels que la dynamique glacielle, non évaluée dans le cadre

de cette recherche, et qui favoriserait les processus d'érosion côtière. Davantage de recherches seraient nécessaires pour étayer cette hypothèse.

Le deuxième élément explicatif consisterait à considérer la possibilité que les indices de rugosité ne soient pas bien représentatifs de la variation topographique réelle le long du profil d'estran. En effet, les résultats montrent une corrélation significative entre la pente moyenne et les indices de rugosité, ce qui constitue un biais à considérer dans l'interprétation des relations identifiées. En appui à cette hypothèse, les résultats d'ANOVA présentent une forte corrélation entre ces deux paramètres dans la grande majorité des groupes testés (tel que présenté à la sous-section 5.3.1.4). De plus, nous remarquons des indices de rugosité plus forts sur plusieurs estrans possédant quelques écueils rocheux plus élevés que la moyenne que sur un estran ayant une topographie irrégulière sur toute sa largeur. Aussi, parmi tous les types d'estran identifiés sur les côtes à terrasse de plage, celui ayant l'indice de rugosité moyen le plus fort est le type 4, soit une plage simple sans aucun affleurement rocheux. Il est également caractérisé par une pente moyenne plus élevée que les autres types. Par conséquent, il est probable que la relation entre le taux de déplacement et la rugosité de l'estran soit, en fait, en grande partie le reflet de la relation existant entre le taux de déplacement et la pente de l'estran. Une forte pente, et pas seulement une forte rugosité aurait pour conséquence une érosion plus importante. Nous développerons cet élément dans la section 6.1.2.

Afin de contrer ces biais, il serait nécessaire de développer un nouvel indice de rugosité qui serait indépendant de la pente et qui tiendrait compte de caractéristiques complémentaires à la variation topographique, notamment la structure spatiale de la microtopographie. Quelques essais intéressants ont été effectués avec un nouvel indice (« R »), mettant en relation : la variation topographique (R_{rms} et R_{std}), la proportion de l'estran couverte par les affleurements rocheux (A_{pfr}), ainsi que la différence d'orientation entre la ligne de rivage et les strates du substrat rocheux en valeur absolue ($Orient_{diff}$). Selon

les résultats d'analyse (chapitre 5), la rugosité augmente avec une variation topographique plus irrégulière, une proportion accrue d'affleurements rocheux et une différence d'orientation se rapprochant de 0° (strates parallèles à la côte). Au total, six formulations différentes de cet indice « R » respectant ces relations ont été testées avec les données du site spécifique #1, dont la plate-forme correspond à un type « A » très irrégulière. Les résultats de cette démarche exploratoire sont présentés dans le tableau 6.1.

Tableau 6. 1 : Formulations pour le calcul de l'indice "R" testé avec les taux de déplacement annuels sur le site 1.

Formulation de l'indice « R »	Taux de déplacement	p-value	R ² ajusté	a	b	Sens
$R_1 = \frac{(R_{rms} + R_{std}) \cdot A_{pfr}}{Orient_{diff}}$	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	0,140	s/o	s/o	s/o	s/o
	EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	6,06E-04	0,324	5,320	-2,020	+
$R_2 = \frac{(R_{rms} + R_{std})^{A_{pfr}}}{Orient_{diff}}$	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	0,124	s/o	s/o	s/o	s/o
	EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	5,20E-04	0,331	3,980	-1,920	+
$R_3 = \frac{(R_{rms} \cdot R_{std}) \cdot A_{pfr}}{Orient_{diff}}$	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	0,025	0,136	-0,587	-0,216	-
	EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	1,24E-04	0,394	10,150	-2,130	+
$R_4 = \frac{(R_{rms} \cdot R_{std})^{A_{pfr}}}{Orient_{diff}}$	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	0,041	0,110	-0,870	-0,217	-
	EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	2,12E-04	0,371	16,000	-2,157	+
$R_5 = \frac{R_{rms} \cdot A_{pfr}}{Orient_{diff}}$	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	0,125	s/o	s/o	s/o	s/o
	EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	5,13E-04	0,332	10,260	-2,020	+
$R_6 = \frac{R_{std} \cdot A_{pfr}}{Orient_{diff}}$	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	0,164	s/o	s/o	s/o	s/o
	EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	7,32E-04	0,316	11,040	-2,020	+

Nous avons obtenu des résultats positifs et prometteurs, avec un coefficient de détermination comparable à celui obtenu avec nos précédents indices de rugosité (soit un R^2 entre 0,308 et 0,434), pour les tests effectués sur le taux de déplacement de la période 2009-2012, mais seulement deux (R_3 et R_4), avec un faible coefficient de détermination, pour celui de la période 1993-2009. Par contre, la pente de ces relations semble très élevée. Le sens des relations est toujours équivalent à celui mesuré avec nos précédents indices. Il serait pertinent de mener des tests supplémentaires en y ajoutant le pendage des strates et en y remplaçant la différence d'orientation entre la côte et les strates par la différence d'orientation entre les strates et l'angle d'incidence des vagues. Des tests supplémentaires devraient également être effectués sur d'autres sites spécifiques ainsi qu'à d'autres échelles spatiales pour valider ces résultats préliminaires.

Enfin, un autre paramètre qui pourrait être intéressant à inclure dans une future recherche portant sur la rugosité de l'estran serait la présence des mégablocs glaciels situés sur le bas-estran (Dionne, 2001 ; 2004 ; 2009). Les indices de rugosité utilisés dans le cadre de la présente recherche pour le calcul de la rugosité globale de l'estran ne sont pas susceptibles d'être affectés par la présence de ceux-ci puisque les chances sont très faibles que les profils tracés pour ces calculs passent exactement au-dessus d'un mégabloc, et pratiquement nuls de passer au-dessus de plusieurs mégablocs. De plus, si un profil venait à en croiser un, la variation topographique qu'il entraîne aurait un impact négligeable sur le calcul de l'ensemble du profil, particulièrement sur les battures argileuses et les marais qui sont très étendus. Par conséquent, afin de tenir compte de la présence et de la densité de mégablocs dans le calcul de la rugosité globale de l'estran, il serait préférable d'utiliser un indice calculant la rugosité surfacique (sur une surface donnée de l'estran) au lieu de linéaire (le long d'un profil).

6.1.2. PENTE DE L'ESTRAN

Parmi les trois pentes évaluées (haut-estran, bas-estran et moyenne) dans les régressions linéaires de la présente étude avec le taux de déplacement entre 1993 et 2009, la pente moyenne et la pente du bas-estran présentent les meilleures relations. On note également que la relation entre la pente et le taux de déplacement, pour la période 1993-2009, est plus importante pour les côtes à terrasse de plage que les autres types de côte, et encore plus forte en isolant la combinaison A2 (plate-forme avec cordon littoral).

L'explication principale à la relation identifiée entre la pente et le taux de déplacement pourrait correspondre à l'influence de la pente sur le *runup* des vagues sur le haut-estran (Battjes, 1974, cité dans Didier, 2014 ; Didier, 2014 ; Didier *et al.*, 2016). Le *runup* correspond à « l'amplitude entre la limite supérieure du jet de rive et le niveau de la mer sans agitation » (Didier, 2014). Lorsqu'il surpasse la limite supérieure du haut-estran, cela entraîne un impact direct et majeur sur l'érosion des côtes à terrasse de plage, principalement affectées par les processus hydrodynamiques d'érosion (Ruggiero *et al.*, 2001 ; Didier, 2014). En effet, l'étude de Sallenger (2000) montre que, lorsque le *runup* surpasse la base des dunes à la limite de l'avant-plage et de l'estran (ou dans notre cas présent, qu'il surpasse la base de la microfalaise d'une côte à terrasse de plage), on entre dans un régime de collision causant l'érosion de la côte. Selon Battjes (1974, cité dans Didier, 2014), la pente constitue l'un des deux principaux facteurs influençant le *runup* des vagues. Les travaux récents menés par D. Didier (2014 et Didier *et al.*, 2016) ont pu montrer que la pente utilisée dans le calcul du *runup* qui est la mieux corrélée avec les données de submersion de l'étude correspond à la pente moyenne, ce qui corrobore les résultats obtenus dans la présente étude où la pente moyenne est également la mieux corrélée avec les taux de déplacement de la côte, à l'exception de six groupes de données situés dans le secteur Baie-des-Sables – Matane, où c'est la pente du bas-estran qui est la mieux corrélée. En résumé, la pente moyenne de l'estran influencerait le *runup*,

responsable en partie de l'évolution des côtes à terrasse de plage, ce qui pourrait expliquer la relation entre la pente moyenne et le taux de déplacement de la côte, identifiée dans pratiquement tous les groupes de données pour la période 1993-2009.

Cependant, il est possible que la pente moyenne ne soit pas toujours la pente qui soit la mieux reliée aux taux de déplacement dépendamment du secteur à l'étude. Dans l'étude de Corriveau *et al.* (2016), portant sur la dynamique morphosédimentaire des côtes basses sablonneuses sur les rives de la Côte-Nord du Saint-Laurent, ils ont observé qu'une pente du haut estran plus abrupte était associée à un recul plus important de la ligne de rivage.

Selon Ogawa (2013) et Stephenson et Marshall (2011), l'augmentation de la pente d'une plate-forme rocheuse favorise généralement, mais pas toujours, la dissipation de l'énergie des vagues avant que celles-ci n'atteignent la base de la falaise rocheuse. À l'opposé, selon Bird (2008), les estrans meubles offrent une meilleure dissipation de l'énergie des vagues lorsque la pente y est très faible, alors qu'une pente plus forte correspond à une côte réfléchive (voir figure 1.10 et 1.11). Dans la présente étude sur les estrans composites, un estran plus réfléchif (< 100 m avec une pente plus forte, parfois > 3 °, p. ex. Figures 4.14 à 4.16) serait associé à davantage d'érosion qu'un estran dissipatif (> 300 m avec une pente moyenne très faible) pour la période 1993-2009, mais associé à une stabilité, voire une accréation, pour la période 2009-2012. Toutefois, ce n'est pas toujours le cas pour les sites spécifiques, tel qu'expliqué dans la section 5.3.2. Par conséquent, on pourrait proposer comme hypothèse qu'en général, sur une plus longue période de temps, pour notre site d'étude, un estran un peu plus réfléchif favoriserait l'érosion des sédiments meubles déposés sur un estran composite par des courants de retour, pouvant ainsi contribuer au déficit sédimentaire et, de ce fait, à l'érosion de la côte. La réfraction plus importante des vagues sur les estrans composites à faible pente, correspondant aux estrans plus dissipatifs, pourrait aussi expliquer l'érosion moindre de la ligne de rivage en arrière par rapport aux côtes possédant un estran plus étroit et pentu.

D'autres paramètres connexes pourraient expliquer la diminution de l'érosion avec la diminution de la pente, notamment la largeur de l'estran qui est utilisée pour le calcul de la pente.

6.1.3. LARGEUR DE L'ESTRAN

Pratiquement tous les groupes présentent la même relation entre la largeur d'estran et la variation du taux de déplacement entre 1993 et 2009 : une augmentation de la largeur totale et de la largeur émergée de l'estran favorise la stabilité, voire même une légère avancée de la ligne de rivage.

Cependant, la force de la relation varie d'un groupe à l'autre, certains même ne présentent aucune relation avec la largeur, notamment la plupart des regroupements à combinaison A1 (plate-forme simple). Les meilleures relations se retrouvent dans le groupe de combinaison A4 (plage simple), suivi par celui de combinaison A7 (batterie argileuse avec cordon littoral), puis celui de combinaison A5 (plage avec quelques affleurements rocheux). Toutes ces combinaisons représentent des estrans à dominance sableuse ou vaseuse. Ces résultats concordent avec la théorie selon laquelle une plage de plus grande étendue favorise la dissipation d'énergie des vagues, diminuant ainsi l'aléa érosion côtière et favorisant l'accumulation de sédiments (Masselink et Short, 1993).

La force des relations identifiées pour les combinaisons caractérisées par des estrans à dominante rocheuse ou mixte est, quant à elle, très variable. Même si des recherches récentes ont observé une relation positive entre la dissipation de l'énergie des vagues et largeur de la plate-forme (Didier *et al.*, 2016 ; Kennedy, 2015 ; Limber et Murray, 2014), d'autres soutiennent le contraire (Ogawa *et al.*, 2011 ; 2012). Ogawa *et al.* (2011) démontrent que la modification de la hauteur des vagues sur la plate-forme de type « B »

dépend surtout de la géométrie de la plate-forme et de la profondeur d'eau, mais demeure indépendants de la largeur de la plate-forme. Dans la présente recherche, cette constatation expliquerait l'absence de relation entre la largeur d'estran et le taux de déplacement pour les estrans rocheux de combinaison A1 (plate-forme simple), à l'exception d'un sous-groupe au sein de la cellule de Tartigou. Quant aux estrans rocheux de combinaison A2 (plate-forme avec cordon littoral), de combinaison A3 (plate-forme avec cordon littoral et remplissage sédimentaire entre 25% et 50%) et les estrans mixtes de combinaison A8 (composé d'une plate-forme et de remplissage sédimentaire supérieur à 50%), il existe des relations significatives avec la largeur d'estran. Il est possible que la variabilité de la force de ces relations identifiées s'explique par la complexité et la variabilité spatiale de la composition de l'estran, où le ratio « plate-forme / sédiments meubles » et le type de plate-forme peuvent changer à l'intérieur d'un segment de 100 m de côte linéaire. De plus, la variation de la force des relations avec le taux de déplacement pourrait être attribuable au changement dans la composition de l'estran. Suite à l'interprétation des résultats obtenus, on peut en déduire qu'une relation avec la largeur d'estran est plus forte lorsque la proportion couverte en sédiments meubles est plus importante et, inversement, une relation est plus faible ou négligeable lorsque la proportion couverte par une plate-forme rocheuse augmente. Une fois que l'estran atteint une composition à 100 % rocheuse, soit un estran de combinaison A1, la relation entre le taux de déplacement de la côte et la largeur d'estran est alors non significative. Cependant, il faut tenir compte du fait que, contrairement aux autres types d'estran, les estrans de type 1 sont caractérisés par un haut-estran majoritairement rocheux, ce qui pourrait avoir une influence sur cette relation.

Une autre possibilité est que la variabilité de la force des relations entre la largeur de l'estran et le taux de déplacement de la côte pour les estrans à dominante rocheuse et mixte soit due au choix de la largeur utilisée. En effet, la limite de la plate-forme rocheuse ne correspond pas nécessairement au zéro hydrographique et celle-ci peut, par conséquent, être plus large ou plus étroite que l'estran, dépendamment de sa géométrie et de son élévation

par rapport au niveau moyen des mers (NMM) (Kennedy, 2015). D'après Kennedy (2015, p.106), la limite externe de la plate-forme est définie comme étant « le point où les vagues cessent d'avoir une action érosive sur le substrat rocheux » (traduction libre). Dans ce cas, les résultats auraient alors été plus représentatifs de la réalité sur le terrain si la largeur de la plate-forme avait pu être définie et utilisée au lieu de la largeur d'estran.

De plus, il est possible que les concepts développés à partir des recherches menées sur les côtes ouvertes sur l'océan ne s'appliquent pas aux côtes en milieu estuarien et que, dépendamment du type de plate-forme rencontré, la largeur de cette dernière influence bel et bien la quantité d'énergie transmise à la côte. Il serait intéressant d'approfondir cette question et mener de nouvelles recherches en milieu estuarien afin de vérifier si, oui ou non, la largeur d'estran et/ou la largeur de la plate-forme influencent la quantité d'énergie des vagues transmise à la côte sur les estrans à dominante rocheuse.

REMARQUE METHODOLOGIQUE SUR LA DELIMITATION DE LA LARGEUR DE L'ESTRAN

Rappelons que deux largeurs d'estran ont été utilisées pour comparer les résultats de deux méthodes d'estimation de la limite marine du bas-estran par photo-interprétation servant au calcul de la largeur d'estran :

- 1) Largeur totale (estimée) : limite marine correspondant au zéro hydrographique évaluée à partir des imageries aériennes en utilisant la densité et la répartition des algues comme proxy ;
- 2) Largeur émergée (mesurée) : limite submergée/émergée mesurée avec les données LiDAR.

En comparant les résultats obtenus pour ces deux méthodes dans chacun des groupes de données avec le taux de déplacement entre 1993 et 2009, nous avons observé qu'il y a presque autant de groupes dont la largeur la mieux corrélée est la largeur totale (20

groupes) que de groupes où il s'agit de la largeur émergée (18 groupes). Aussi, les relations liées à la largeur totale possèdent généralement un coefficient de détermination équivalent ou supérieur aux relations liées la largeur émergée. Il faut noter que l'on retrouve des relations avec les deux méthodes pour une partie de ces groupes, alors que pour l'autre partie, il peut s'agir soit uniquement de la largeur émergée, soit uniquement de la largeur totale. Aucune caractéristique ne semble pouvoir expliquer cette variabilité des résultats. De nouvelles recherches sur le sujet permettraient d'éclaircir cette question.

Par conséquent, nous pouvons déduire que l'utilisation des algues comme proxy donne des résultats concluants pour estimer de la largeur totale réelle de l'estran puisque les résultats sont similaires à ceux de la largeur émergée, mesurée avec les données LiDAR. Cette méthode demeure néanmoins expérimentale et nécessiterait plus de points de référence mesurés sur le terrain afin de se rapprocher du zéro hydrographique réel. Il serait d'ailleurs pertinent de tester cette méthode sur d'autres secteurs du Québec maritime afin de la valider.

Les deux limites majeures pour l'utilisation de cette méthode sont : 1) la visibilité nulle de la topographie de l'estran sous les algues, ce qui augmente le biais de l'estimation de la limite du bas-estran lorsque la communauté est de forte densité et de grande étendue et 2) le manque de donnée concernant la vitesse de migration ou de modification de la répartition de la communauté d'algues sur la rive sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Considérant cette dernière limite, il faut rester prudent dans l'interprétation des résultats liés à la largeur totale puisque l'étendue des algues évolue au fil des années. De ce fait, l'utilisation de la répartition des algues comme proxy serait inappropriée dans le cadre d'une recherche couvrant une longue période de temps, à moins de développer un modèle d'évolution à long terme de la communauté d'algues pour le secteur à l'étude.

6.1.4. PRESENCE ET TYPE DE PLATE-FORME ROCHEUSE

La géométrie de la plate-forme rocheuse est un facteur clé déterminant la quantité d'énergie des vagues qui aura un impact sur la zone intertidale et sur la ligne de rivage (Trenhaile, 1987 ; Marshall et Stephenson, 2011 ; Ogawa *et al.*, 2011). Aussi, tel que soulevé dans le chapitre 1, la présence d'un important affleurement rocheux sur un estran composite influence la dynamique hydrosédimentaire locale (Morton 2002 ; Stéphan, 2011).

Les estrans rocheux et mixtes retrouvés sur le site d'étude comprennent 1) des plates-formes similaires au type « A », 2) des plates-formes s'apparentant au type « B » à gradient de pente, 3) des plates-formes similaires au type « B » subhorizontales et 4) des plates-formes s'apparentant au type « A », mais plus étroite avec une pente relativement forte et avec une topographie très irrégulière. Ne faisant pas partie de la classification de Sunamura (1992) et rarement étudié dans la littérature générale, ce dernier type sera identifié sous le vocable « plate-forme type 'A' très irrégulière » dans la présente discussion (Figure 6.1).

En utilisant le profil moyen des sites spécifiques comme témoins des principaux types d'estran (types 2, 3 et 8), on constate que ceux ayant une plate-forme de type « A » (sites #4 et #5) sont les seuls où le déplacement total moyen de la côte entre 1993 et 2009 correspond à une accrétion (accrétion supérieure à 1,40 m dans les deux cas). Les sites où l'on retrouve une plate-forme de type « B » à gradient de pente (sites #3 et #10) présentent une ligne de rivage relativement stable, alors qu'on observe un recul de -1,69 m à -2,48 m aux sites caractérisés par un type « B » subhorizontal (sites #2 et #7). Les sites ayant une plate-forme de type « A » très irrégulière (sites #1 et #9) présentent, quant à eux, les plus forts taux de déplacement négatifs, soit un déplacement total moyen de -3,40 m et -4,38 m. La figure 6.1 illustre la typologie des plates-formes rocheuses que nous proposons pour l'estuaire maritime du Saint-Laurent et dans laquelle les notions liées à la modification de

l'hydrodynamique des vagues, à la géométrie d'une plate-forme ainsi qu'à la morphologie d'une plage sont combinées.

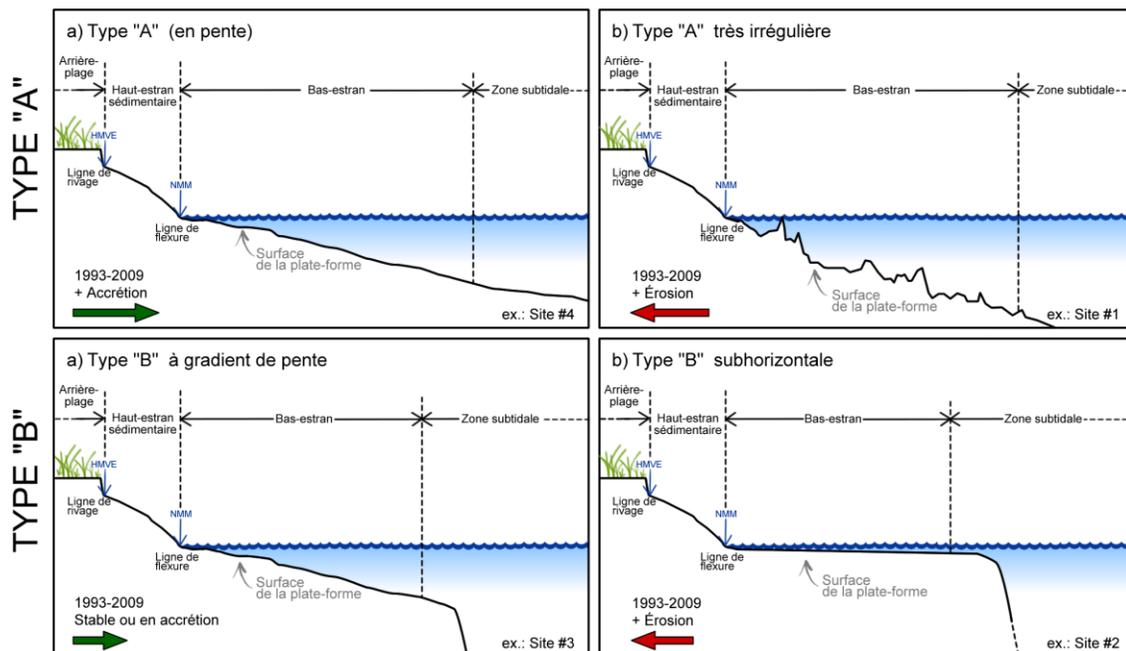


Figure 6. 1 : Types de plate-forme rocheuse rencontrés entre Pointe-au-Père et Matane. Basé sur Sunamura (1992) et Ogawa (2013).

*Note : Il s'agit d'une représentation schématique de la morphologie de la plate-forme où la pente et la rugosité ont été accentuées pour mieux différencier les types. Les exemples réels de profils sont présentés au chapitre 2. La valeur exacte de la limite du bas-estran, de la pente et de la rugosité moyenne sont variables le long du site d'étude. Les hauts-estrans sont sédimentaires.

Sur une plate-forme de type « B », une importante quantité d'énergie des vagues gravitaires est dissipée entre la partie distale (fin de la plate-forme du côté mer) et la partie centrale de la plate-forme en raison du changement brusque de la profondeur d'eau qui entraîne le déferlement des vagues (Ogawa, 2013). La quantité d'énergie transmise par les vagues entre la limite externe de la plate-forme et la ligne de rivage dépend principalement

de la présence d'une brusque rupture de pente à l'extrémité de la plate-forme et de la profondeur d'eau sur la plate-forme (Ogawa *et al.*, 2011). Dans l'étude d'Ogawa *et al.* (2012), portant sur les plates-formes de type B sur la Péninsule de Mahia, un milieu microtidal (marnage de 1,7 m) sur la côte Est de l'île du Nord de la Nouvelle-Zélande, la majeure partie de l'atténuation des vagues gravitaires a été mesurée dans la partie centrale de la plate-forme ayant pour résultat que seulement 5 % (maximum 15 % à marée haute) de leur énergie a atteint le pied de la falaise. Toutefois, l'énergie des vagues infragravitaires y est considérablement amplifiée. En effet, dans cette même étude, l'énergie de ces vagues infragravitaires mesurée à la base de la falaise montrait une augmentation de 165 % à 280 % par rapport à celle mesurée à la limite externe de la plate-forme (Ogawa *et al.*, 2012, p. 186). La partie interne (près de la côte) de la plate-forme est donc dominée par les vagues infragravitaires, tandis que la partie externe (vers la mer) est dominée par les vagues gravitaires selon Ogawa *et al.* (2011). Par ailleurs, il a été démontré que les vagues infragravitaires jouaient un rôle important dans l'érosion des côtes sableuses (De Bakker *et al.*, 2014 ; Ruessink, 1998 ; Russel, 1993). Or, la grande majorité des plates-formes rocheuses sur notre terrain d'étude sont recouvertes sur le haut-estran par un cordon sableux, prolongé par une terrasse de plage, sensible à ce type d'onde. On peut donc proposer que sur notre site d'étude, la présence d'une plate-forme rocheuse s'apparentant au type « B » sur l'estran pourrait donc favoriser l'érosion de la côte. L'amplification des vagues infragravitaires dans la zone de déferlement en présence d'une plate-forme rocheuse de type « B » pourrait expliquer l'érosion plus importante de la côte sableuse dans ces secteurs entre Rimouski et Matane.

Les vagues gravitaires possèdent un grand potentiel d'érosion lorsqu'elles arrivent à la côte sans s'être dissipées. La hauteur de ces vagues étant directement liée à la profondeur d'eau sur la plate-forme, une diminution de la profondeur d'eau entraîne une réduction de leur énergie (Kennedy, 2016). Par conséquent, la topographie et le gradient de pente de la plate-forme jouent un rôle crucial dans la dissipation de leur énergie (Kennedy, 2016). Les

travaux de Marshall et Stephenson (2011) et Ogawa (2013) indiquent que la quantité d'énergie enregistrée à la côte est beaucoup plus faible sur les côtes ayant une plate-forme de type « B » à gradient de pente que pour les côtes ayant une plate-forme de type « B » subhorizontale. Nos résultats pour la période 1993-2009 semblent concorder avec cette hypothèse.

Quant aux deux autres types de plates-formes rencontrés sur le site d'étude, tous deux de type « A », la différence des taux de déplacement de la ligne de rivage pourrait s'expliquer par la différence en termes de largeur d'estran. Contrairement aux larges plates-formes du type « A » à faible gradient de pente, les plates-formes plus étroites du type « A » très irrégulière (< 100 m) pourrait limiter quelque peu la dissipation des vagues et donc, accroître l'érosion, et ce malgré la forte irrégularité topographique de la plate-forme qui devrait occasionner davantage de réfraction. Il est également possible que le caractère plus réfléchissant de ces plates-formes de type « A » très irrégulière, en raison d'une pente plus forte (> 3 °), favorise l'érosion de sédiments meubles sur l'estran, contribuant ainsi indirectement à l'érosion de la côte tel que proposé dans la section 6.1.2.

6.1.5. DIFFERENCE D'ORIENTATION ENTRE LA COTE ET LES STRATES DE LA PLATE-FORME

Selon les résultats de la présente recherche, l'orientation des strates de la plate-forme rocheuse semble jouer un rôle sur le taux de déplacement de la côte pour les combinaisons à estran rocheux ou mixte. Les analyses ANOVA révèlent que les côtes dont l'estran rocheux possède des strates orientées N – NNE ont un taux de déplacement moyen significativement différent de celles avec des strates orientées NW pour les combinaisons A1, A2 et A3 (Annexe IX). Ce résultat pourrait avoir un lien avec l'angle d'incidence des vagues de tempêtes. Les vents et les rafales de vents, générant des vagues de tempêtes,

proviennent de l'est dans 50 % du temps, et nord-est ou nord dans 25 % du temps (Bernatchez *et al.*, 2012). Afin de calculer le sens et la force de ces relations, la différence d'orientation entre ces deux composantes a été calculée pour obtenir une valeur unique à utiliser dans les régressions linéaires.

Les différences d'orientation entre les strates et la côte ont été testées avec les valeurs réelles, allant de -90° degrés à $+90^{\circ}$, et avec les valeurs absolues, variant entre 0° et 90° . Des résultats intéressants ont été obtenus en testant les relations utilisant les valeurs réelles, contrairement à celles utilisant les valeurs absolues qui n'ont donné aucune relation significative. L'utilisation des valeurs réelles permet de tenir compte du potentiel d'influence de l'angle d'incidence des vagues, ce qui pourrait expliquer ce résultat (Figure 6.2).

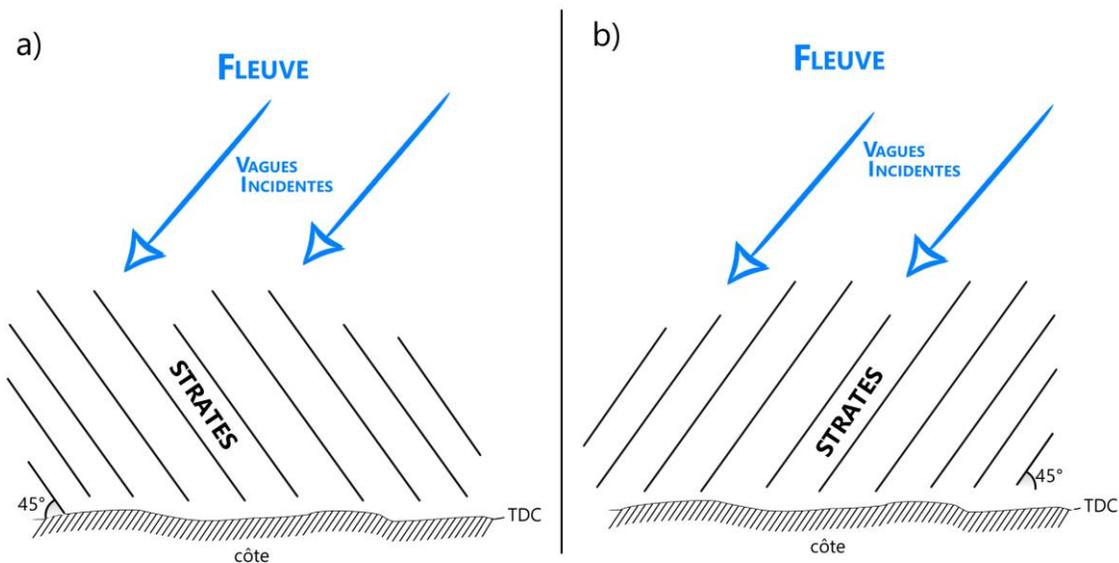


Figure 6. 2 : Différence d'orientation entre les strates de la plate-forme rocheuse et la côte en valeur réelle : potentiel d'influence de l'orientation des strates sur la propagation d'énergie des vagues incidentes à la côte. Autres caractéristiques géomorphologiques à évaluer dans de futures recherches. a) La direction des vagues est perpendiculaire aux strates, ce qui peut favoriser leur réfraction. b) La direction des vagues est parallèle aux strates, ce qui peut réduire la dissipation d'énergie.

6.1.6. AUTRES CARACTERISTIQUES GEOMORPHOLOGIQUES A EVALUER DANS DE FUTURES RECHERCHES

Dans le cadre de futures recherches, quatre composantes géomorphologiques en lien avec la plate-forme rocheuse auraient avantage à être explorées, afin d'évaluer leur relation avec la variation du taux de déplacement : le pendage des strates de la plate-forme, son élévation par rapport au NMM, la topographie subtidale de la plate-forme, ainsi que le pied de glace.

6.1.6.1. PENDAGE DES STRATES DE LA PLATE-FORME

Il serait pertinent de mesurer le pendage des strates sur le terrain afin de compléter les analyses effectuées avec l'orientation de celles-ci. Cela nous permettrait de mieux expliquer certaines relations qui ne suivent pas le patron général observé dans la majorité des groupes de données, en plus d'apporter potentiellement un élément d'explication quant au degré d'influence de la microtopographie (rugosité globale) de la plate-forme sur le taux de déplacement.

6.1.6.2. ÉLEVATION DE LA PLATE-FORME

Tel qu'expliqué précédemment à la section 6.2.1.1, la profondeur d'eau joue un rôle clé dans la dissipation des vagues gravitaires. Une plate-forme plus élevée par rapport au NMM favorise la dissipation de l'énergie et du même coup, protège davantage la côte des processus hydrodynamiques d'érosion (Marshall et Stephenson, 2011). Par conséquent, l'élévation de la plate-forme serait une composante géomorphologique pertinente à mesurer

sur différents points de la plate-forme et à intégrer dans les futures analyses, d'autant plus que la portée de son influence sur la morphologie de l'estran varie également en fonction du niveau de la marée ainsi que du marnage (Trenhaile, 1999 ; Beetham et Kench, 2011 ; Ogawa *et al.*, 2015).

6.1.6.3. TOPOGRAPHIE DE LA PLATE-FORME EN AVANT-COTE

L'énergie des vagues atteignant la zone intertidale est dépendante des variations de la profondeur d'eau en avant-côte et donc de la topographie de la partie subtidale de la plate-forme rocheuse (Kennedy, 2016 ; Marshall et Stephenson, 2011 ; Ogawa *et al.*, 2011 ; 2012). La dissipation de l'énergie en avant-côte se produit par la réfraction de l'énergie et du freinage par le fond (Stephenson et Kirk, 2000a). Kennedy (2016) a pu identifier trois types de morphologie de plate-forme dans la zone subtidale : 1) une brusque rupture de pente s'apparentant à une falaise, 2) une terrasse ou un récif caractérisé par une forte variation topographique et 3) une rampe, caractérisée par une large plate-forme avec une pente douce. Cela étant dit, très peu d'études à ce jour ont étudié cette composante (Kennedy, 2016). Quant aux estrans composés de sédiments meubles (surtout sableux), on peut également retrouver les barres de sable en zone pré littorale. Les résultats de l'étude de Corriveau *et al.* (2016) ont montré que ces barres sableuses influencent la dynamique côtière sur le terrain d'étude, situé sur la Côte-Nord du fleuve Saint-Laurent, en agissant comme barre de déferlement.

Au meilleur de notre connaissance, il n'existe aucune classification, ni relevé topographique précis des plates-formes en avant-côte de la rive sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Considérant l'importance de cette composante, il serait pertinent d'explorer cette piste de recherche.

6.1.6.4. PIED DE GLACE

En plus de jouer un rôle sur les processus hydrodynamiques, la géomorphologie des estrans pourraient jouer un rôle important sur les processus glaciels de par son influence sur la stabilité et l'étendue du pied de glace qui, à son tour, affecte l'hydrodynamique des vagues. Tel que présenté dans le chapitre 2, l'action des glaces littorales joue un rôle important dans l'hydrodynamique sédimentaire sur les côtes du Saint-Laurent (Bernatchez et Dubois, 2004 ; Drapeau, 1992). Le pied de glace contribue à la fois à l'érosion, au transport de sédiments et à la sédimentation sur l'estran (Dionne, 1970 ; 1973 ; Drapeau, 1992 ; Forbes et Taylor, 1994 ; Corriveau *et al.*, 2016), en plus de constituer « une défense naturelle contre l'action des vagues, des courants, de la marée et des processus physico-chimiques et biologiques », protégeant ainsi la côte de nombreux processus d'érosion en période hivernale (Dionne, 1973, p. 247).

Le pied de glace est divisé en deux parties : le pied de glace de haut-estran et celui de bas-estran (Dionne, 1973). Le rôle de protection de la côte est assuré principalement par le pied de glace de haut-estran, bien fixé au substrat, par rapport au pied de glace du bas-estran, qui est beaucoup plus mobile et qui suit le battement des marées. Tel qu'expliqué au chapitre 1, section 1.2.2.2, la marge externe du pied de glace peut aussi agir comme une surface réfléchive et favoriser l'érosion de la plage au pied de celui-ci (Bernatchez et Dubois, 2004 ; Corriveau *et al.*, 2016).

Toutefois, la portée de son influence varie au cours de la saison hivernale puisque les déglacements partiels du pied de glace de bas-estran sont fréquents dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent, ce qui réduit son rôle protecteur de la côte (Dionne, 1973). Les facteurs favorisant son développement et sa stabilité, telle que la géomorphologie de l'estran, pourraient alors contribuer à la protection de la côte face aux tempêtes hivernales dans ce secteur.

L'étendue et la stabilité de cette forme glacielle dépendent des conditions climatiques et météo-marines hivernales, mais aussi des paramètres géographiques (exposition de la côte aux vents dominants) et géomorphologiques (largeur et type d'estran, type de côte) (Dionne, 1973 ; Senneville *et al.*, 2014). Le pied de glace est généralement étroit sur les plates-formes rocheuses escarpées (étroites à pente forte et à forte rugosité), alors qu'il est plus étendu et plus stable dans les baies et les marais maritimes, caractérisés par un estran large à pente très faible (Dionne, 1973 ; Hansom *et al.*, 2014, Senneville *et al.*, 2014). Toutefois, on peut retrouver des crêtes de plage en haut-estran formées lors de la fonte du pied de glace au printemps, qui entraîne le dépôt des sédiments accumulés à la surface de celui-ci au cours de l'hiver par le déferlement des vagues chargées en sédiments.

Les relations identifiées dans le cadre de la présente recherche pourraient en partie s'expliquer par ces différences : plus un estran est rugueux et abrupt (étroit à pente forte), moins il favorisera le développement d'un grand pied de glace (Dionne, 1973), limitant ainsi le rôle de ce dernier comme protection de la côte lors de tempêtes hivernales. Inversement, un estran large à pente faible favorisera davantage le développement d'un large pied de glace, augmentant ainsi la protection de la côte contre les processus d'érosion (Dionne, 1973). Il serait pertinent de mener des études supplémentaires qui coupleraient l'évolution saisonnière du pied de glace avec les types d'estrans retrouvés sur la rive sud de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent. Un projet intéressant consisterait à tester la relation entre le taux de déplacement de la côte en fonction de l'étendue et du nombre de jours couvert par le pied de glace pour chaque type d'estran. Cet aspect n'ayant pas encore été analysé sur les côtes de ce secteur du fleuve Saint-Laurent, comme cela a pu en partie l'être sur la Côte-Nord (Corriveau *et al.*, 2016), la question principale serait de déterminer l'importance du rôle que joue le pied de glace, à différents stades de son développement, sur l'aléa érosion durant la période hivernale sur chacun des différents types de côte et d'estran qu'on y retrouve.

6.2. INFLUENCE DE LA TEMPÊTE DE 2010 SUR LE SENS ET LA FORCE DES RELATIONS

Globalement, les caractéristiques morphométriques expliquent davantage la variation du taux de déplacement pour 1993-2009 que celle de 2009-2012. Cela pourrait s'expliquer entre autres par la modification importante de la ligne de rivage suite à l'événement de tempête extrême qui s'est produit en décembre 2010. Cet événement a occasionné un épisode important de submersion marine et une modification rapide de la côte engendrés par la conjonction de facteurs météo-marins favorisant de hauts niveaux d'eau à la côte et de fortes vagues jumelés à de forts vents soufflant préférentiellement du nord-est avec des vitesses moyennes horaires maximales de 40 km/h à 50 km/h (Didier, 2014). Ces conditions météo-marines exceptionnelles pourraient avoir atténuées significativement l'influence de la géomorphologie de l'estran sur l'hydrodynamique des vagues et, de ce fait, son influence sur l'aléa érosion. Par ailleurs, elles expliqueraient la différence considérable de l'amplitude des taux de déplacement de la ligne de rivage observée entre les deux périodes étudiées.

En raison de l'ampleur des changements entraînés par cette tempête extrême et du court laps de temps post-tempête (moins de 2 ans), il se peut que les relations identifiées avec le taux de déplacement mesuré entre 2009 et 2012 représentent principalement le résultat de la tempête de 2010. Contrairement à la période 2009-2012, la période 1993-2009 couvre un plus grand intervalle de temps. Malgré les quelques événements de tempêtes qui se sont produits entre 1993 et 2009, l'amplitude des taux de déplacement de la ligne de rivage est relativement faible.

Ainsi, on peut en déduire que la période 1993-2009 représente la tendance générale de l'évolution de la côte sous diverses conditions climatiques et météo-marines. Dans le même ordre d'idées, les résultats obtenus dans le secteur à l'étude pour la période 2009-

2012 correspondraient alors aux relations existant entre la géomorphologie et la modification de la ligne de rivage en période de forte tempête, avec des niveaux d'eau plus élevés. Pour valider cette hypothèse, il serait pertinent d'évaluer la relation entre le taux de déplacement lors de l'hiver 2010-2011 suite à l'événement de tempête, et les caractéristiques géomorphologiques de l'estran, puis en comparer les résultats avec ceux obtenus dans la présente recherche.

6.3.SYNTHESE

L'indice de rugosité de l'estran constitue l'élément central expliquant le mieux la variation du taux de déplacement le long du site d'étude, et ce, dans pratiquement tous les groupes de données, peu importe l'échelle spatiale et la période étudiée. En effet, on observe pour la période 1993-2009 qu'une augmentation de la rugosité de l'estran est associée à un recul plus important des côtes, peu importe le type (tant meubles que rocheux), pour tous les types d'estrans de côte à terrasse de plage, à l'exception du type 4 (plage simple) où la largeur de l'estran est le paramètre le mieux relié. Concernant les autres paramètres de la morphométrie de l'estran, un taux d'érosion plus élevé est généralement enregistré lorsque l'estran possède une pente plus abrupte, que la ligne de rivage est plus élevée et que l'estran est plus court : en bref, un estran plus réfléchif.

Les reculs enregistrés les plus élevés entre 1993 et 2009 sont associés aux côtes à falaise meuble et aux combinaisons A4 et A5, soit des estrans dominés par des sédiments meubles non cohésifs (Tableaux 4.7 et 4.8). Quant à la période 2009-2012, les plus importants reculs enregistrés sont associés aux côtes à terrasse de plage et aux combinaisons A2 et A3, soit des estrans composites à dominante rocheuse, suivi de près par la combinaison A7, soit un estran à dominante vaseuse (Tableaux 4.7 et 4.8).

Pour les estrans situés sur une côte rocheuse (avec ou sans falaise), les résultats concordent avec l'hypothèse de départ que la période 1993-2009 était trop courte pour que les différences en termes de caractéristiques morphométriques expliquent les variations dans le taux de déplacement au sein de ces groupes de profils. Les relations sont plus significatives avec la période de temps la plus longue, soit 1963-2012 (Tableaux 5.7 et 5.8 du chapitre 5). Étant donné que ce sont des côtes qui évoluent lentement, il est nécessaire d'étudier l'évolution de la côte sur une plus longue période de temps afin d'observer plus facilement la tendance générale et les facteurs qui l'influencent. Par ailleurs, la forte relation identifiée dans le groupe de données des côtes rocheuses sans falaise est difficilement interprétable en raison de la méthode de traçage de la ligne de rivage ; dans le cas des côtes rocheuses sans falaise, le recul de la ligne de rivage correspond souvent à un recul de la mince couverture de dépôt meuble recouvrant cette côte rocheuse structurale, et non à l'érosion du roc en lui-même. De plus, la plus grande marge d'erreur du tracé de la ligne de rivage pour l'année 1963, par rapport aux autres tracés, pourrait expliquer les plus faibles coefficients de détermination observés, voire même l'absence de relation, avec les données des côtes rocheuses par rapport aux données des côtes meubles. Quant aux côtes meubles, plus particulièrement les côtes à terrasse de plage, de nombreux paramètres géomorphologiques ont été identifiés comme ayant une corrélation significative avec le taux de déplacement, principalement avec la période de 1993-2009.

Suite aux analyses effectuées, les principales caractéristiques descriptives identifiées ayant une relation avec le taux de déplacement pour plusieurs groupes (combinaisons à l'échelle globale, régionale et sectorielle) correspondent au degré d'anthropisation, à la formation géologique ainsi que la densité d'algues retrouvée dans la partie basse de l'estran et en avant-côte. Toutefois, cette dernière corrélation n'était pas visible sur les illustrations couplant la densité d'algues avec les paramètres morphométriques. Il serait donc intéressant d'approfondir le sujet pour mieux comprendre la relation existante afin de savoir si l'énergie dissipée par ces algues est suffisante pour affecter l'érosion à la côte. Sur les

estran à dominante rocheuse, on retrouve également un lien entre le taux de déplacement et la surface couverte par la plate-forme ainsi que l'orientation des strates de la plate-forme. La présente étude ayant été davantage centrée sur les composantes morphométriques de l'estran, des analyses plus approfondies portant sur les caractéristiques descriptives sont nécessaires afin de 1) déterminer le sens et la force de ces relations et 2) de cibler les conditions environnementales dans lesquelles les relations sont les plus fortes.

Au final, en ce qui concerne les caractéristiques morphométriques, la tendance générale observée sur chacune des sept combinaisons étudiées, toutes échelles confondues (sauf à l'échelle locale qui présente quelques variations), consiste en une augmentation de l'érosion pour la période 1993-2009 lorsque l'estran est plus étroit, plus abrupt et caractérisé par une forte rugosité et inversement, une stabilité voire même une accrétion lorsque l'estran est large à pente faible et caractérisée et une faible rugosité. La reproductibilité des résultats à plusieurs échelles spatiales implique qu'il serait possible d'extrapoler les tendances observées sur le reste des côtes non artificialisées, excluant les secteurs en fond de baie de la rive sud de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent. Cependant, d'autres recherches sont nécessaires afin de valider cette hypothèse.

Les figures 6.3 et 6.4 présentent une schématisation des tendances observées avec les principales composantes morphométriques de l'estran concernant la période 1993-2009 et 2009-2012 respectivement.

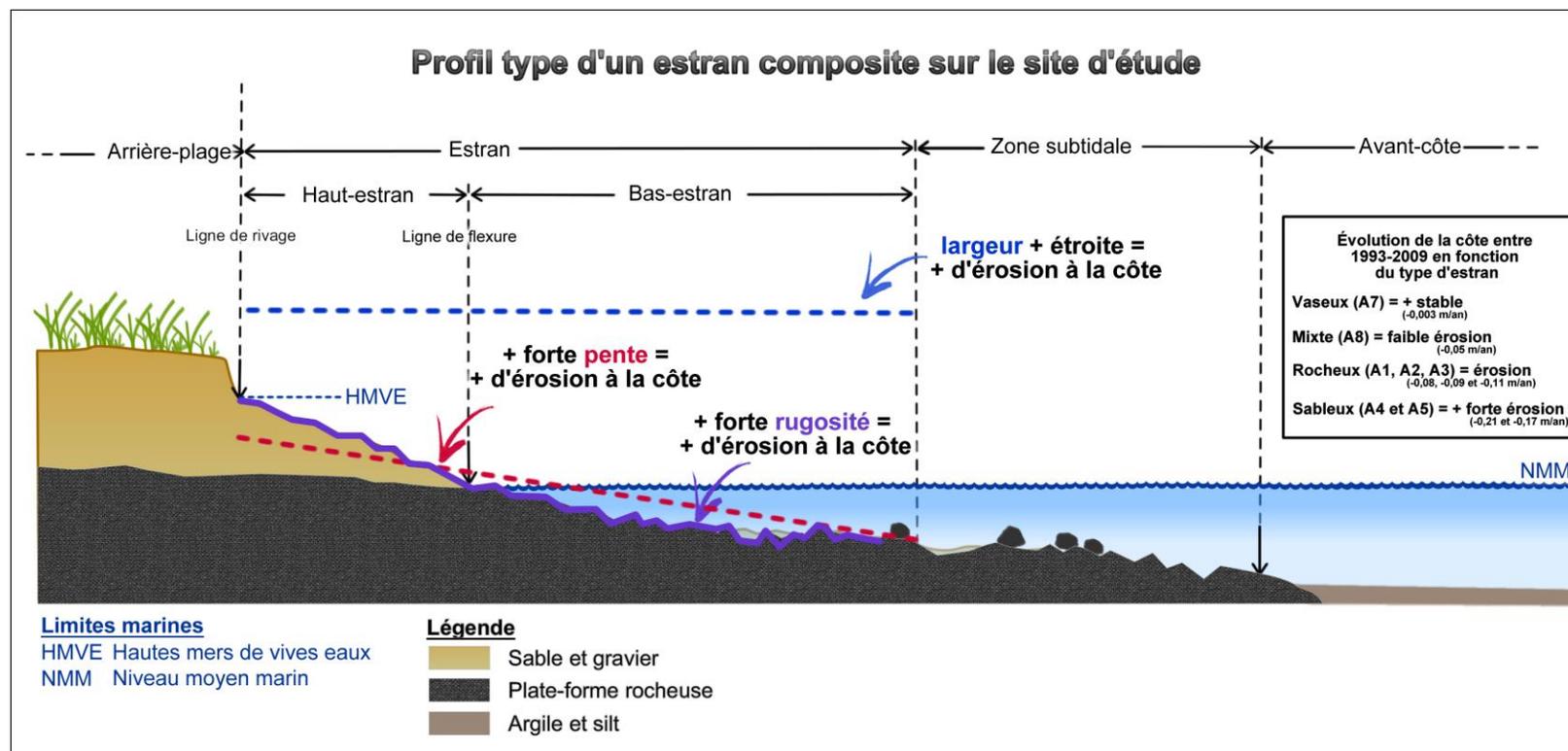


Figure 6. 3 : Synthèse des tendances générales observées pour les estrans de l'ensemble du site d'étude, pour la période 1993-2009. Profil d'estran basé sur les observations de terrain.

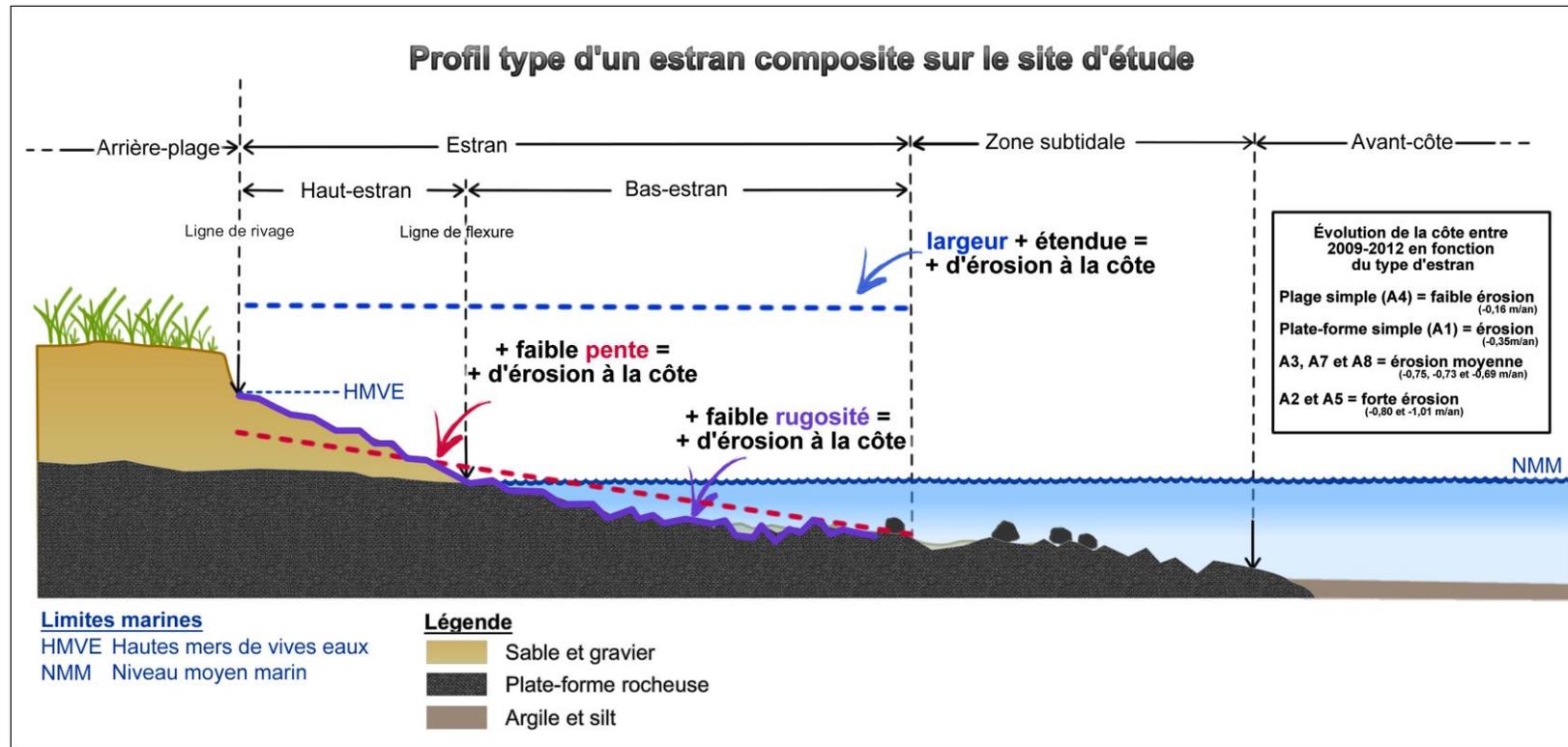


Figure 6. 4 : Synthèse des tendances générales observées pour les estrans de l'ensemble du site d'étude, pour la période 2009-2012. Profil d'estran basé sur les observations de terrain.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La présente étude constitue la première quantification de l'influence de la géomorphologie des estrans sur l'évolution de la côte du Québec maritime. Après l'analyse approfondie de 36,6 km de côte linéaire naturelle composée d'une grande variété d'estrans, les résultats de la présente recherche confirment qu'il existe un lien entre la géomorphologie de l'estran et l'aléa érosion sur les côtes sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Ces résultats, principalement concernant le rôle de la pente moyenne et la largeur de l'estran ainsi que la géométrie de la plate-forme rocheuse, soulignent la pertinence d'intégrer dorénavant la géomorphologie des estrans dans la méthode de cartographie des risques d'érosion côtière, indispensable à une bonne gestion intégrée des zones côtières. Pour ce faire, il serait d'abord nécessaire de procéder à la caractérisation des estrans pour l'ensemble des côtes du Québec maritime. La méthode de calcul des caractéristiques morphométriques utilisant les données LiDAR semble être la plus efficace pour la caractérisation d'un long site d'étude. La cartographie du risque d'érosion devra ensuite être testée à divers endroits le long de la côte afin d'évaluer l'impact de l'ajout des caractéristiques géomorphologiques, notamment la pente, la largeur ainsi que la couverture et le type de plate-forme rocheuse le cas échéant, sur la délimitation des zones exposées à l'érosion côtière et sur le niveau de ce risque.

La force de ces relations peut varier en fonction de la composition de l'estran (type d'estran, surface couverte par une plate-forme, géologie) et de la géomorphologie de la côte (type de côte, orientation de la ligne de rivage, exposition aux vents dominants). La

reproductibilité à plusieurs échelles spatiales de la tendance générale obtenue nous permet de supposer qu'il serait possible d'extrapoler les relations observées pour les côtes à terrasse de plage à d'autres estrans de la rive sud de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent à condition que 1) ces estrans aient les mêmes conditions environnementales (côte à terrasse de plage, lithologie similaire, marnage), 2) que les mêmes intervalles de temps soient utilisés et 3) que le site à l'étude soit suffisamment grand (quelques kilomètres au minimum). D'autres études axées sur la même question de recherche sur la rive sud du golfe du Saint-Laurent et dans la baie des Chaleurs, où l'on peut aussi retrouver des côtes meubles avec une plate-forme rocheuse, permettraient de valider cette hypothèse et de comparer les résultats obtenus avec ceux du secteur Pointe-au-Père – Matane.

La présente recherche a également permis de cibler des sujets forts intéressants à explorer dans le cadre de futures recherches qui permettraient d'améliorer la compréhension du rôle que jouent les estrans dans la dynamique côtière et l'évolution des côtes du Saint-Laurent. En premier lieu, nous recommandons une étude plus approfondie sur les relations existantes identifiées entre les caractéristiques géomorphologiques descriptives des estrans, notamment la géologie, et le taux de déplacement de la côte afin de calculer la force et le sens de ces relations, ce qui compléterait l'étude de la portée d'influence de la géomorphologie des estrans compris dans le site d'étude. Aussi, il serait intéressant d'effectuer des régressions linéaires multiples afin de préciser la contribution de chaque caractéristique morphométrique dans la relation avec les taux de déplacement des deux séries. De plus, il serait intéressant de procéder aux mêmes analyses pour les combinaisons des autres types de côtes afin de savoir si on y retrouve les mêmes relations.

En second lieu, une analyse hydrodynamique intégrant les données de vagues à différents points sur le profil d'un estran composite permettrait de mesurer 1) le degré d'influence de la composition et de la morphométrie de l'estran sur la dynamique des vagues incidentes ainsi que 2) la transformation en termes d'énergie et de hauteur de vague

qu'elles subissent le long du profil. Cette analyse permettrait également de valider notre hypothèse et de quantifier l'influence de la pente moyenne de l'estran sur le *runup* des vagues, responsable en partie de l'évolution des côtes à terrasse de plage qui composent la grande majorité des côtes du site d'étude. Dans cette même étude pourrait être incluse la répartition des algues dans la partie distale de l'estran et en avant-côte étant donné qu'un lien a été identifié entre ces dernières et le taux de déplacement de la période 1993-2009 et ce, pour tous les types d'estrans. Enfin, un projet autre intéressant consisterait à tester la relation entre le taux de déplacement de la côte en fonction de l'étendue et du nombre de jours couvert par le pied de glace pour chaque type d'estran. Cet aspect n'ayant pas encore été analysé sur les côtes de ce secteur du fleuve Saint-Laurent, la question principale de recherche serait de déterminer l'importance du rôle que joue le pied de glace, à différents stades de son développement, sur l'aléa érosion durant la période hivernale et de comparer les résultats en fonction du type de côte et du type d'estran présent. Cette nouvelle étude intégrerait également les données morphométriques principales de l'estran soient la rugosité globale ainsi que les largeurs et les pentes du haut-estran, du bas-estran et moyenne. Dans le contexte de changements climatiques où est attendue une réduction de la saison de pied de glace ainsi qu'une augmentation de la période durant laquelle il est incomplet (Senneville *et al.*, 2014), une évaluation empirique du rôle des caractéristiques géomorphologiques des estrans sur la stabilité et l'étendue du pied de glace serait pertinente, ce qui permettrait d'améliorer la délimitation et la gestion des risques d'érosion face de tempêtes hivernales.

BIBLIOGRAPHIE

- Addinsoft. 2015. « ANOVA à un facteur de Welch et de Brown-Forsythe – Logiciel statistique pour Excel ». En ligne. <<https://www.xlstat.com/fr/solutions/fonctionnalites/welch-and-brown-forsythe-one-way-anova>>. Consulté le 31 octobre 2016.
- Amos, C. L., G. Umgiesser, C. Ferrarin, C. E. L. Thompson, R. J. S. Whitehouse, T. F. Sutherland et A. Bergamasco. 2004. « The erosion rates of cohesive sediments in Venice lagoon, Italy ». *Continental Shelf Research*, vol. 30, no 8, pp. 859-870.
- Andersen, T. J. 2001. « Seasonal Variation in Erodibility of Two Temperate, Microtidal Mudflats ». *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 53, no 1, pp. 1-12.
- Arsenault, E. 2016. « Évaluation du bilan sédimentaire d'un tronçon côtier entre Baie-des-Sables et Matane ». Mémoire de maîtrise en géographie, Université du Québec à Rimouski, 173 p.
- Baillargeon, S., et Y. Crousset (2006). *L'érosion côtière et les impacts des méthodes de stabilisation sur l'environnement*. Comité ZIP Côte-Nord du Golfe, ministère Pêches et Océans Canada et Ville de Sept-Îles, Comité ZIP Côte-Nord du Golfe, 42 p.
- Battjes, J. A. (1974). *Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves*, Report 74-2. Delft, Pays-Bas, Committee on Hydraulics, Department of Civil engineering, Delft University.
- Beetham, E. P., et P. S. Kench. 2011. «Field observations of infragravity waves and their behaviour on rock shore platforms». *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 36, no 14, pp. 1872-1888.
- 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, no 1, pp. 45-71.
- . 2008. « Seasonal quantification of coastal processes and cliff erosion on the fine sediments shorelines in a cold temperate climate, North Shore of the St-Lawrence Maritime Estuary ». *Journal of Coastal Research*, vol. 24, no 1, pp. 160-180.
- Bernatchez, P., et C. Fraser. 2012. « Evolution of Coastal Defence Structures and Consequences for Beach Width Trends, Quebec, Canada ». *Journal of Coastal Research*, vol. 28, no 6, pp. 1550-1566.

- Bernatchez P., Fraser C., Friesinger S., Jolivet Y., Dugas S., Drejza S., Morissette A. 2008. *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, D. Lefavre, S. Dugas 2011. « Integrating anthropogenic factors, geomorphological indicators and local knowledge in the analysis of coastal flooding and erosion hazards ». *Ocean & Coastal Management*, vol. 54, pp. 621-632.
- Bernatchez, P. et C. Quintin. 2016. « Potentiel de migration des écosystèmes côtiers meubles québécois de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent dans le contexte de la hausse appréhendée du niveau de la mer ». *Le Naturaliste Canadien* : vol. 140, no 2, pp.91-103.
- Bird, E. 2008. *Coastal Geomorphology: An Introduction*, 2^e édition. West Sussex, Angleterre : Wiley, 411 p.
- Boak, E. H., et I. L. Turner. 2005. « Shoreline Definition and Detection: A Review ». *Journal of Coastal Research*, vol. 21, no 4, pp. 688-703.
- Boruff B.J., C. Emrich, S. L. Cutter. 2005. « Erosion Hazard Vulnerability of US Coastal Counties ». *Journal of Coastal Research*, vol. 21, no 5, pp. 932-942.
- Boucher-Brossard G. 2012. *Rythme et modes de recul des falaises à sommet tourbeux de la Côte-Nord de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent*. Mémoire de maîtrise en géographie, Université du Québec à Rimouski, 194 p.
- Cappucci, S., C. L. Amos, Taro Hosoe et Georg Umgieser. 2004. « SLIM: a numerical model to evaluate the factors controlling the evolution of intertidal mudflats in Venice Lagoon, Italy ». *Journal of Marine Systems*, vol. 51, no 1-4, pp. 257-280.
- Cardinal, R.N., M. R. F. Aitken (2006). « ANOVA for the behavioural sciences researcher - Chapitre 3 : Practical Analysis ». New Jersey (USA) : Lawrence Erlbaum Associates Inc., 445 p. Retrouvé sur le site du Département de psychologie expérimentale, Université de Cambridge. En ligne.
<https://egret.psychol.cam.ac.uk/statistics/local_copies_of_sources/Cardinal_and_Aitken_ANOVA/MultipleComparisons_3.htm>. Consulté le 31 octobre 2016.
- Chabot R., A. Rossignol. 2003. *Algues et faunes du littoral du Saint-Laurent maritime : Guide d'identification*. Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER), Pêches et Océans Canada – Institut Maurice-Lamontagne, Mont-Joli, 113 p.
- Coques R. 1993. *Géomorphologie*. Armand Colin, 5^e édition, 503 p.
- Corriveau, M., C. Fraser, T. Caron, P. Bernatchez, T. Buffin-Bélanger, S. Van-Wierds. 2016. *Étude de la dynamique morphosédimentaire des côtes basses sablonneuses en bordure de la route*

- 138 sur la Côte-Nord du Saint-Laurent en contexte de changements climatiques : Rapport final. Projet X016.1.* Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère des Transports du Québec, mars 2016, 421 p. + annexes.
- Coulombier, T., U. Neumeier et P. Bernatchez. 2012. « Sediment transport in a cold climate salt marsh (St. Lawrence Estuary, Canada), the importance of vegetation and waves ». *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 101, no 0, pp. 64-75.
- Daigle R. et l'équipe de recherche du projet. 2006. *Impacts de l'élévation du niveau de la mer et du changement climatique sur la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick*. Environnement Canada, octobre 2006, 611 p.
- Dasgupta, R. 2011. « Whither shore platforms? ». *Progress in Physical Geography*, vol. 35, no 2, pp. 183-209.
- Davis Jr., R.A., et D.M. Fitzgerald. 2004. *Beaches and Coasts*. Malden, USA: Blackwell Publishing company, 448 p.
- Davidson-Arnott, R. G. D. 2010. *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. New York : Cambridge University Press, 442 p.
- De Bakker, A. T. M., M. F. S. Tissier et B. G. Ruessink. 2014. «Shoreline dissipation of infragravity waves». *Continental Shelf Research*, vol. 72, pp. 73-82.
- Didier, D. 2014. *Évaluation de la submersion côtière par l'estimation in situ du wave runup sur les côtes basses du Bas-Saint-Laurent, Québec*. Mémoire de maîtrise en géographie, Université du Québec à Rimouski, 182 p.
- Didier, D., P. Bernatchez, G. Marie et G. Boucher-Brossard. 2016. «Wave runup estimations on platform-beaches for coastal flood hazard assessment». *Natural Hazards*, vol. 83, no 3, pp. 1443-1467.
- Dionne, J.-C. 1962. « Note sur les blocs d'estran du littoral sud du Saint-Laurent ». *Canadian Geographer / Le Géographe canadien*, vol. 6, no 2, pp. 69-77.
- . 1967. « Formes de corrosion littorale, côte sud du Saint-Laurent ». *Cahier de géographie du Québec*, vol. 11, no 23, pp. 379-395.
- . 1973. « La notion de pied de glace (Icefoot), en particulier dans l'estuaire du Saint-Laurent ». *Cahier de géographie du Québec*, vol. 17, no 41, pp. 221-250.
- . 1981. « A boulder-strewn tidal flat, north shore of the Gulf of St. Lawrence, Québec ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 35, no 2, pp. 261-267.
- . 1999. « L'érosion des rives du Saint-Laurent : Vue d'ensemble et état de la question ». *Colloque sur l'érosion des berges : vers une gestion intégrée des interventions en milieu marin*

- (Baie-Comeau), sous la dir. de Comité ZIP de la rive nord de l'estuaire, pp. 2-23. Baie-Comeau: Comité ZIP de la rive nord de l'estuaire.
- . 2000. « Érosion récente du schorre supérieur à Sainte-Anne-de-Beaupré ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 54, no 1, pp. 69-89.
- . 2001. « Observations géomorphologiques sur les méga-blocs d'un schorre à *Spartina alterniflora*, estuaire maritime du Saint-Laurent, Québec / Geomorphic observations on the mega-boulders in a *Spartina alterniflora* tidal marsh, Lower St. Lawrence estuary, Québec ». *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 7, no 4, pp. 243-255.
- . 2002. « État des connaissances sur la ligne de rivage Micmac de J. W. Goldthwait (estuaire du Saint-Laurent) ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 56, no 1, pp. 97-121.
- . 2004. « Observations géologiques récentes sur le cordons de blocs d'estran à Métis-sur-Mer signalé en 1886 par Sir William Dawson ». *Le naturaliste canadien, Géologie*, vol. 128, no 1, pp. 91-97.
- . 2009. « Aspects géomorphologiques de la batture à blocs entre Sainte-Luce-sur-Mer et Sainte-Flavie, côte sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent ». Université de Sherbrooke, vol. 185, 56 p.
- Drapeau, G. 1992. « Dynamique sédimentaire des littoraux de l'estuaire du Saint-Laurent ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 46, no 2, pp. 233-242.
- Drejza S. 2010. *Impact et efficacité des zonages des risques côtiers dans un contexte de changements climatiques : Exemple de Percé, Québec*. Mémoire de maîtrise en géographie, Université du Québec à Rimouski, 194 p.
- Drejza S., Friesinger S. et Bernatchez P. 2014. Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changement climatique : Caractérisation des côtes, dynamique hydrosédimentaire et exposition des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion, Est du Québec, Volume 1, Projet X008.1. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Remis au ministère des Transports du Québec, mars 2014, 226 pages + annexes.
- Dubois J.-M. M. 1973. *Essai de classification géomorphologique d'une côte en vue d'une utilisation en génie côtier. Exemple de la côte nord de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent entre Pointe-des-Monts et Blanc-Sablon*. Université de Sherbrooke, Bulletin de recherche, no. 10, 140 p.
- Dubois J.-M. M., P. Bernatchez, J. D. Bouchard, B. Daigneault, D. Cayer, S. Dugas. 2005. *Évaluation du risque d'érosion du littoral de la Côte-Nord du Saint-Laurent pour la période de 1996-2003*. Projet pilote les ministères québécois de l'Environnement, de la Sécurité publique, des Affaires municipales, des Transports, des Ressources naturelles, des Régions et la Conférence régionale des élus de la Côte-Nord, 359 p.

- Field, C.B., Mortsch L.D. 2007. « Chapter 14: North America. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability ». Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 617-652.
- Forbes, D.L., R.B. Taylor. 1994. « Ice in the shore zone and the geomorphology of cold coasts ». *Progress in Physical Geography*, vol. 18, no 1, pp. 59-89.
- Forbes, D.L., G.S. Parkes, G.K. Manson et L.A. Ketch. 2004. « Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence ». *Marine Geology*, vol. 210, pp. 169-204.
- French, J. R., et D. R. Stoddart. 1992. « Hydrodynamics of salt marsh creek systems: Implications for marsh morphological development and material exchange ». *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 17, no 3, pp. 235-252.
- Frey, R.W., et P.B. Basan. 1978. « Coastal salt marshes ». In *Coastal sedimentary environments*, 2^e édition, R.A. Davis Jr., pp. 101-169. New York: Springer-Verlag.
- Friend, P. L., P. Ciavola, S. Cappucci et R. Santos. 2003. « Bio-dependent bed parameters as a proxy tool for sediment stability in mixed habitat intertidal areas ». *Continental Shelf Research*, vol. 23, no 17-19, p. 1899-1917.
- Friend, P. L., C. H. Lucas et S. K. Rossington. 2005. « Day–night variation of cohesive sediment stability ». *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 64, no 2–3, pp. 407-418.
- Goulet, C. 2016. « Initiation pratique à la méthodologie des sciences humaines – Analyse de variance ». En ligne.
 <http://pagesped.cahuntsic.ca/sc_sociales/psy/methosite/consignes/variance.htm>.
 Consulté le 31 octobre 2016.
- Hansom, J. D., D. L. Forbes et S. Etienne. 2014. «The rock coasts of polar and sub-polar regions». In *Rock Coasts Geomorphology: A Global Synthesis*, D. M. Kennedy, W. J. Stephenson et L. A. Naylor, p. 263-281. London: Geological Society.
- Hénaff, A., et J.-C. Bodéré. 2001. « Modifications récentes des apports biodétritiques littoraux : conséquences sur le budget sédimentaire des estrans sableux de l'ouest du Massif Armoricain ». *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 7, no 1, pp. 17-29.
- IBM Corporation. 2015. « IBM Knowledge Center – General Linear Model Post Hoc Comparisons ». En ligne.
https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSLVMB_21.0.0/com.ibm.spss.statistics.help/idh_glm_post.htm>. Consulté le 31 octobre 2016.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Éditeurs : Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels,

- Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA, 1535 pp.
- Kanyaya, J. I., et A. S. Trenhaile. 2005. « Tidal wetting and drying on shore platforms: An experimental assessment ». *Geomorphology*, vol. 70, no 1-2, pp. 129-146.
- Kennedy, D. M. 2015. «Where is the seaward edge? A review and definition of shore platform morphology». *Earth-Science Reviews*, vol. 147, p. 99-108.
- Kennedy, D. M. 2016. «The subtidal morphology of microtidal shore platforms and its implication for wave dynamics on rocky coasts». *Geomorphology*, vol. 268, p. 146-158.
- Kennedy D.M., et Dickson M.E. 2006. « Lithological control on the elevation of shore platforms in a microtidal setting ». *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 31, pp. 1575-1584.
- Kennedy, D. M., R. Paulik et M. E. Dickson. 2011. « Subaerial weathering versus wave processes in shore platform development: reappraising the Old Hat Island evidence ». *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 36, no 5, pp. 686-694.
- Komar, P. D. 1998. *Beach processes and sedimentation*, 2^e édition. Upper Saddle River, N.J., USA: Prentice-Hall, 544 p.
- LDGIZC. 2009. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Données et rapports internes.
- Leeder, M. 1999. *Sedimentology and sedimentary basins, from turbulence to tectonics*. Malden: Blackwell Publishing, 592 p.
- Lessard G.L., et Dubois J.-M.M. 1984. « Évolution littorale multitemporelle d'une côte récemment déglacée du nord du golfe du Saint-Laurent ». *Revue de Géomorphologie Dynamique*, vol. 33, no 3, pp. 81-96.
- Lim M., Rosser N.J., Petley D.N., Keen M. 2011. « Quantifying the Controls and Influence of Tide and Wave Impacts on Coastal Rock Cliff Erosion ». *Journal of Coastal Research*, vol. 27, no 1, pp. 46-56.
- Limber, P. W., et A. B. Murray. 2014. « Unraveling the dynamics that scale cross-shore headland relief on rocky coastlines: 2. Model predictions and initial tests ». *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, vol. 119, no 4, p. 874-891.
- Lundkvist, M., M. Grue, P. L. Friend et M. R. Flindt. 2007. « The relative contributions of physical and microbiological factors to cohesive sediment stability ». *Continental Shelf Research*, vol. 27, no 8, pp. 1143-1152.
- Marie, G., P. Bernatchez, S. Dugas, C. Fraser et S. Drejza (2014). « Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral des MRC de La Mitis et de la Matanie et des

- municipalités de Cap-Chat et Sainte-Anne-des-Monts ». Rimouski, Université du Québec à Rimouski: 75 p
- Marshall, R. J. E., et W. J. Stephenson. 2011. «The morphodynamics of shore platforms in a micro-tidal setting: Interactions between waves and morphology». *Marine Geology*, vol. 288, no 1-4, p. 18-31.
- Masselink G., M. G. Hughes. 2011. *Introduction to coastal processes and geomorphology*, 2^e édition. London (UK) : Hodder Education, 416 p.
- Masselink G., Short A.D. (1993). « The Effect of Tide Range on Beach Morphodynamics and Morphology : A Conceptual Beach Model ». *Journal of Coastal Research*, vol. 9 : 3, pp. 785-800.
- McCarroll, D., et A. Nesje. 1996. « Rock surface roughness as an indicator of degree of rock surface weathering ». *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 21, no 10, pp. 963-977.
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (MERN). 2015. « SIGEOM - Système d'information géominière du Québec - Carte interactive ». En ligne. <http://sigeom.mines.gouv.qc.ca/signet/classes/I1108_afchCarteIntr>. Consulté le 15 décembre 2015.
- Möller, I., et T. Spencer. 2002. « Wave dissipation over macro-tidal saltmarshes: Effects of marsh edge typology and vegetation change ». *Journal of Coastal Research*, no Special issue : 36, pp. 506-521.
- Morton, R. A. 2002. « Factors controlling storm impacts on coastal barriers and beaches - A preliminary basis for near real-time forecasting ». *Journal of Coastal Research*, vol. 18, no 3, pp. 486-501.
- Morton, R. A., J. G. Paine et J. C. Gibeaut. 1994. « Stages and Durations of Post-Storm Beach Recovery, Southeastern Texas Coast, U.S.A ». *Journal of Coastal Research*, vol. 10, no 4, pp. 884-908.
- Naylor, L. A., W. J. Stephenson et A. S. Trenhaile. 2010. « Rock coast geomorphology: Recent advances and future research directions ». *Geomorphology*, vol. 114, no 1-2, pp. 3-11.
- Neumeier, U., et C. L. Amos. 2006. « Turbulence Reduction by the Canopy of Coastal Spartina Salt-Marshes ». *Journal of Coastal Research*, no 39. Proceedings of the 8th International Coastal Symposium (ICS 2004), Vol. I, Coastal Education & Research Foundation, Inc., pp. 433-439.
- Neumeier, U., et P. Ciavola. 2004. « Flow Resistance and Associated Sedimentary Processes in a Spartina maritima Salt-Marsh ». *Journal of Coastal Research*, vol. 20, no 2, pp. 435-447.
- Neumeier, U., C. H. Lucas et M. Collins. 2006. « Erodibility and erosion patterns of mudflat sediments investigated using an annular flume ». *Aquatic Ecology*, vol. 40, no 4, pp. 543-554.

- Nonn, H. 1974. *Géographie des littoraux*. Coll. «SUP». Vendôme: Presses Universitaires de France, 256 p.
- Ogawa, H. 2013. «Observation of wave transformation on a sloping type B shore platform under wind-wave and swell conditions». *Geo-Marine Letters*, vol. 33, no 1, p. 1-11.
- Ogawa, H., M. E. Dickson et P. S. Kench. 2011. «Wave transformation on a sub-horizontal shore platform, Tatapouri, North Island, New Zealand». *Continental Shelf Research*, vol. 31, no 14, p. 1409-1419.
- , 2015. «Hydrodynamic constraints and storm wave characteristics on a sub-horizontal shore platform». *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 40, no 1, p. 65-77.
- Ogawa, H., P. Kench et M. Dickson. 2012. «Field Measurements of Wave Characteristics on a Near-Horizontal Shore Platform, Mahia Peninsula, North Island, New Zealand». *Geographical Research*, vol. 50, no 2, pp. 179-192.
- Open University. 1999. *Waves, Tides and Shallow-water Processes*, 2^{ème} édition. Oxford: Pergamon Press, 187 p.
- Paskoff, R. 2006. *Les littoraux : Impact des aménagements sur leur évolution*, 3^e édition. Coll. «U». Paris: Armand Colin, 260 p.
- Pêches et Océans Canada. 2013. « Données disponibles – Marées, courants et niveaux d'eau ». En ligne. <www.tides.gc.ca/fra/donnees>. Consulté le 1^{er} mai 2013.
- Poropat, G.V. 2009. *Measurement of Surface Roughness of Rock Discontinuities: Rock Engineering in Difficult Conditions* - 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium (Toronto). Geomechanics Group, 1-8 p.
- Provencher, L., et J.-M.M. Dubois. 2010. « Proposition d'une nomenclature géomorphologique du rivage lacustre et comparaison avec les rivages côtiers et fluviaux ». *Le naturaliste canadien, Géologie*, vol. 134, no 1, p. 90-96.
- Quintin, C, P. Bernatchez et Y. Jolivet. 2013. *Impacts de la tempête du 6 décembre 2010 sur les côtes du Bas-Saint-Laurent et de la baie des Chaleurs*. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec (MSP). Chaire de recherche en géoscience côtière Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières. Rimouski, Université du Québec à Rimouski. 1 et 2: 48 et 170 p.
- Reading, H. G. 1996. *Sedimentary environments: processes, facies, and stratigraphy*, 3^e édition. Oxford: Blackwell Science, 688 p.
- Ruessink, B. G. 1998. «The temporal and spatial variability of infragravity energy in a barred nearshore zone». *Continental Shelf Research*, vol. 18, no 6, pp. 585-605.

- Ruest B. 2014. *Utilisation d'un modèle paramétrique pour l'évaluation du climat de vagues de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent et son évolution future dans un contexte de changements climatiques*. Mémoire de maîtrise en océanographie, Université du Québec à Rimouski, 127 p.
- Ruest B., U. Neumeier, D. Dumont, E. Bismuth, S. Senneville et J. Caveen. 2016. « Recent wave climate and expected future changes in the seasonally ice-infested waters of the Gulf of St. Lawrence, Canada ». *Climate Dynamics*, vol. 46, no 1, pp. 449-466.
- Ruggiero, P., P.D. Komar, W. G. McDougal., J.J. Marra, et A. Reggie. 2001. « Wave runup, extreme water levels and the erosion of properties backing beaches ». *Journal of Coastal Research*, vol. 17, no 2, pp. 407-419.
- Russell, P. E. 1993. « Mechanisms for Beach Erosion during Storms ». *Continental Shelf Research*, vol. 13, no 11, p. 1243-1265.
- Sallenger, A.H. (2000). « Storm impact scale for barrier islands ». *Journal of Coastal Research*, vol. 16, no 3, pp. 890-895.
- Senneville S., S. St-Onge Drouin, D. Dumont, A.-C. Bihan-Poudec, Z. Belemaalem, M. Corriveau, P. Bernatchez, S. Bélanger, S. Tolszczuk-Leclerc et R. Villeneuve. 2014. « Rapport final : modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques ». ISMER-UQAR, Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec, 384 p.
- Short, A. D. 1999. *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*. Chichester, Toronto: John Wiley & Sons Ltd, 379 p.
- Stéphan, P. 2011. *Les flèches de galets de Bretagne : évolutions passées, présentes et futures*. Paris: L'Harmattan, 263 p.
- Stephenson, W. J., et R. M. Kirk. 2000a. « Development of shore platforms on Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand: Part One: The role of waves ». *Geomorphology*, vol. 32, no 1-2, pp. 21-41.
- Stephenson W.J., et R.M. Kirk. 2000b. «Development of shore platforms on Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand: II: The role of subaerial weathering». *Geomorphology*, vol. 32, no 1-2, p. 43-56.
- Sunamura, T. 1992. *Geomorphology of Rocky Coasts*. Coll. «Coastal morphology and research». Chichester, Angleterre: John Wiley & Sons Ltd, 302 p.
- Thieler, E.R., E.A. Himmelstoss, J.L. Zichichi et E. Ayhan. 2009. *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 – An Extension for Calculating Shoreline Change*. U.S. Geological Survey Open File Report, 2008, 1278 p.

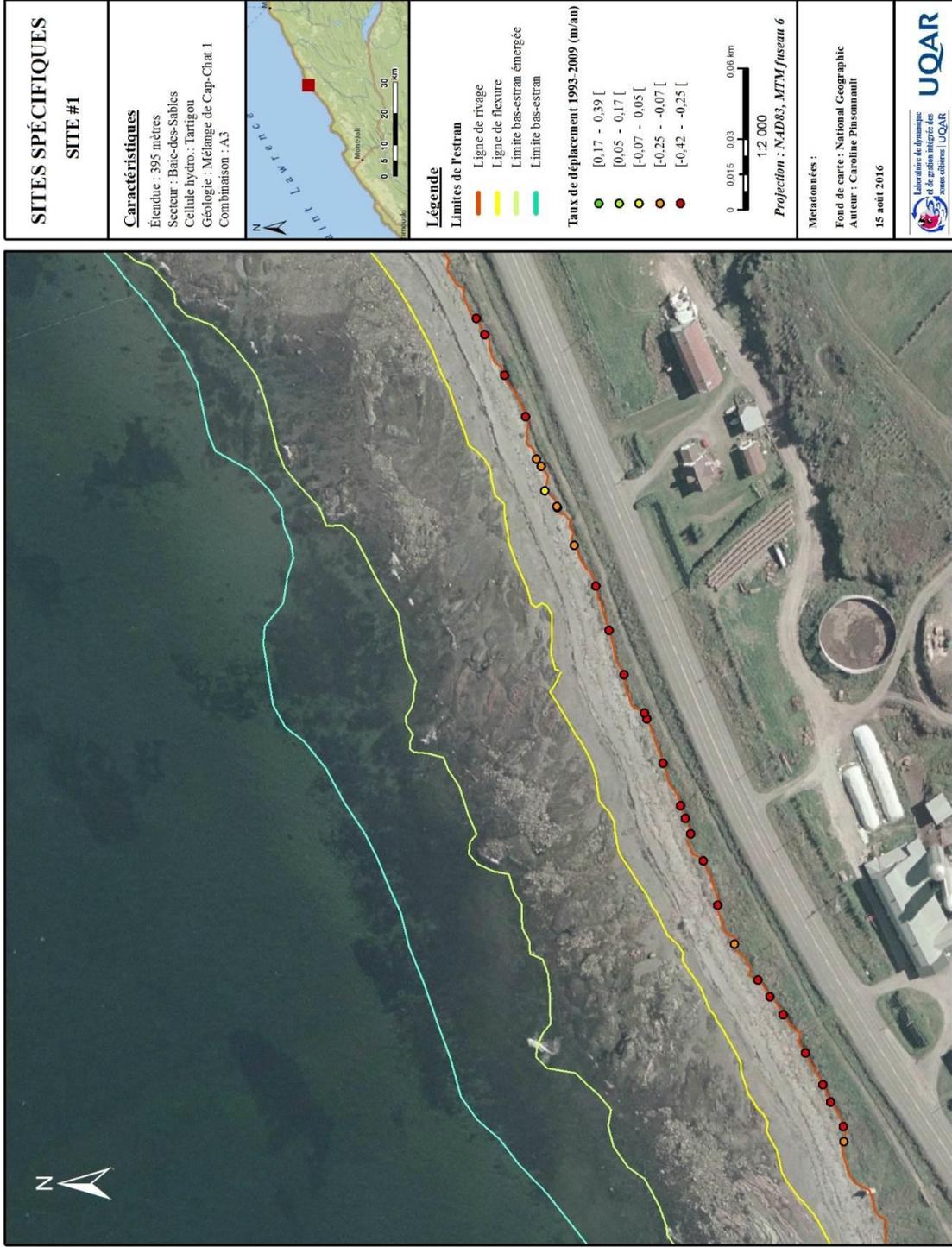
- Thornton, L. E., et W. J. Stephenson. 2006. « Rock strength: A control of shore platform elevation ». *Journal of Coastal Research*, vol. 22, no 1, pp. 224-231.
- Tolhurst T.J., P.L. Friend, C. Watts, R. Wakefield, K.S. Black et D.M. Paterson. 2006. « The effects of rain on the erosion threshold of intertidal cohesive sediments ». *Aquatic Ecology*, vol. 40, pp. 533-541.
- Trenhaile, A. S. 1978. « The Shore Platforms of Gaspé, Quebec ». *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 68, no 1, pp. 95-114.
- . 1987. *The Geomorphology of Rock Coasts*. Coll. «Oxford Research Studies in Geography». Oxford: Oxford University Press, 384 p.
- . 1997. *Coastal dynamics and landforms*. Oxford: Clarendon Press, 366 p.
- . 1999. « The Width of Shore Platforms in Britain, Canada and Japan ». *Journal of Coastal Research*, vol. 15, no 2, pp. 355-364.
- . 2002. « Rock coasts, with particular emphasis on shore platforms ». *Geomorphology*, vol. 48, no 1-3, pp. 7-22.
- . 2016. «Rocky coasts - their role as depositional environments». *Earth-Science Reviews*, vol. 159, p. 1 - 13.
- Trenhaile, A.S., et J.I. Kanyaya. 2007. « The Role of Wave Erosion on Sloping and Horizontal Shore Platforms in Macro- and Mesotidal Environments ». *Journal of Coastal Research*, vol. 23, no 2, pp. 298-309.
- Trenhaile A.S., N.J. Porter et J.I. Kanyaya. 2006. « Shore Platform Processes in Eastern Canada ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 60, no 1, pp. 19-30.
- Vigeant G. 1984. *Cartes climatologiques du Saint-Laurent*. Environnement Canada, Service de l'Environnement atmosphérique.
- Walkden, M., et M. Dickson. 2008. « Equilibrium erosion of soft rock shores with a shallow or absent beach under increased sea level rise ». *Marine Geology*, vol. 251, no 1-2, pp. 75-84.
- Widdows, J., S. Brown, M. D. Brinsley, P. N. Salkeld et M. Elliott. 2000. « Temporal changes in intertidal sediment erodability: influence of biological and climatic factors ». *Continental Shelf Research*, vol. 20, no 10-11, pp. 1275-1289.
- Woodroffe, C. D. 2003. *Coasts: form, process and evolution*, 1^{ère} édition. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 623 p.
- Yergeau, E. et Poirier, M. (2013). « SPSS à l'Université de Sherbrooke : Analyse de variance ». Université de Sherbrooke. En ligne. <<http://spss.espaceweb.usherbrooke.ca/pages/stat-inferentielles/analyse-de-variance/interpretation.php>>. Consulté le 31 octobre 2016.

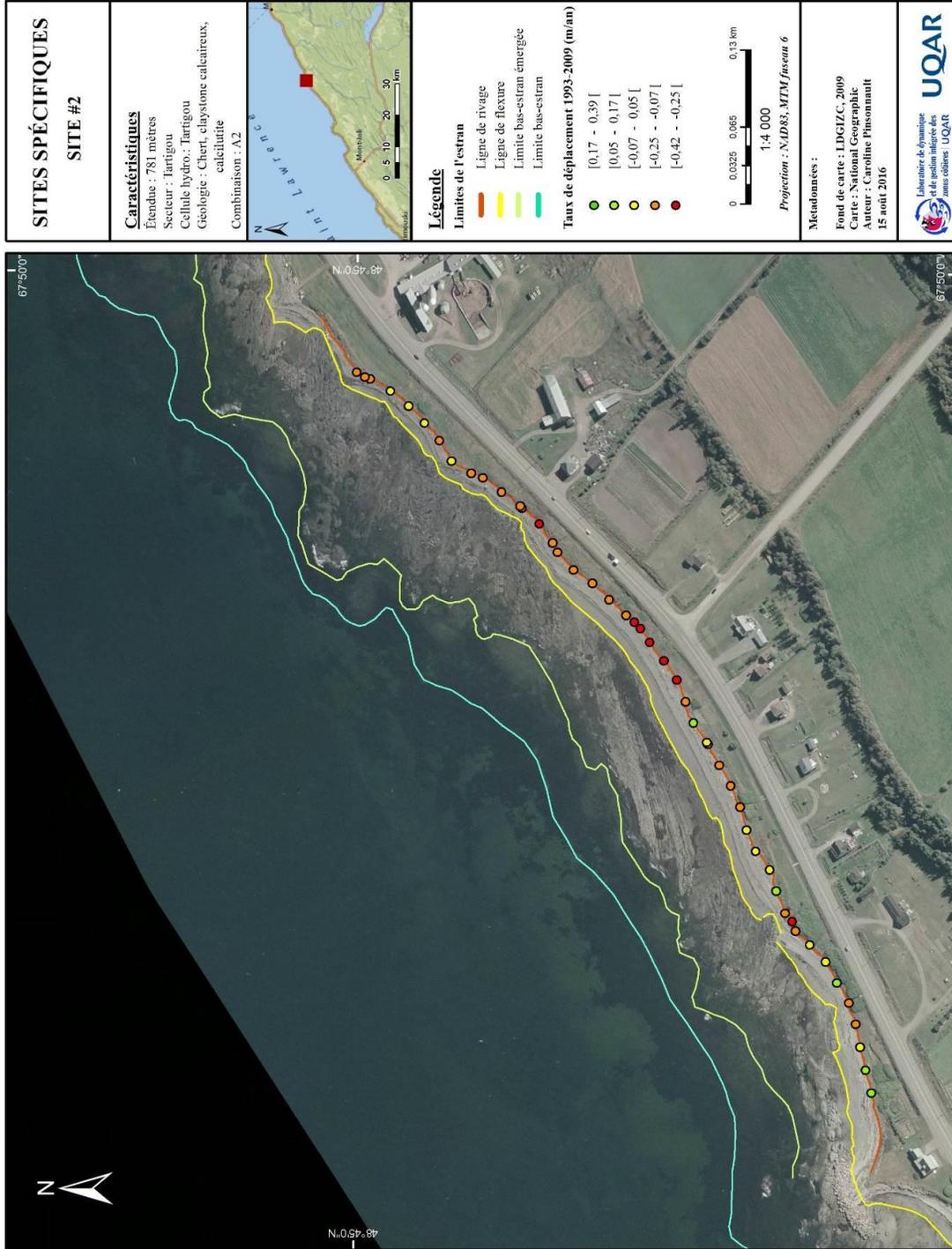
Zenkovich, V.P. 1967. *Processes of Coastal Development*. Edinbourg, Londres: Oliver and Boyd Ltd, 738 p.

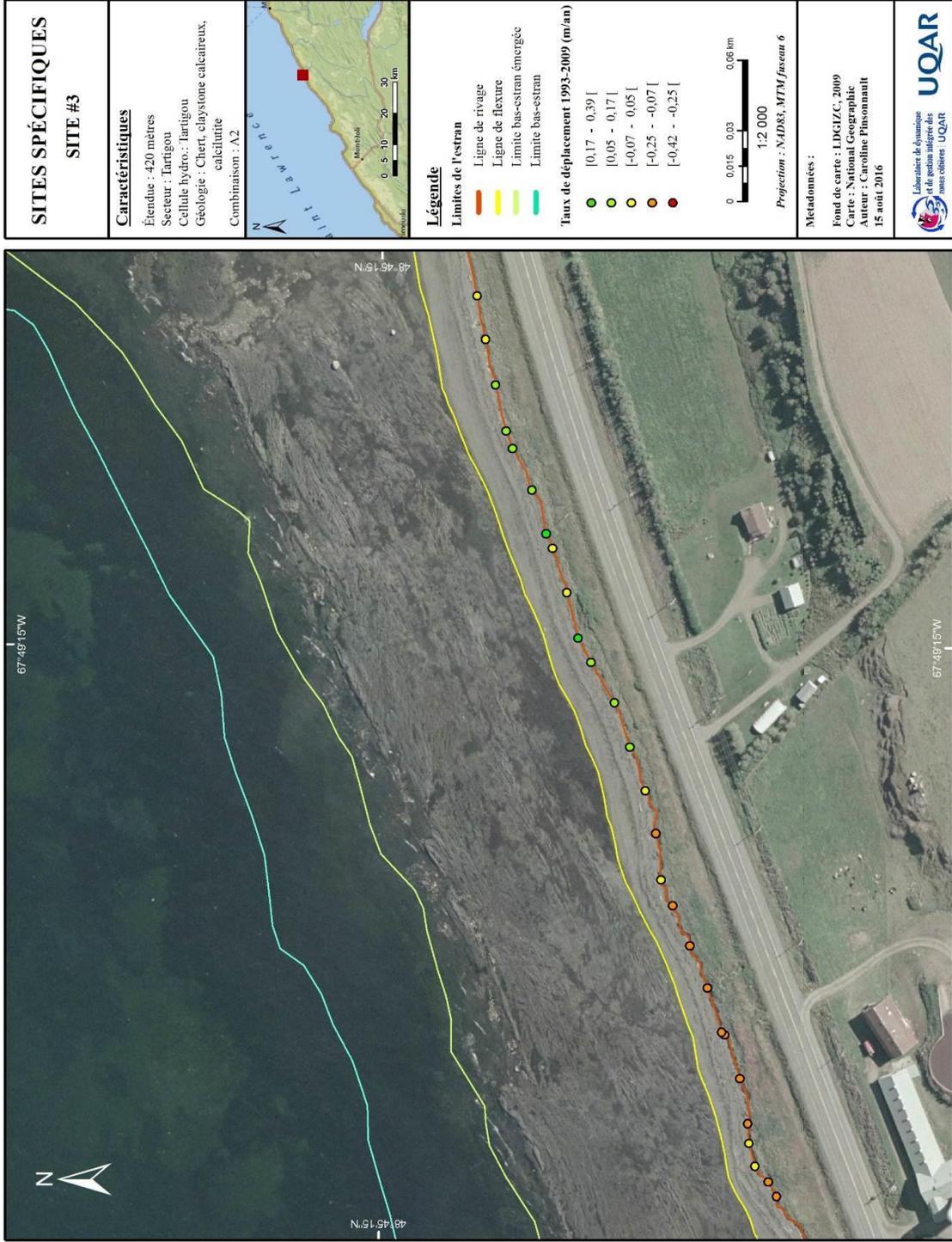
ANNEXES

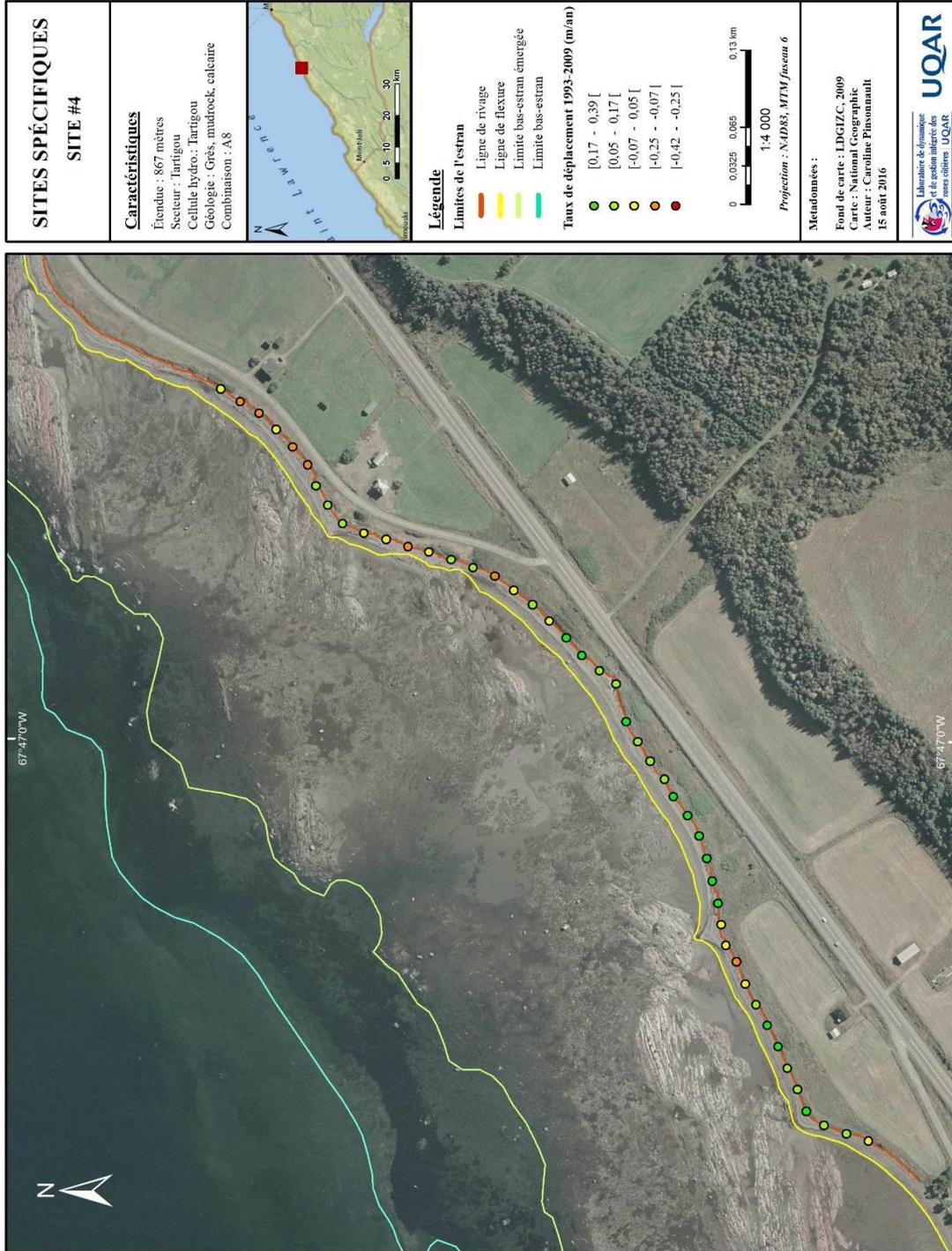
ANNEXE I

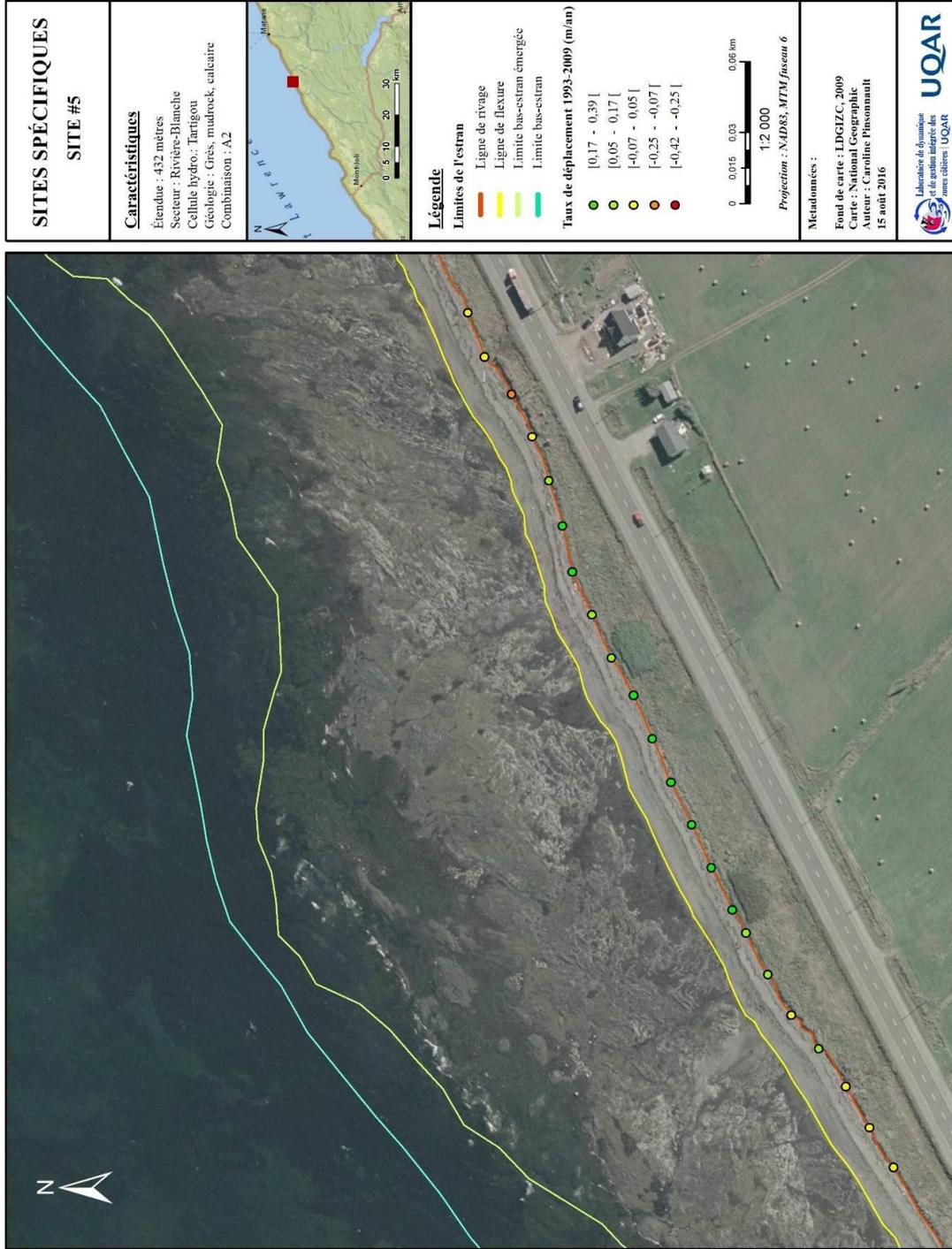
Cartes de localisation des sites spécifiques. Les classes de la symbologie des points sont définies en fonction de taux de déplacement de la côte mesuré sur l'ensemble des profils tracés.

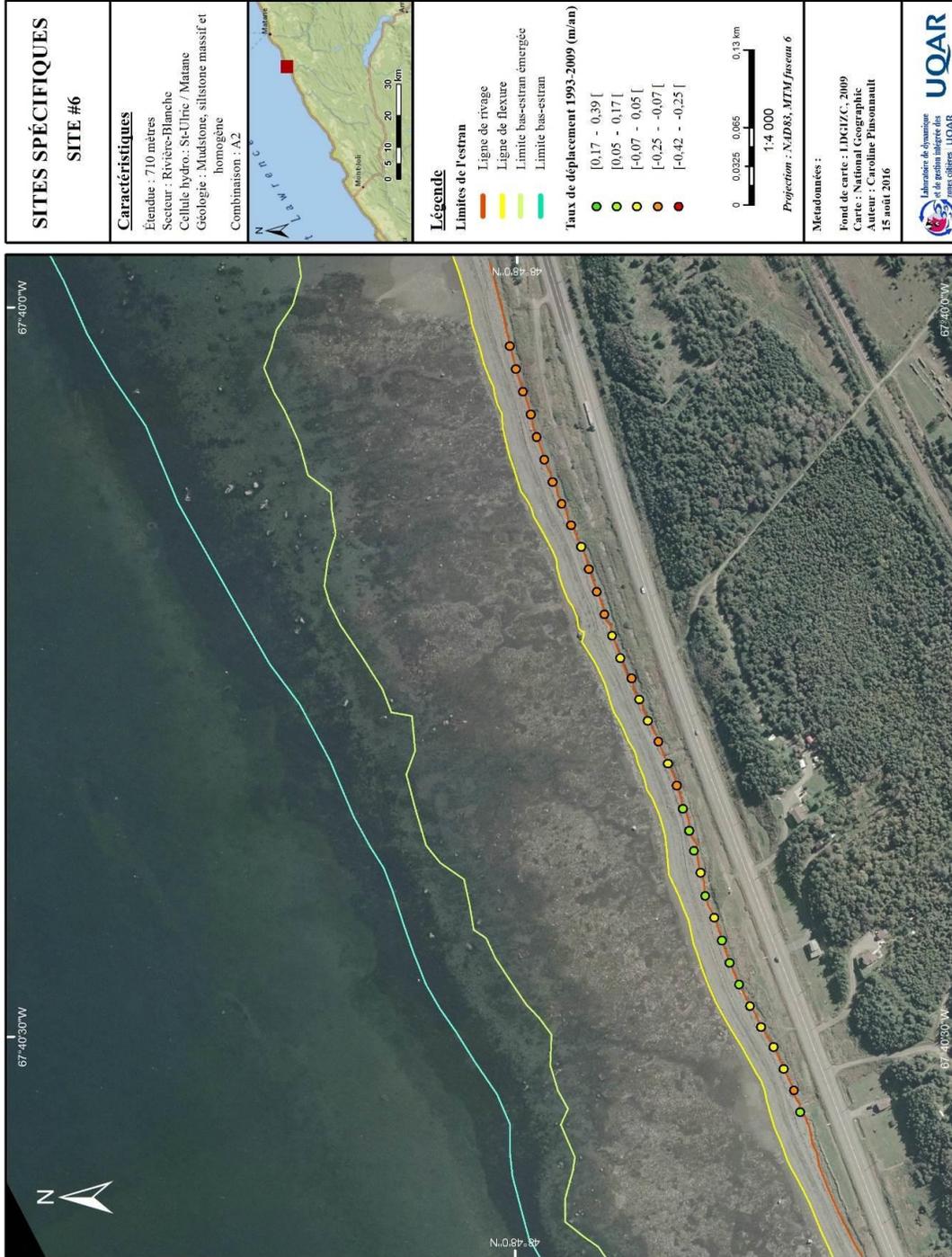


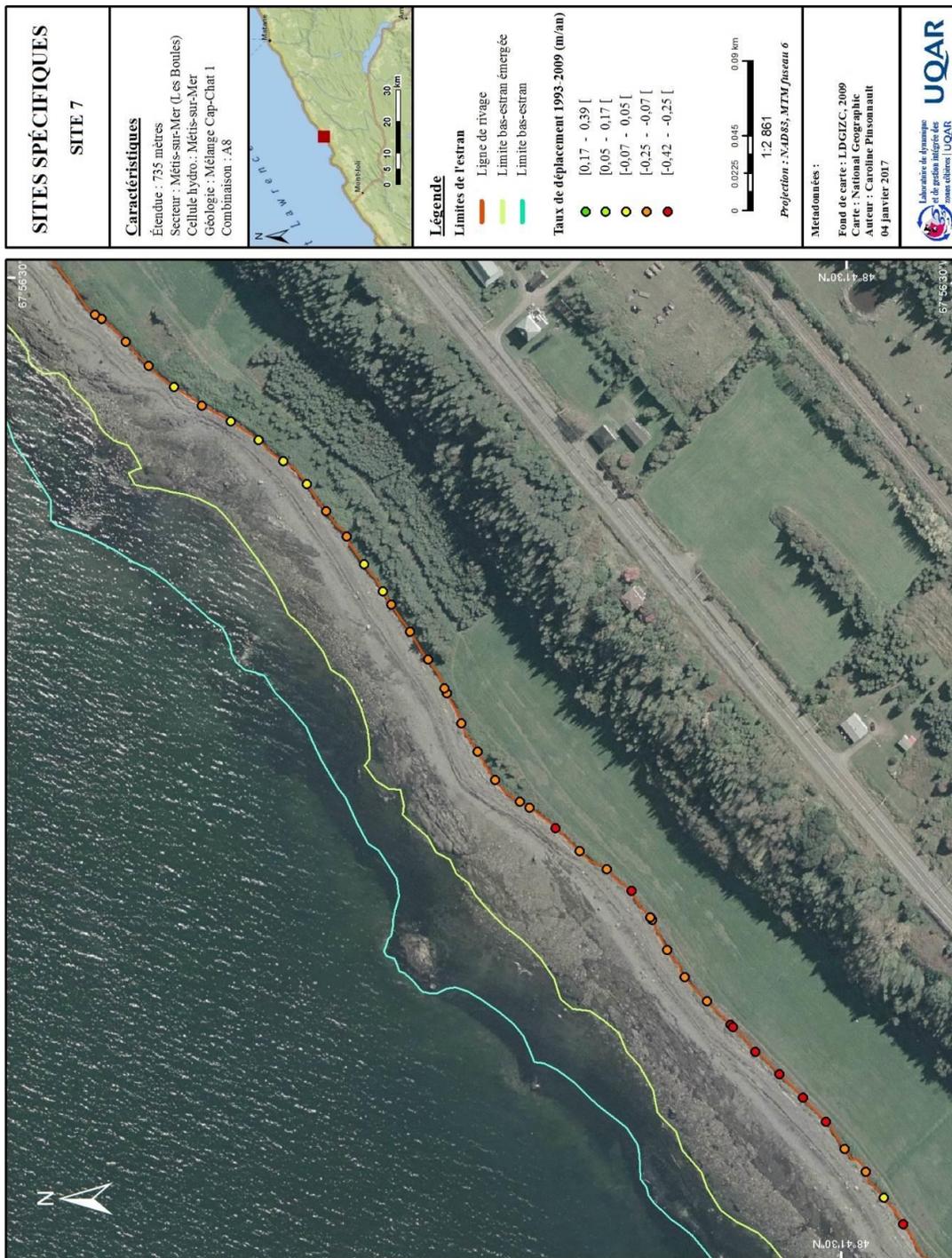


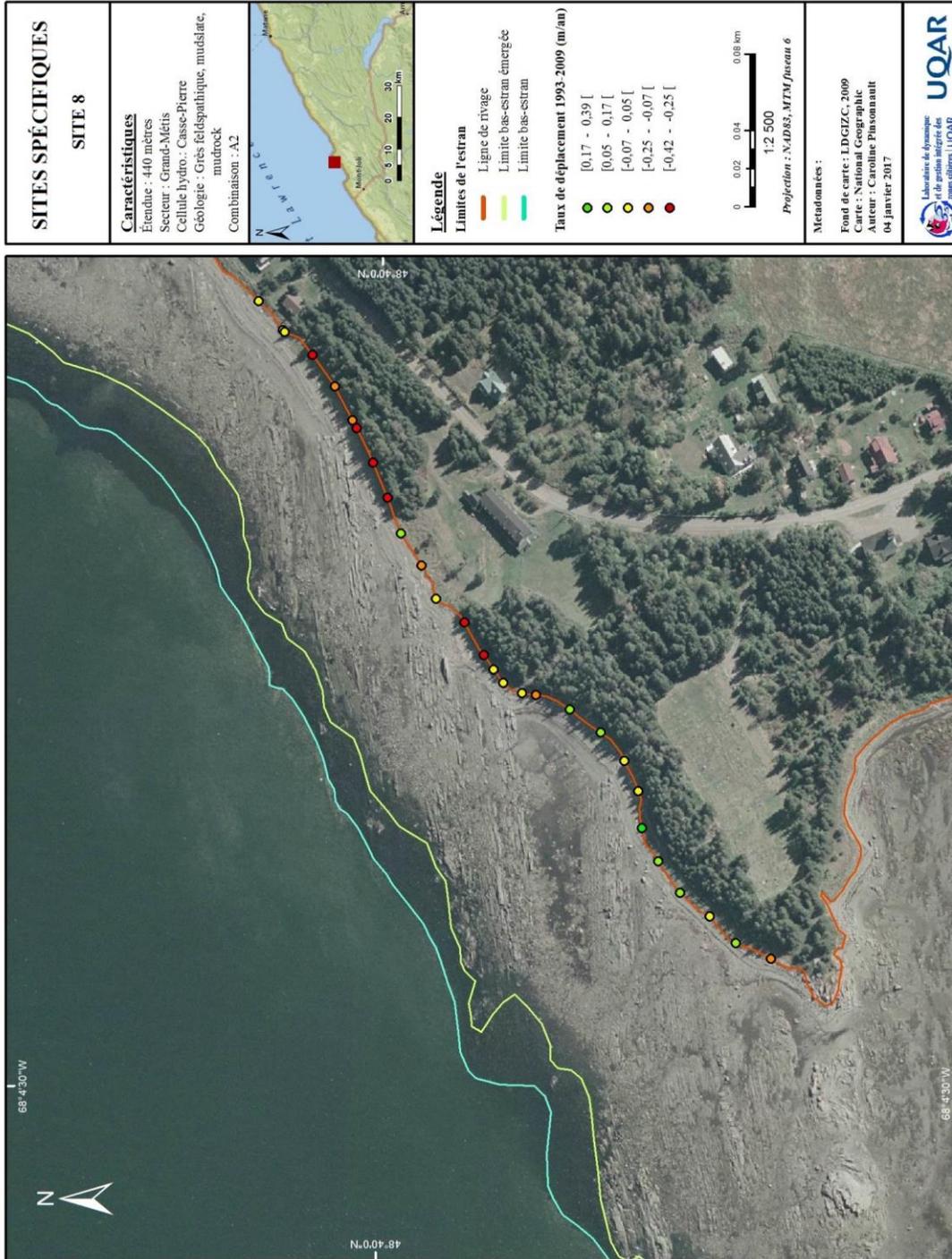


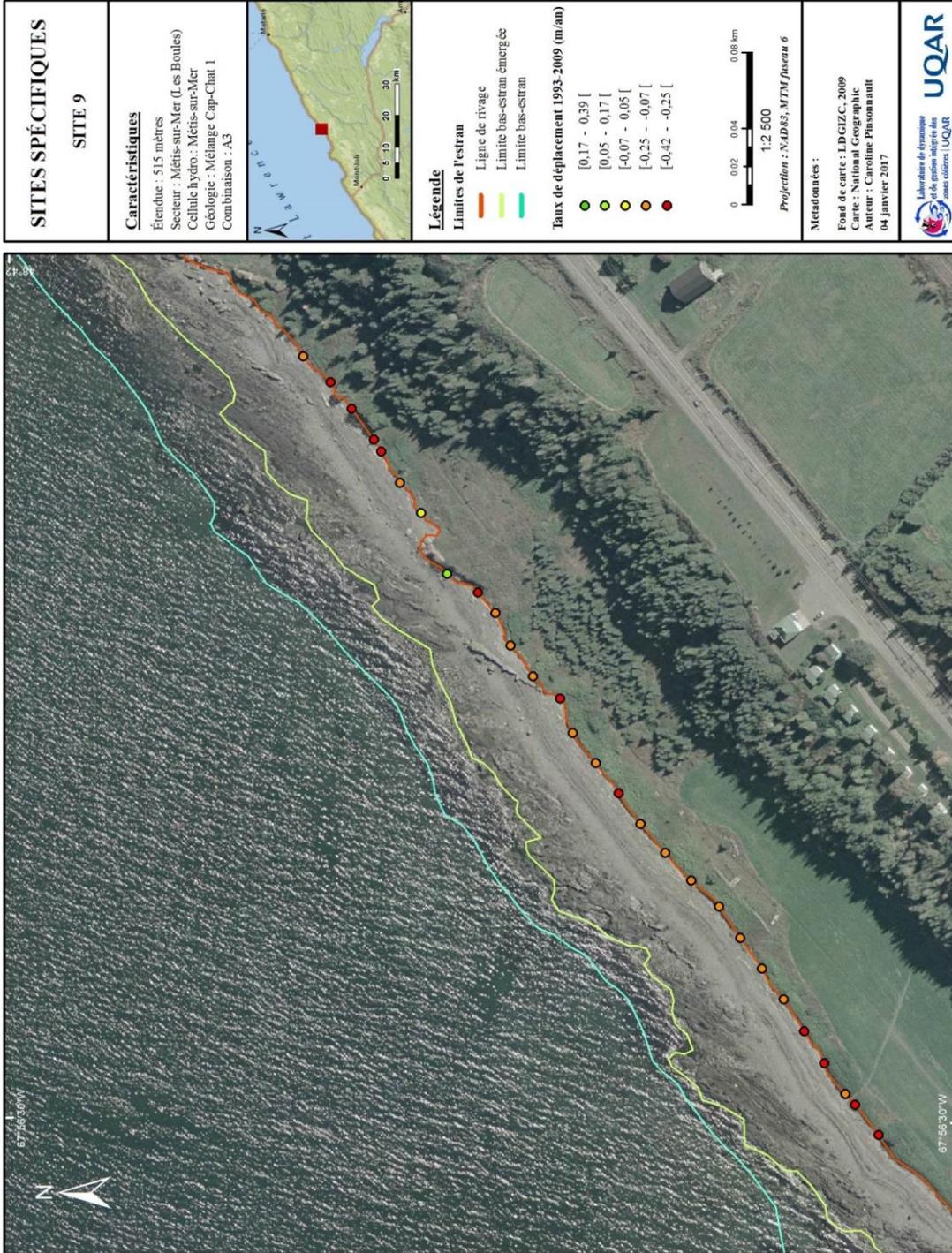












SITES SPÉCIFIQUES

SITE 9

Caractéristiques

Étendue : 515 mètres
 Secteur : Métis-sur-Mer (Les Boutes)
 Cellule hydro. : Métis-sur-Mer
 Géologie : Mélange Cap-Chat 1
 Combinaison : A3



Légende

Limites de l'estran

- Ligne de rivage
- Limite bas-estran émergée
- Limite bas-estran

Taux de déplacement 1993-2009 (m/an)

- [0,17 - 0,39 [
- [0,05 - 0,17 [
- [-0,07 - 0,05 [
- [-0,25 - -0,07 [
- [-0,42 - -0,25 [

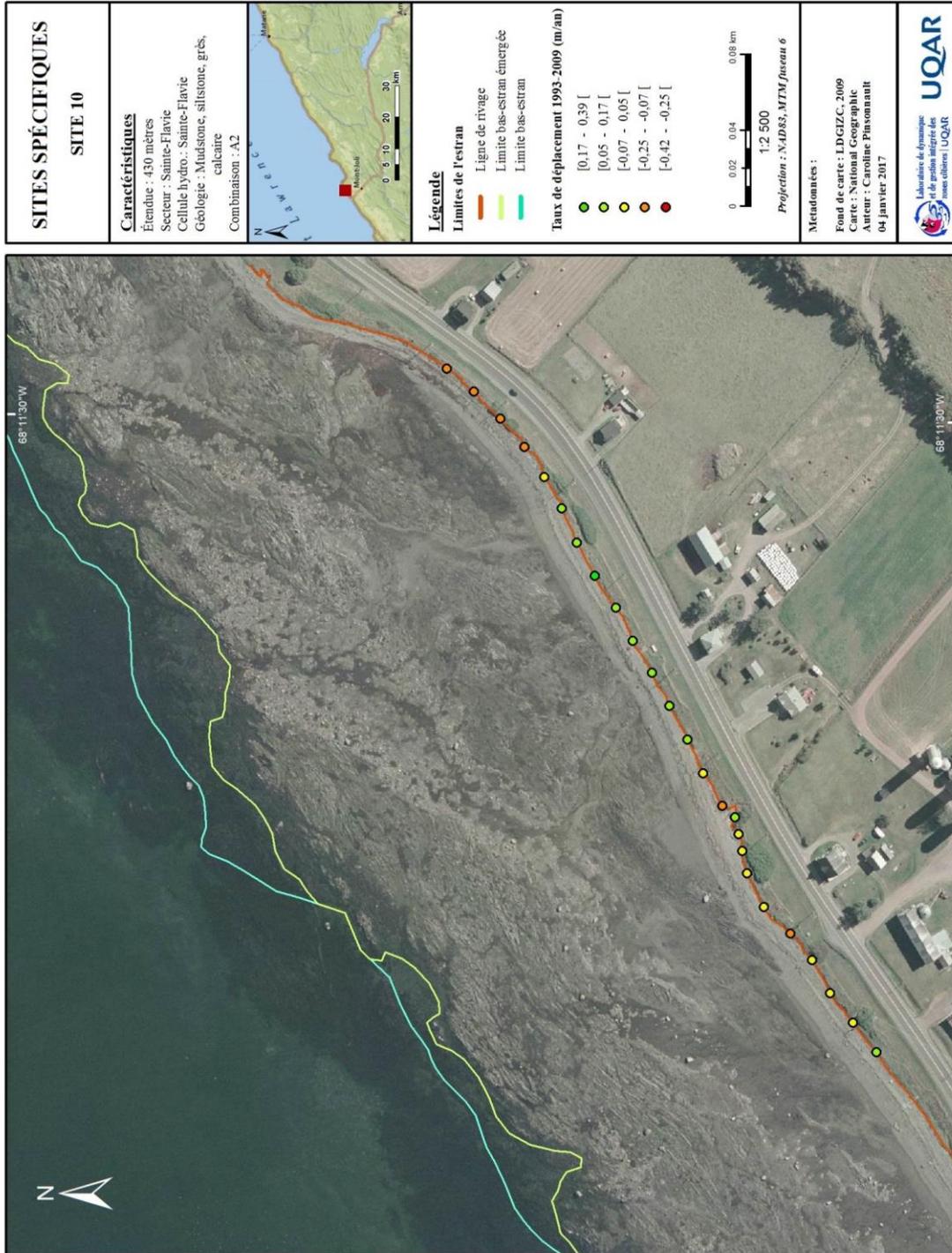


Projection : NAD83, MTM fuseau 6

Métadonnées :

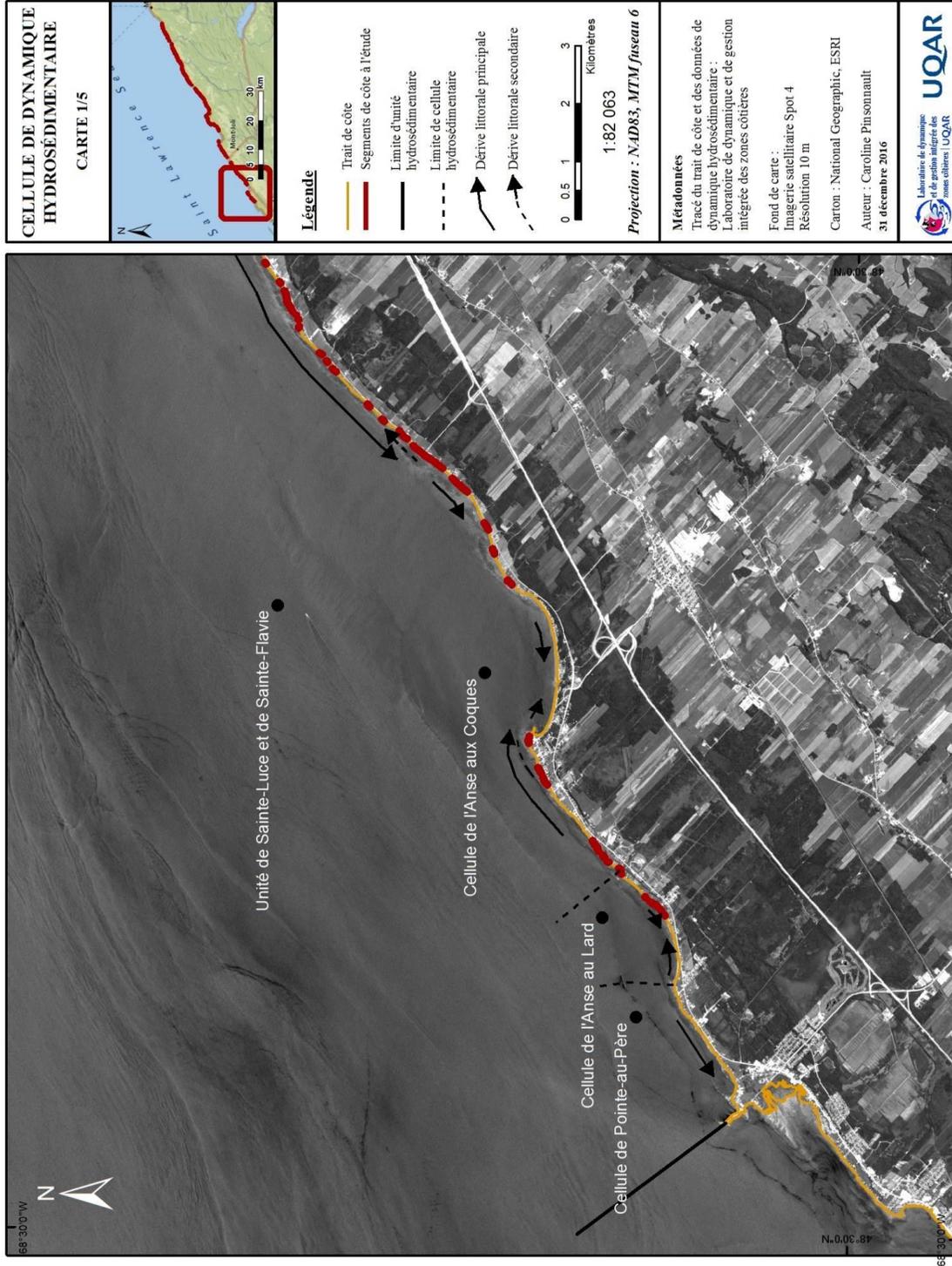
Fond de carte : LDGIZC, 2009
 Carte : National Geographic
 Auteur : Carolline Pinsonnault
 04 janvier 2017

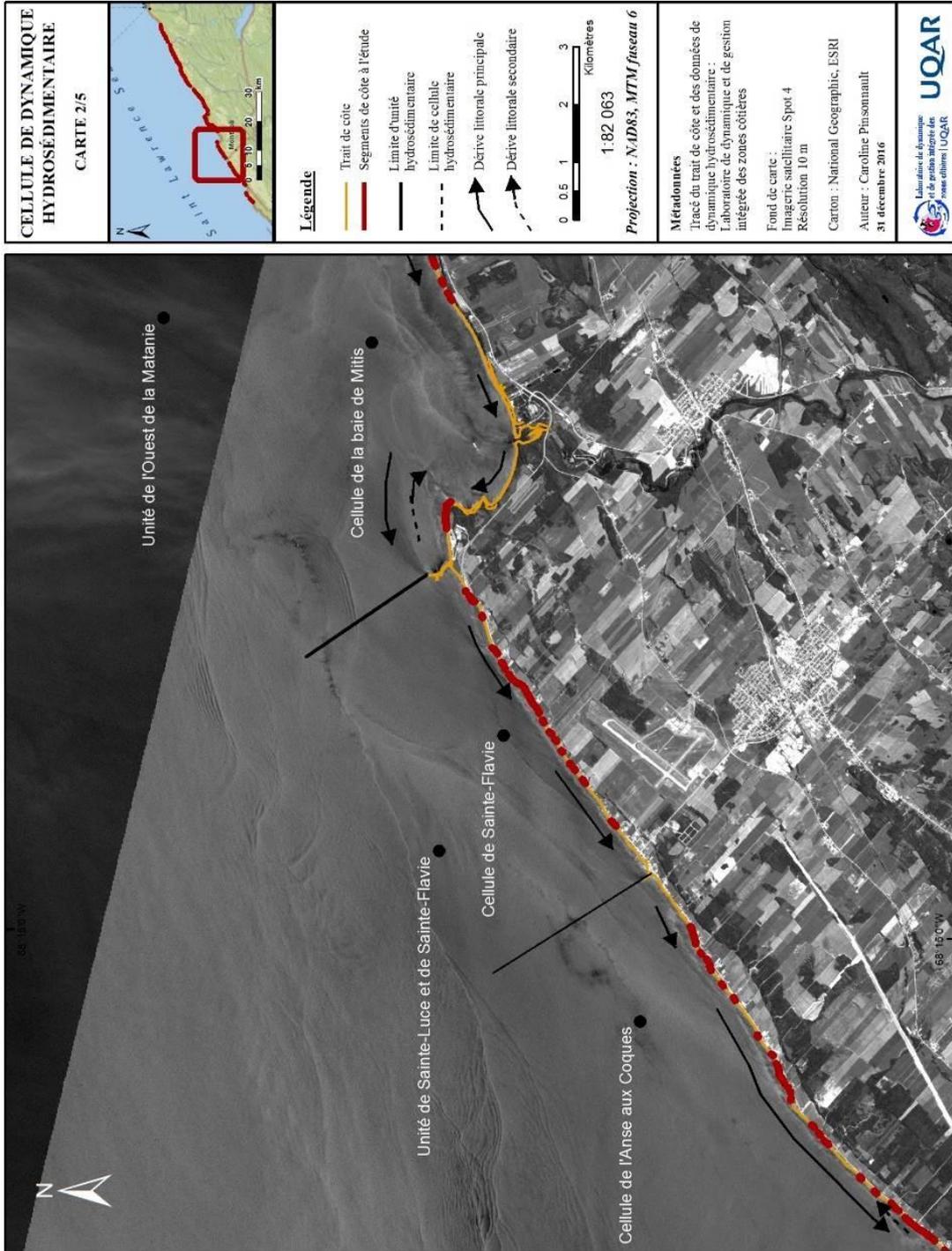




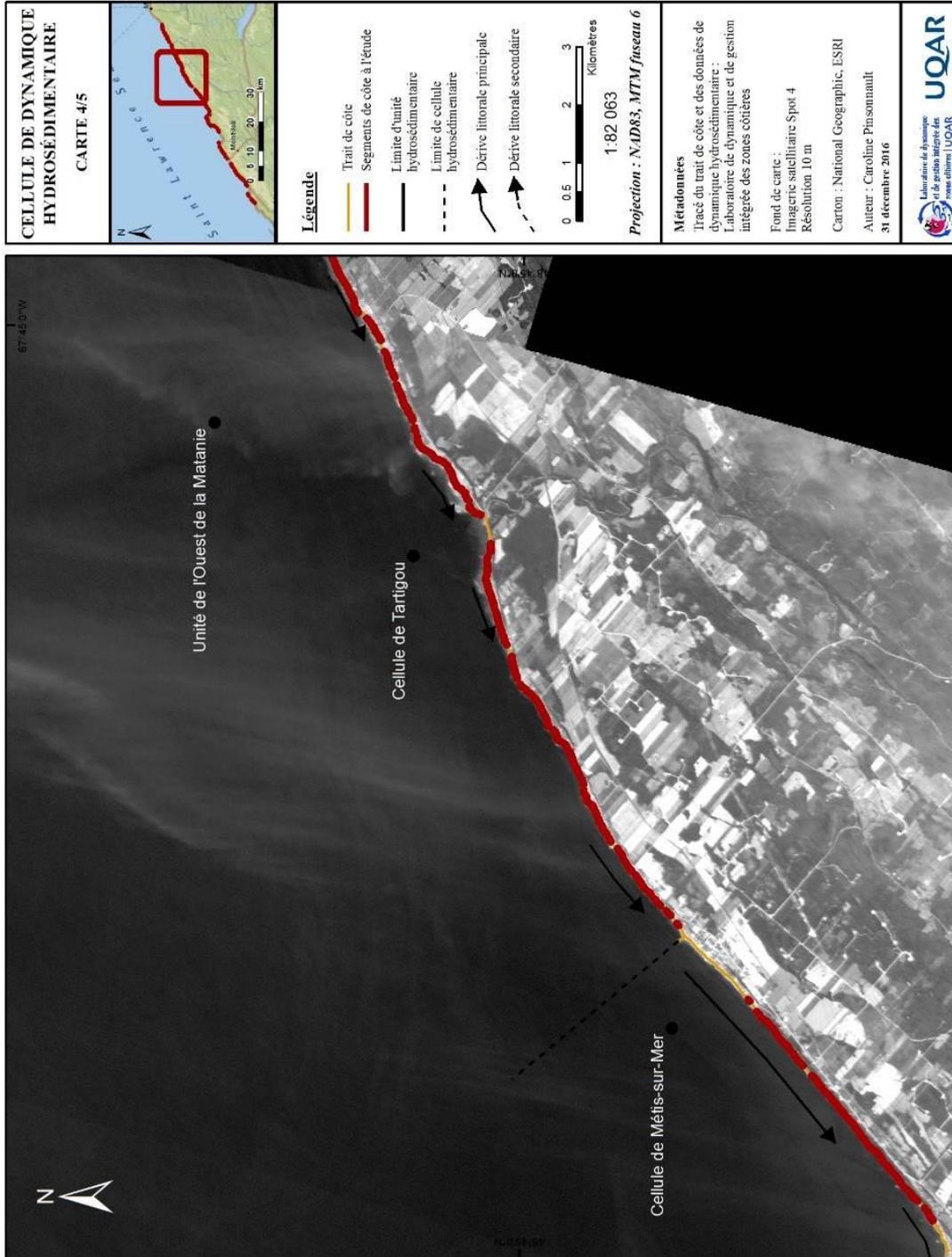
ANNEXE II

Carte de présentation des cellules hydrosédimentaires et de la dérive littorale le long du site
à l'étude.











ANNEXE III

Cette annexe comprend une carte de localisation des sites de validation sur le terrain et un tableau décrivant les sites de validation terrain.

Localisation et description des secteurs couverts lors des campagnes de terrain.

Secteur	Date (jj-mm-aaaa)	Étendue du site (m)	Nbr de transects	Longueur moy. des transects (m)	Profond. max. (m)	Type de côte	Type d'estran	Granulométrie moyenne
Rocher-Blanc	18-09-2013	550 m	4	384 m	-2,53 m	Falaise roch.	Type 7 et 8	Haut-estran : sableux avec gravier ; Bas-estran : silto-sableux avec blocs
Pointe-au-Père	25-07-2013	442 m	3	194 m	-3,21 m	Terr. de plage	Type 2	Affleurement rocheux avec cordon littoral en haut-estran
Sainte-Luce	25-07-2013	1925 m	6	253 m	-3,30 m	Terr. de plage	Type 2 et 3	Haut-estran : sable et gravier ; Bas-estran : rocheux avec placage et dallage de blocs
Sainte-Flavie Ouest, relevé 1	24-07-2013	630 m	5	187 m	-2,39 m	Terr. de plage	Type 2 et 3	Dallage de blocs avec affleurement rocheux
Ste-Flavie Ouest, relevé 2 (2 sites)	26-07-2013	300 m et 170 m	3 et 2	215 m et 388 m	-3,39 m	Terr. de plage	Type 8	Sable moyen avec blocs et affleurement rocheux
Ste-Flavie Est	21-09-2013	620 m	6	212 m	-2,86 m	Terr. de plage	Type 2	Affleurement rocheux avec cordon littoral en haut-estran
Rivière Mitis (Grand-Métis)	20-09-2013	925 m	4	995 m	-2,29 m	Falaise meuble	Type 7	Haut-estran : gravier ; Bas-estran : affleurement rocheux avec sable moyen
Baie-des-Sables Est	21-09-2013	500 m	5	220 m	-2,44 m	Terr. de plage	Type 2 et 3	Haut-estran : sable et gravier ; Bas-estran : affleurement rocheux avec placage sédimentaire
Saint-Ulric	22-09-2013	575 m	6	167 m	-2,60 m	Terr. de plage	Type 2	Haut-estran : sable grossier et gravier ; Bas-estran : affleurement rocheux avec placage sédimentaire

ANNEXE IV

Cette annexe comprend trois (3) illustrations d'exemple d'application du degré d'anthropisation.

- Exemple d'un site où le degré d'anthropisation est élevé, plus de 50 % de la côte sur 1 km de côte linéaire. Puisque les segments de côte naturels sont plus petits que 200 m, ils sont tous classés dans le degré « anthropisé »

- Exemple d'un site où moins de 50% de la côte est artificialisée sur 1 km de côte linéaire. Puisque certains segments font plus de 200 m, on applique le 1^{er} degré sur 50 m autour des segments de côte artificialisés, et au-delà, les segments de côte sont classés dans le degré « naturel ».

- Exemple d'un secteur où le degré d'anthropisation est variable. Pour faire la transition entre le secteur artificialisé à plus de 50 % et celui artificialisé à moins de 50 %, les 100 m de côte naturelle linéaire situés entre les deux secteurs sont classés comme un segment « semi-anthropisé ». Ensuite, les mêmes critères de segmentation des exemples A et B s'appliquent.



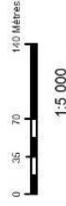
ZONAGE DU DEGRÉ D'ANTHROPISE

Exemple d'un secteur anthropisé (Sainte-Flavie)



Légende

- Côte naturelle
- Côte artificialisée
- Profils en zone anthropisée



1:5 000

Projection : NAD83, MTM fuseau 6

Métadonnées :

Tracé du trait de côte : LDGIZC
 Fond de carte : Orthophoto de 2009 du MNR,
 fourni par le LDGIZC
 Fond de canaux : National Geographic
 Auteur : Caroline Pilonneau
 03 janvier 2017





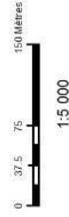
ZONAGE DU DEGRÉ D'ANTHROPISATION

Exemple d'un secteur semi-anthropisé (Métis-sur-Mer)



Légende

- Côte naturelle
- Côte artificialisée
- Profils en zone semi-anthropisée
- Profils en zone naturelle



Projection : NAD83, MTM fuseau 6

Métadonnées :

Titre du trait de côte : LDGIZC
 Fond de carte : Orthophoto de 2009 du MNRB, fournie par le LDGIZC
 Fond de canevas : National Geographic
 Auteur : Caroline Plissonault
 03 janvier 2017



ANNEXE V

Cette annexe contient un tableau des critères de distinction des types d'estran

Caractéristique / Type	1	2	3	4	5	6	7	8
À dominante rocheuse	x	x	x					
À dominante sableuse				x	x			
À dominante vaseuse						x	x	
Aucune catégorie dominante								x
Affleurement rocheux >50%	x	x	x					
Affleurement rocheux <50%					x		x	x
Aucun affleurement rocheux				x		x	x*	x*
Présence cordon littoral		x	x	x	x		x	x
Présence batture argileuse / bas-estran vaseux			x			x	x	x*
Présence dallage de blocs		x*	x*		x			x
Présence placage de sédiments ou remplissage sédimentaire							x	x
Présence marelles et buttes végétalisées						x	x	x
Présence végétation sur l'estran						x	x	

* = présence possible mais non obligatoire pour faire partie de la classe.

ANNEXE VI

Cette annexe contient des données de caractérisation descriptives et morphométriques des estrans pour chaque ensemble de groupes de données

DONNEES DE CARACTERISATION PAR DEGRE D'ANTHROPISATION

Caractéristiques qualitatives majoritaires des estrans par degré d'anthropisation

Degré d'anthrop.	Effectif	Type d'estran	Géologie	D_d	D_p	A_{pfr}	L_{HE} moyenne (m)	D_a
Naturelle	1264	Type 2 et 8	Mélange Cap-Chat 1	0 à 1	2	2 à 3	entre 15 et 30 m	Faible à élevée
Semi-anthropisée	458	Type 8 et 2	Mélange Cap-Chat 2	0 à 1	2 à 3	0 à 3	entre 15 et 30 m	Moyenne à élevée
Anthropisée	454	Type 3 et 8	Groupe Trois-Pistoles	0 à 1	2	0 à 1	entre 15 et 30 m	Faible à moyenne

Moyenne de chaque caractéristique quantitative des estrans par degré d'anthropisation

Zone	$Orient_{cote}$	$Orient_{pfr}$	L_{tot} (m)	L_{em} (m)	H_{LR} (m)	S_{moy} (°)	R_{std} (m)	R_{rms} (m)
Naturelle	NNW - NW	N - NW	198,1	145,3	3,10	2,32	0,97	1,11
Semi-anthropisée	NNW - NW	NNW - NW	216,1	152,3	3,14	2,23	0,96	1,09
Anthropisée	NNW - NW	NW - NNW - WNW	250,3	185,5	3,09	1,78	0,91	0,99

DONNEES DE CARACTERISATION PAR TYPE DE COTE

Caractéristiques qualitatives majoritaires des estrans selon le type de côte.

Type de côte	Effectif	Principaux types d'estran	Géologie principale	D_d	D_p	A_{pfr}	L_{HE} moyenne (m)	D_a
Terrasse de plage	1999	Type 2 et 8	Mélange Cap-Chat 1 et 2	0 à 1	2 à 3	0 à 3	entre 15 et 30 m	Moyenne à élevée
Falaise meuble	42	Type 2 et 5	Formation des Landes	0 à 2	1 à 3	0 à 3	entre 15 et 30 m	Élevée à très élevée
Falaise rocheuse	37	Type 8 et 2	Groupe Trois-Pistoles et Mélange Cap-Chat 1	0 à 1	1 à 2	1 à 4	moins de 5 m à 15 m	Aucune à moyenne
Rocheuse sans falaise	91	Type 3 et 8	Formation Tourelle 1 et Mélange Cap-Chat 1	0 à 1	0 à 2	1 à 4	moins de 5 m à 30 m	Aucune à moyenne

Résultat moyen des caractéristiques quantitatives des estrans selon le type de côte.

Type de côte	$Orient_{cote}$	$Orient_{pfr}$	L_{tot} (m)	L_{em} (m)	H_{LR} (m)	$S_{moy}(\text{°})$	R_{std} (m)	R_{rms} (m)
Terrasse de plage	NNW - NW	NW - NNW	213,4	157,2	3,07	2,12	0,95	1,07
Falaise meuble	N	N - NNW	257,2	151,4	3,23	1,86	0,97	1,02
Falaise rocheuse	NW	NW	193,0	106,6	3,70	3,79	1,04	1,16
Rocheuse sans falaise	NNW - NW	NW - NNW	189,6	127,4	3,65	3,29	1,13	1,32

DONNEES DE CARACTERISATION PAR COMBINAISON SUR L'ENSEMBLE DU SITE D'ETUDE

Caractéristiques qualitatives dominant la majorité des estrans selon la combinaison pour tout le site d'étude.

Combin.	Effectif	Cellule hydro. principale	Géologie principale	D_d	D_p	A_{pfr}	L_{HE} moyenne (m)	D_a
A1	47	Casse-Pierre et Tartigou	Tourelle 1	0 à 1	2	3 à 4	entre 15 et 20 m	Faible à moyenne
A2	714	Tartigou et Baie de Mitis	Formation des Landes et Mélange Cap-Chat 1	0 à 1	1 à 2	2 à 4	entre 15 et 30 m	Moyenne à élevée
A3	395	Tartigou et Anse aux Coques	Mélange Cap-Chat 1	0 à 1	1 à 2	2 à 3	entre 20 et 30 m	Élevée
A4	33	St-Ulric - Matane-sur-Mer	Mélange Cap-Chat 2 et Formation Orignal 2	0	0	0	plus de 30 m	Élevée
A5	96	Tartigou et St-Ulric - Matane-sur-Mer	Mélange Cap-Chat 2	0 à 1	1	0 à 1	entre 20 m et plus de 30 m	Faible à moyenne
A7	79	Baie de Mitis	Formation Rivière-Ouelle	0 à 1	1 à 3	0 à 1	entre 15 et 30 m	Faible à élevée
A8	638	Tartigou et St-Ulric - Matane-sur-Mer	Groupe Trois-Pistoles et Mélange Cap-Chat 2	1 à 3	2 à 3	0 à 2	entre 15 et 30 m	Moyenne à élevée

Résultat moyen des caractéristiques quantitatives des estrans selon la combinaison pour tout le site d'étude.

COMBIN.	<i>Orient_{cote}</i>	<i>Orient_{pfr}</i>	<i>L_{tot}(m)</i>	<i>L_{em}(m)</i>	<i>H_{LR}(m)</i>	<i>S_{moy}(°)</i>	<i>R_{std}(m)</i>	<i>R_{rms}(m)</i>
A1	NNW - NW	N - NNW	161,2	152,0	3,27	2,15	1,03	1,17
A2	NNW - NW	NW - N	171,8	129,0	3,13	2,36	0,97	1,13
A3	NNW - NW	NNW - NW	177,8	137,3	3,12	2,35	0,99	1,14
A4	NNW - N	Aucune	223,5	110,7	3,34	2,63	1,27	1,37
A5	NNW - NW	NW - NNW	212,4	111,7	3,20	2,50	1,10	1,16
A7	NNW - NW	NNW - NW	441,7	340,5	2,86	0,90	0,68	0,74
A8	NW - NNW	NW - WNW	256,8	188,0	2,95	1,78	0,88	0,97

**DONNEES DE CARACTERISATION PAR COMBINAISON POUR LE SECTEUR BAIE-DES-SABLES
– MATANE**

Caractéristiques qualitatives dominant la majorité des estrans selon la combinaison entre Baie-des-Sables et Matane.

Combin.	Effectif	Cellule hydro. principale	Géologie principale	<i>D_d</i>	<i>D_p</i>	<i>A_{pfr}</i>	<i>L_{HE}</i> moyenne (m)	<i>D_a</i>
A2	371	Tartigou	Formation des Landes et Mélange Cap-Chat 2	0 à 1	1 à 2	2 à 3	entre 15 et 30 m	Élevée à très élevée
A3	197	Tartigou	Mélange Cap-Chat 1 et 2	0 à 2	2	2 à 3	entre 20 et 30 m	Élevée
A5	69	St-Ulric - Matane-sur-Mer	Mélange Cap-Chat 2	0 à 1	1 à 3	0 à 2	entre 20 et 30 m	Élevée
A8	276	St-Ulric - Matane-sur-Mer	Mélange Cap-Chat 2 et Formation Orignal 2	1 à 3	3	0 à 2	Entre 15 et 30 m	Moyenne à élevée

Résultat moyen des caractéristiques quantitatives des estrans selon la combinaison pour tout le site d'étude.

COMBIN.	$Orient_{cote}$	$Orient_{pfr}$	L_{lot} (m)	L_{em} (m)	H_{LR} (m)	S_{moy} (°)	R_{std} (m)	R_{rms} (m)
A2	NNW	N - NNW	158	117	3,06	2,36	1,02	1,12
A3	NNW	NNW - N	173	131	3,06	2,23	1,01	1,10
A5	NNW - NW	NW - NNW	181	101	3,17	2,66	1,10	0,15
A8	NNW - NW	N - NNW	275	204	2,82	1,31	0,82	0,88

DONNEES DE CARACTERISATION PAR CELLULE HYDROSEDIMENTAIRE

Caractéristiques qualitatives majoritaires sur les estrans selon la cellule hydrosédimentaire.

Cellule hydro.	Effectif	Principaux types d'estran	Géologie principale	D_d	D_p	A_{pfr}	L_{HE} moyenne (m)	D_a
Anse-aux-Coques	253	Type 8 et 2	Groupe Trois-Pistoles	1 à 3	1 à 3	0 à 4	entre 15 et 30 m	Faible à moyenne
Anse-au-Lard	29	Type 8 et 7	Groupe Trois-Pistoles	2	3	1	entre 10 et 15 m	Moyenne
Baie de Mitis	208	Type 2 et 7	Formation Rivière-Ouelle	0 à 1	2	0 à 4	entre 10 et 30 m	Faible à élevée
Casse-Pierre	130	Type 8 et 1	Formation Tourelle 1	0 à 1	2	1 à 4	entre 15 et 20 m	Faible
Métis-sur-Mer	390	Type 8 et 2	Mélange Cap-Chat1	1 à 2	1 à 2	1 à 3	Entre 20 et 30 m	Moyenne à élevée
Ste-Flavie	125	Type 2 et 3	Formation Orignal 1	0 à 1	2	3 à 4	entre 15 et 20 m	Élevée

Cellule hydro.	Effectif	Principaux types d'estran	Géologie principale	D_d	D_p	A_{pfr}	L_{HE} moyenne (m)	D_a
St-Ulric / Matane-sur-Mer	251	Type 8, 5 et 4	Formation Orignal 2 et Mélange Cap-Chat 2	0 à 3	3	0 à 1	entre 20 et 30 m	Élevée
Tartigou	790	Type 2, 3 et 8	Mélange Cap-Chat 1 et 2 et Formation des Landes	0 à 2	1 à 3	2 à 3	entre 15 et 30 m	Faible à élevée

Résultat moyen des caractéristiques quantitatives des estrans selon la cellule de dynamique hydrosédimentaire.

Cellule hydro.	$Orient_{cote}$	$Orient_{pfr}$	L_{tot} (m)	L_{em} (m)	H_{LR} (m)	S_{moy} (°)	R_{std} (m)	R_{rms} (m)
Anse-aux-Coques	NW - NNW	NW - WNW	289,0	217,2	3,01	1,35	0,85	0,89
Anse-au-Lard	NW	NW - NNW	211,2	129,9	2,99	1,75	0,96	0,97
Baie de Mitis	NW - NNW	N - NNW	327,4	246,8	3,13	1,53	0,80	0,90
Casse-Pierre	NW - NNW	N	226,8	219,5	3,28	2,04	1,00	1,18
Métis-sur-Mer	NW - NNW	NW - WNW	138,1	74,8	3,31	3,69	1,05	1,37
Ste-Flavie	NNW - NW	NW - NNW	186,8	161,3	3,14	1,63	0,88	0,97
St-Ulric / Matane-sur-Mer	NNW	NW	237,9	164,6	2,96	1,71	0,93	0,99
Tartigou	NNW - NW	NNW - N	189,1	136,7	3,04	2,18	1,00	1,08

DONNEES DE CARACTERISATION POUR L'ENSEMBLE DES SITES SPECIFIQUES

Caractéristiques qualitatives dominant la majorité des estrans selon le site spécifique.

Site	Effectif	Cellule hydro.	Type d'estran	Géologie		D_d	D_p	A_{pfr}	D_a
#1	30	Tartigou	Type 3	Mélange Chat 1	Cap-	0 à 2	2 à 3	2	Moyenne
#2	47	Tartigou	Type 2	Formation Landes	des	0 à 1	1 à 2	2 à 3	Élevée à très élevée
#3	27	Tartigou	Type 2	Formation Landes	des	0	1 à 2	3	Élevée
#4	46	Tartigou	Type 8	Mélange Chat 2	Cap-	1 à 2	3	1 à 2	Élevée
#5	22	Tartigou	Type 2	Mélange Chat 2	Cap-	0	1 à 2	3	Élevée à très élevée
#6	36	St-Ulric Matane	- Type 8	Formation Orignal 2		3	3	0	Élevée
#7	43	Métis-sur-Mer	Type 8	Mélange Chat 1	Cap-	1 à 3	2	1 à 2	Moyenne
#8	28	Baie de Mitis	Type 2	Formation Tourelle 1		0 à 1	1	3	Faible à moyenne
#9	28	Métis-sur-Mer	Type 3	Mélange Chat 1	Cap-	1	1	2	Faible à moyenne
#10	25	Ste-Flavie	Type 2	Formation Orignal 1		0 à 1	2	3	Élevée

Résultat moyen des caractéristiques quantitatives des estrans selon le site spécifique.

Site	$L_{tot}(m)$	$L_{em}(m)$	$L_{HE}(m)$	$L_{BE}(m)$	$H_{LR}(m)$	$H_{flex}(m)$	$S_{moy}(^{\circ})$	$S_{HE}(^{\circ})$	$S_{BE}(^{\circ})$	$R_{std}(m)$	$R_{rms}(m)$
#1	127,7	86,4	26,3	60,0	3,44	0,69	3,06	6,00	1,72	1,26	1,34
#2	137,7	99,1	19,6	79,5	3,23	0,94	2,64	6,70	1,53	1,10	1,14
#3	158,0	113,4	16,0	97,4	2,87	0,86	2,00	7,18	1,20	0,83	0,95
#4	365,3	262,6	14,8	247,7	2,74	1,04	0,96	6,61	0,52	0,75	0,81
#5	174,1	140,6	16,1	124,5	2,70	0,76	1,78	6,86	0,89	0,86	0,96
#6	262,7	194,4	23,9	170,5	2,81	0,12	1,21	6,46	0,43	0,80	0,85
#7	99,0	59,1	NA	NA	3,24	NA	3,91	NA	NA	1,09	1,38
#8	117,2	94,8	NA	NA	3,48	NA	2,92	NA	NA	1,06	1,25
#9	76,0	50,8	NA	NA	3,26	NA	4,24	NA	NA	1,06	1,50
#10	219,7	197,5	NA	NA	2,98	NA	1,21	NA	NA	0,75	0,85

DONNEES DE CARACTERISATION POUR LE SITE SPECIFIQUE 1.

Statistiques descriptives des caractéristiques morphométriques de l'estran du site 1.

	$L_{tot}(m)$	$L_{em}(m)$	$L_{HE}(m)$	$H_{LR}(m)$	$H_{flex}(m)$	$S_{moy}(^{\circ})$	$S_{HE}(^{\circ})$	$S_{BE}(^{\circ})$	$R_{std}(m)$	$R_{rms}(m)$
Min	111,6	78,8	18,8	3,09	0,30	2,58	4,97	1,16	1,09	1,12
Moy.	127,7	86,4	26,3	3,44	0,69	3,06	6,00	1,72	1,26	1,34
Max	146,9	100,4	31,7	3,75	1,36	3,42	7,61	2,27	1,41	1,52
Écart-type	8,2	6,0	3,5	0,18	0,29	0,19	0,68	0,30	0,07	0,12

DONNEES DE CARACTERISATION POUR LE SITE SPECIFIQUE 2.

Statistiques descriptives des caractéristiques morphométriques de l'estran du site 2.

	L_{tot} (m)	L_{em} (m)	L_{HE} (m)	H_{LR} (m)	H_{flex} (m)	S_{moy} (°)	S_{HE} (°)	S_{BE} (°)	R_{std} (m)	R_{rms} (m)
Min	118	70	9	2,62	0,18	1,56	4,04	0,87	0,85	0,87
Moy.	138	99	20	3,22	0,94	2,64	6,70	1,53	1,10	1,14
Max	163	150	29	4,09	2,47	3,63	10,27	2,61	1,79	1,45
Écart-type	12	18	5	0,31	0,51	0,45	1,12	0,39	0,12	0,14

DONNEES DE CARACTERISATION POUR LE SITE SPECIFIQUE 3.

Statistiques descriptives des caractéristiques morphométriques de l'estran du site 3.

	L_{tot} (m)	L_{em} (m)	L_{HE} (m)	H_{LR} (m)	H_{flex} (m)	S_{moy} (°)	S_{HE} (°)	S_{BE} (°)	R_{std} (m)	R_{rms} (m)
Min	139,7	96,2	11,2	2,52	0,38	0,78	4,80	0,73	0,64	0,77
Moy.	158,0	113,4	16,0	2,87	0,86	2,00	7,18	1,20	0,83	0,95
Max	178,2	147,7	22,3	3,23	1,35	2,41	8,74	1,72	1,03	1,09
Écart-type	8,4	12,5	3,1	0,21	0,29	0,34	0,97	0,28	0,08	0,06

DONNEES DE CARACTERISATION POUR LE SITE SPECIFIQUE 4.

Statistiques descriptives des caractéristiques morphométriques de l'estran du site 4.

	L_{tot} (m)	L_{em} (m)	L_{HE} (m)	H_{LR} (m)	H_{flex} (m)	S_{moy} (°)	S_{HE} (°)	S_{BE} (°)	R_{std} (m)	R_{rms} (m)
Min	267,3	190,2	6,7	2,29	0,54	0,58	3,8	0,34	0,47	0,56
Moy.	365,3	262,6	14,8	2,74	1,04	0,97	6,61	0,52	0,75	0,81
Max	442,8	364,7	24,4	3,32	2,24	4,06	9,29	0,74	1,11	1,89
Écart-type	46,8	44,9	3,4	0,23	0,35	0,52	1,15	0,12	0,12	0,2

DONNEES DE CARACTERISATION POUR LE SITE SPECIFIQUE 5.

Statistiques descriptives des caractéristiques morphométriques de l'estran du site 5.

	L_{tot} (m)	L_{em} (m)	L_{HE} (m)	H_{LR} (m)	H_{flex} (m)	S_{moy} (°)	S_{HE} (°)	S_{BE} (°)	R_{std} (m)	R_{rms} (m)
Min	156,0	111,5	13,3	2,46	0,54	1,29	5,41	0,60	0,50	0,82
Moy.	174,1	140,6	16,1	2,70	0,76	1,78	6,86	0,89	0,86	0,96
Max	194,1	174,4	19,0	3,23	1,14	4,93	9,13	1,22	0,98	2,33
Écart-type	11,2	19,9	1,23	0,18	0,15	0,73	0,77	0,16	0,09	0,31

DONNEES DE CARACTERISATION POUR LE SITE SPECIFIQUE 6.

Statistiques descriptives des caractéristiques morphométriques de l'estran du site 6.

	L_{tot} (m)	L_{em} (m)	L_{HE} (m)	H_{LR} (m)	H_{flex} (m)	S_{moy} (°)	S_{HE} (°)	S_{BE} (°)	R_{std} (m)	R_{rms} (m)
Min	223,9	163,5	20,8	2,63	0,26	1,05	5,73	0,31	0,71	0,73
Moy.	262,7	194,4	23,9	2,81	0,12	1,21	6,46	0,43	0,8	0,85
Max	311	215,2	27,3	3,24	0,49	1,42	7,44	0,62	0,86	0,98
Écart-type	11,2	19,9	1,2	0,18	0,15	0,73	0,77	0,16	0,09	0,31

DONNEES DE CARACTERISATION POUR LE SITE SPECIFIQUE 7.

Statistiques descriptives des caractéristiques morphométriques de l'estran du site 7.

	L_{tot} (m)	L_{em} (m)	H_{LR} (m)	S_{moy} (°)	R_{std} (m)	R_{rms} (m)
Min	80,1	42,7	2,66	3,03	0,79	1,06
Moy.	99	59,1	3,24	3,91	1,09	1,38
Max	127,4	81,8	4,83	4,83	1,2	1,66
Écart-type	11,7	10	0,29	0,53	0,1	0,15

DONNEES DE CARACTERISATION POUR LE SITE SPECIFIQUE 8.

Statistiques descriptives des caractéristiques morphométriques de l'estran du site 8.

	$L_{tot}(m)$	$L_{em}(m)$	$H_{LR}(m)$	$S_{moy}(^{\circ})$	$R_{std}(m)$	$R_{rms}(m)$
Min	94,4	71,5	2,63	1,5	0,76	0,99
Moy.	117,2	94,8	3,48	2,92	1,06	1,25
Max	175,5	166	4,56	4,05	1,3	1,58
Écart-type	21,9	22,4	0,47	0,76	0,17	0,19

DONNEES DE CARACTERISATION POUR LE SITE SPECIFIQUE 9.

Statistiques descriptives des caractéristiques morphométriques de l'estran du site 9.

	$L_{tot}(m)$	$L_{em}(m)$	$H_{LR}(m)$	$S_{moy}(^{\circ})$	$R_{std}(m)$	$R_{rms}(m)$
Min	65,3	39,6	2,44	3,37	0,83	0,96
Moy.	76	50,8	3,26	4,24	1,06	1,5
Max	94,9	66,9	3,57	5,25	1,24	1,75
Écart-type	8,46	6,14	0,15	0,51	0,07	0,1

DONNEES DE CARACTERISATION POUR LE SITE SPECIFIQUE 10.

Statistiques descriptives des caractéristiques morphométriques de l'estran du site 10.

	$L_{tot}(m)$	$L_{em}(m)$	$H_{LR}(m)$	$S_{moy}(^{\circ})$	$R_{std}(m)$	$R_{rms}(m)$
Min	189,4	164,3	2,71	0,99	0,68	0,73
Moy.	219,7	197,5	2,98	1,21	0,75	0,85
Max	246,5	224	3,35	1,38	0,9	0,99
Écart-type	20,9	16,7	0,19	0,12	0,07	0,07

ANNEXE VII

Cette annexe contient une description des histogrammes de fréquence pour les variables liées aux taux de déplacement et aux caractéristiques morphométriques de l'ensemble du site d'étude.

Description des distributions de données illustrées à la figure 5.1.

VARIABLE	DISTRIBUTION DES DONNEES	FIGURE ASSOCIEE
Taux annuel 1963-2012	Distribution normale avec une classe extrême ayant un effectif < 10.	5.4 a)
Déplacement total 1963-2012	Distribution relativement normale avec léger décalage vers la gauche.	5.4 b)
Taux annuel 1993-2009	Distribution relativement normale.	5.4 c)
Déplacement total 1993-2009	Distribution relativement normale.	5.4 d)
Taux annuel 2009-2012	Distribution relativement normale.	5.4 e)
Déplacement total 2009-2012	Distribution relativement normale.	5.4 f)

Description des distributions de données illustrées à la figure 5.2.

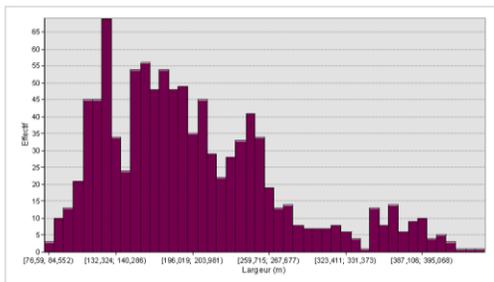
VARIABLE	DISTRIBUTION DES DONNEES	FIGURE ASSOCIEE
Largeur totale	Distribution fortement asymétrique (positive) avec un long palier pour les largeurs d'estran entre 350 m et 400 m.	5.1 a)
Largeur émergée	Distribution fortement asymétrique (positive) avec un long palier pour les largeurs d'estran entre 250 m et 350 m.	5.1 b)
Altitude de la ligne de rivage	Distribution faiblement asymétrique (positive). C'est la seule variable se rapprochant le plus d'une distribution normale.	5.1 c)
Pente moyenne de l'estran	Distribution fortement asymétrique (positive) semblant montrer un 2 ^e mode, ou du moins un important palier, pour les pentes autour de 3°.	5.1 d)
Indice de rugosité : sinuosité	Distribution fortement asymétrique (positive)	5.1 e)
Indice de rugosité : variance	Distribution asymétrique (positive)	5.1 f)
Indice de rugosité : écart-type	Distribution faiblement asymétrique (positive) comportant un deuxième palier pour les valeurs autour de 1,30.	5.1 g)
Indice de rugosité : moyenne quadratique	Distribution asymétrique (positive) comportant un palier pour les valeurs entre 1,20 et 1,50.	5.1 h)

Description des distributions de données pour les variables morphométriques de l'estran sur le secteur de Baie-des-Sables – Matane.

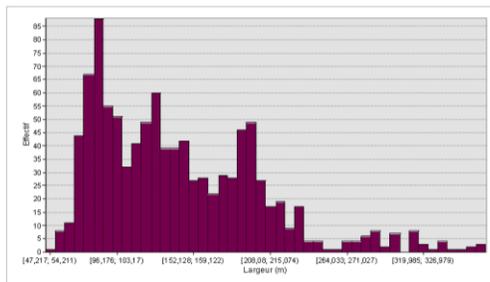
VARIABLE	DISTRIBUTION DES DONNEES	FIGURE ASSOCIEE
Largeur totale	Distribution asymétrique (positive) avec un long palier pour les largeurs d'estran entre 270m et 400m.	5.2 a)
Largeur émergée	Distribution fortement asymétrique (positive) avec un long palier pour les largeurs d'estran entre 250m et 350m.	5.2 b)
Altitude de la ligne de rivage	Distribution faiblement asymétrique (positive), centrée.	5.2 c)
Pente moyenne de l'estran	Distribution asymétrique (positive) semblant montrer un 2 ^e mode pour les pentes autour de 3°.	5.2 d)
Indice de rugosité : sinuosité	Distribution fortement asymétrique (positive)	5.2 e)
Indice de rugosité : variance	Distribution asymétrique (positive) semblant montrer un 2 ^e mode pour les valeurs autour de 1,50	5.2 f)
Indice de rugosité : écart-type	Distribution asymétrique (positive) semblant montrer un 2 ^e mode pour les valeurs autour de 1,25.	5.2 g)
Indice de rugosité : moyenne quadratique	Distribution asymétrique (positive).	5.2 h)
Largeur du haut-estran	Distribution quasi-normale.	5.3 a)
Largeur émergée du bas-estran	Distribution asymétrique (positive).	5.3 b)
Pente du haut-estran	Distribution normale.	5.3 c)
Pente du bas-estran émergée	Distribution asymétrique (positive).	5.3 d)
Altitude de la ligne de flexure	Distribution normale.	5.3 e)
Altitude de la limite inférieure du bas-estran émergée	Distribution normale.	5.3 f)

Histogramme de fréquences pour chacune des caractéristiques morphométriques communes à tout le site d'étude, calculées sur le secteur Baie-des-Sables – Matane

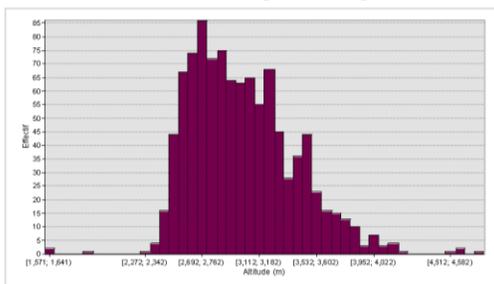
a) Largeur totale de l'estran



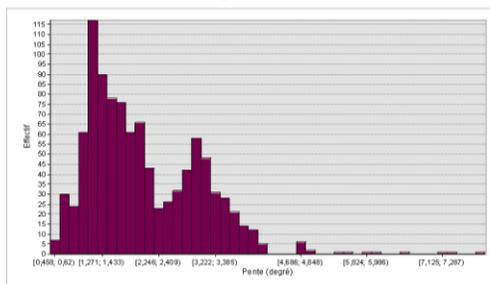
b) Largeur émergée de l'estran



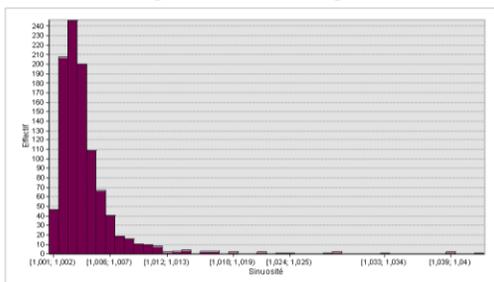
c) Altitude de la ligne de rivage



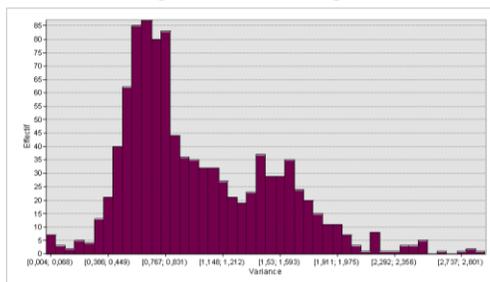
d) Pente moyenne de l'estran



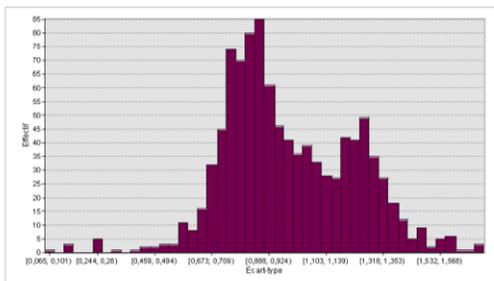
e) Indice de rugosité : Sinuosité du profil d'estran



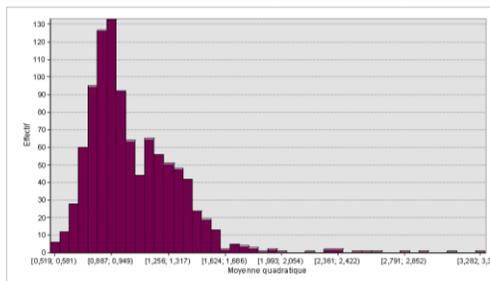
f) Indice de rugosité : Variance du profil d'estran



g) Indice de rugosité : Écart-type du profil d'estran

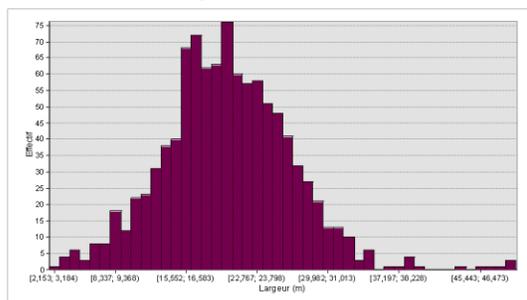


h) Indice de rugosité : Moyenne quadratique du profil d'estran

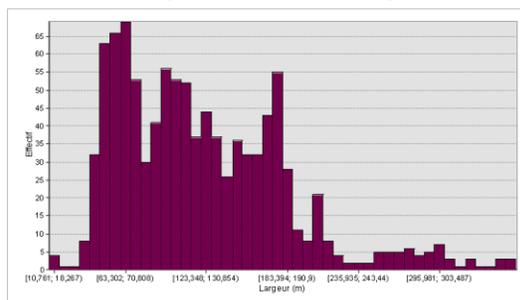


Histogramme de fréquences pour chacune des caractéristiques morphométriques supplémentaires, calculées sur le secteur Baie-des-Sables – Matane.

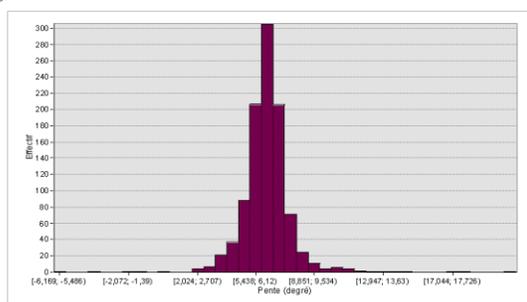
a) Largeur du haut-estran



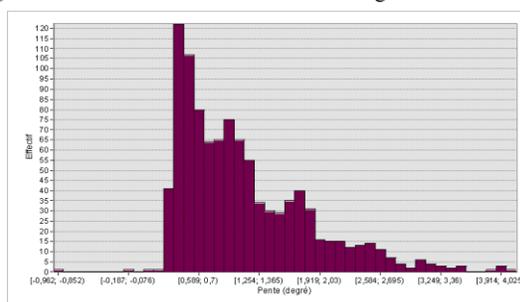
b) Largeur du bas-estran émergé



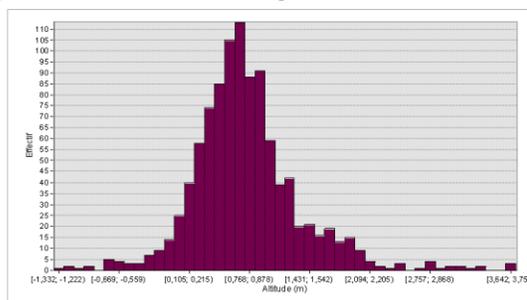
c) Pente du haut-estran



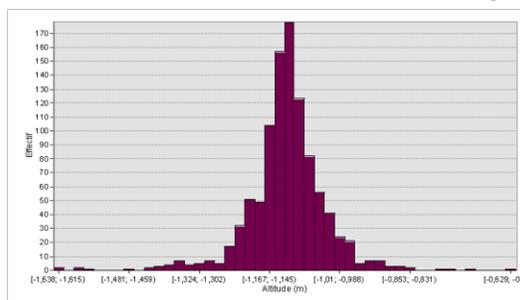
d) Pente du bas-estran émergé



e) Altitude de la ligne de flexure



f) Altitude de la limite inférieure du bas estran émergé



ANNEXE VIII

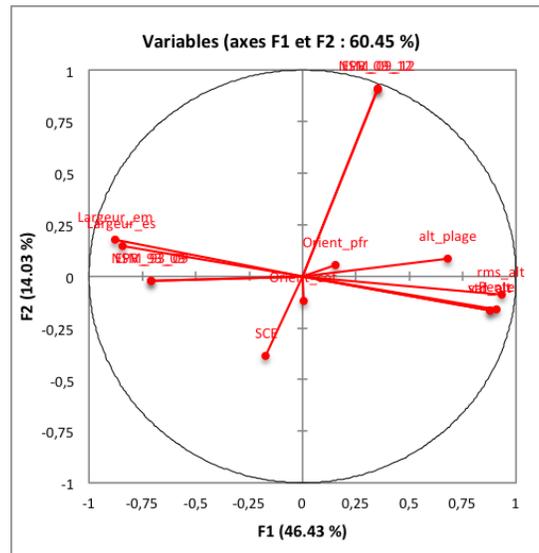
Cette annexe contient quelques exemples de résultats des ACP.

EXEMPLE DES RESULTATS DES ACP A L'ECHELLE GLOBALE – EXEMPLE DE DEUX TYPES DE COTE

COTE A TERRASSE DE PLAGE

Contribution des variables (%) pour les trois premiers facteurs expliquant la variabilité des données pour les côtes à terrasse de plage sur l'ensemble du site.

	F1	F2	F3
<i>Orient_{pfr}</i>	0,008	45,125	12,649
<i>L_{tot}</i>	13,236	0,297	0,003
<i>Orient_{cote}</i>	0,002	2,914	80,164
<i>EPR₁₉₉₃₋₂₀₀₉</i>	7,671	0,716	1,371
<i>EPR₂₀₀₉₋₂₀₁₂</i>	1,509	2,433	2,190
<i>S_{moy}</i>	14,468	1,069	0,021
<i>H_{LR}</i>	7,062	0,149	0,000
<i>R_{std}</i>	13,243	0,002	1,314
<i>R_{var}</i>	13,243	0,002	1,314
<i>R_{rms}</i>	15,086	0,151	0,032
<i>L_{em}</i>	13,493	1,343	0,144
<i>Orient_{diff}</i>	0,981	45,798	0,798

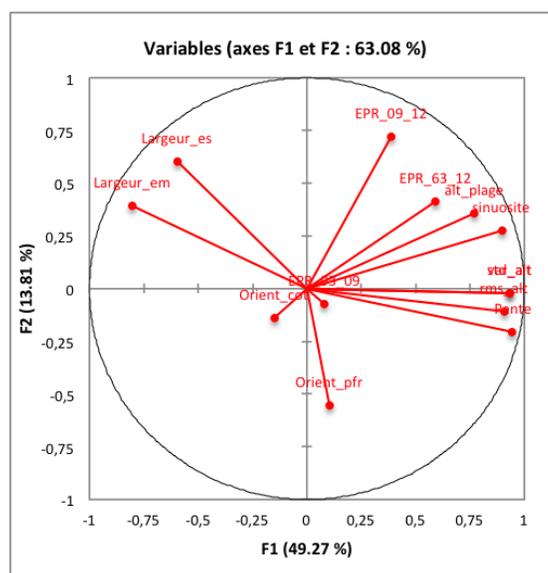


Résultats de l'ACP pour les estrans au-devant d'une côte à terrasse de plage

COTE A FALAISE ROCHEUSE

Contribution des variables (%) pour les trois premiers facteurs expliquant la variabilité des données pour les côtes à falaise rocheuse sur l'ensemble du site.

	F1	F2	F3
<i>Orient_{pfr}</i>	0,167	17,077	8,143
<i>L_{tot}</i>	5,539	20,167	7,931
<i>Orient_{cote}</i>	0,348	1,043	34,507
<i>EPR₁₉₆₃₋₂₀₁₂</i>	5,487	9,559	2,681
<i>EPR₁₉₉₃₋₂₀₀₉</i>	0,104	0,301	26,402
<i>EPR₂₀₀₉₋₂₀₁₂</i>	2,359	28,875	10,771
<i>S_{moy}</i>	13,958	2,335	0,112
<i>H_{LR}</i>	9,268	7,131	3,287
<i>R_{sin}</i>	12,548	4,268	0,253
<i>R_{std}</i>	13,631	0,028	2,612
<i>R_{var}</i>	13,631	0,028	2,612
<i>R_{rms}</i>	12,865	0,648	0,026
<i>L_{em}</i>	10,094	8,539	0,663



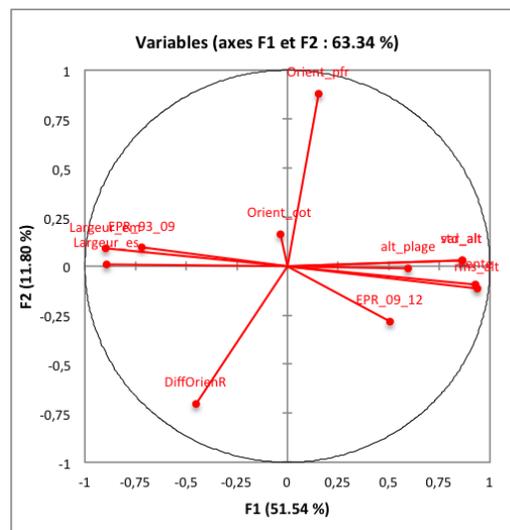
Résultats de l'ACP pour les estrans au-devant d'une falaise rocheuse

EXEMPLE DES RESULTATS DES ACP A L'ECHELLE GLOBALE – EXEMPLE DE DEUX COMBINAISONS

COMBINAISON A2

Contribution des variables (%) pour les trois premiers facteurs expliquant la variabilité des données pour la combinaison A2 sur l'ensemble du site

	F1	F2	F3
<i>Orient_{ptr}</i>	0,384	54,682	0,111
<i>L_{tot}</i>	12,852	0,007	0,721
<i>Orient_{cote}</i>	0,021	1,928	79,880
<i>EPR₁₉₉₃₋₂₀₀₉</i>	8,307	0,627	0,411
<i>EPR₂₀₀₉₋₂₀₁₂</i>	4,139	5,590	0,021
<i>S_{moy}</i>	13,901	0,638	0,281
<i>H_{LR}</i>	5,777	0,010	0,306
<i>R_{std}</i>	12,017	0,069	4,494
<i>R_{var}</i>	12,017	0,069	4,494
<i>R_{rms}</i>	14,206	0,910	0,001
<i>L_{em}</i>	13,086	0,562	0,774
<i>Orient_{diff}</i>	3,292	34,907	8,506

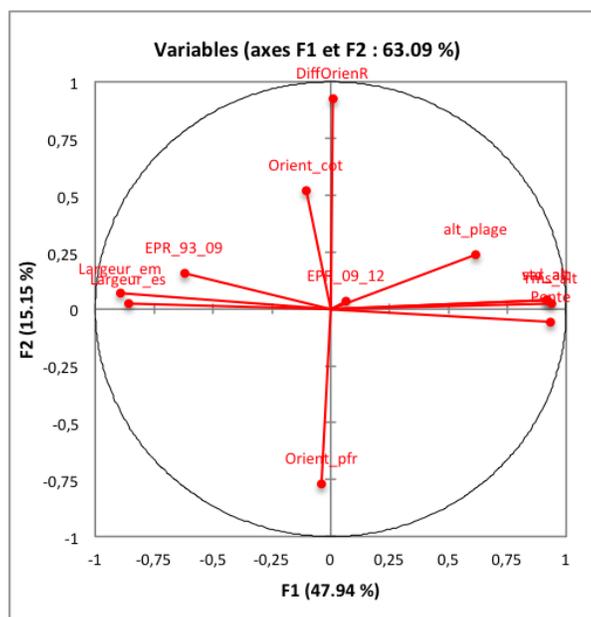


Résultats de l'ACP pour les estrans de combinaison A2 à l'échelle globale

COMBINAISON A8

Contribution des variables (%) pour les trois premiers facteurs expliquant la variabilité des données pour la combinaison A8 sur l'ensemble du site

	F1	F2	F3
<i>Orient_{pfr}</i>	0,024	32,351	13,816
<i>L_{tot}</i>	12,775	0,029	0,267
<i>Orient_{cote}</i>	0,183	15,028	21,720
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	6,720	1,410	6,719
EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	0,077	0,070	45,839
<i>S_{moy}</i>	15,119	0,172	0,842
<i>H_{LR}</i>	6,588	3,151	8,492
<i>R_{std}</i>	14,622	0,098	0,126
<i>R_{var}</i>	14,622	0,098	0,126
<i>R_{rms}</i>	15,367	0,034	0,001
<i>L_{em}</i>	13,902	0,267	1,987
<i>Orient_{diff}</i>	0,001	47,292	0,067

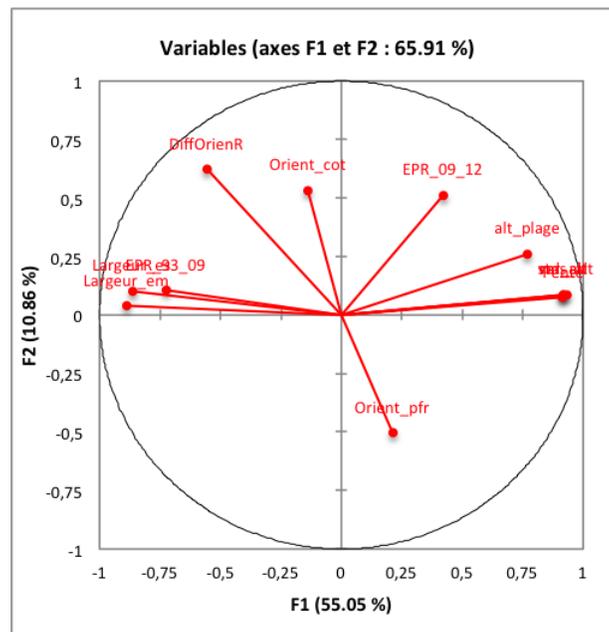


Résultats de l'ACP pour les estrans de combinaison A8 à l'échelle globale.

EXEMPLE DES RESULTATS DES ACP A L'ECHELLE REGIONALE

COMBINAISON A2

	F1	F2	F3
<i>Orient_{pfr}</i>	0,679	19,580	49,303
<i>L_{tot}</i>	11,325	0,821	0,040
<i>Orient_{cote}</i>	0,280	21,606	45,311
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	7,958	0,842	0,199
EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	2,674	20,002	2,647
<i>S_{moy}</i>	12,691	0,420	0,030
<i>H_{LR}</i>	8,982	5,206	0,184
<i>R_{std}</i>	12,760	0,578	0,615
<i>R_{var}</i>	12,760	0,578	0,615
<i>R_{rms}</i>	13,215	0,597	0,015
<i>L_{em}</i>	11,991	0,114	0,030
<i>Orient_{diff}</i>	4,684	29,655	1,011



Résultats de l'ACP pour les estrans de combinaison A2 à l'échelle globale.

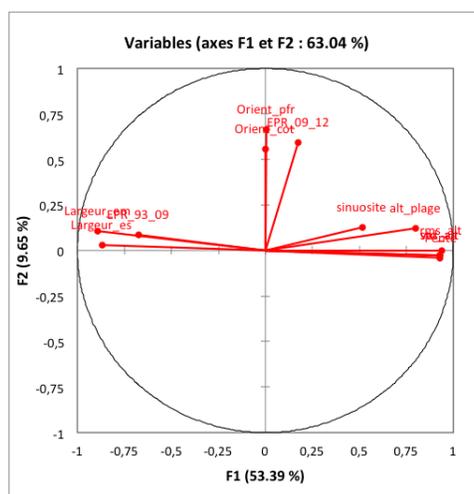
RESULTATS DES ACP A L'ECHELLE SECTORIELLE – EXEMPLE DE DEUX CELLULES

HYDROSEDIMENTAIRES

TARTIGOU

Contribution des variables (%) pour les trois premiers facteurs expliquant la variabilité des données pour la cellule de Tartigou.

	F1	F2	F3
<i>Orient_{pfr}</i>	0,000	38,086	0,151
<i>L_{tot}</i>	11,798	0,068	3,584
<i>Orient_{cote}</i>	0,000	26,944	52,085
<i>EPR₁₉₉₃₋₂₀₀₉</i>	7,147	0,634	4,703
<i>EPR₂₀₀₉₋₂₀₁₂</i>	0,479	30,309	35,428
<i>S_{moy}</i>	13,507	0,137	0,955
<i>H_{LR}</i>	9,936	1,296	0,990
<i>R_{sin}</i>	4,129	1,385	0,471
<i>R_{std}</i>	13,436	0,068	0,007
<i>R_{var}</i>	13,436	0,068	0,007
<i>R_{rms}</i>	13,690	0,000	0,021
<i>L_{em}</i>	12,442	1,003	1,598

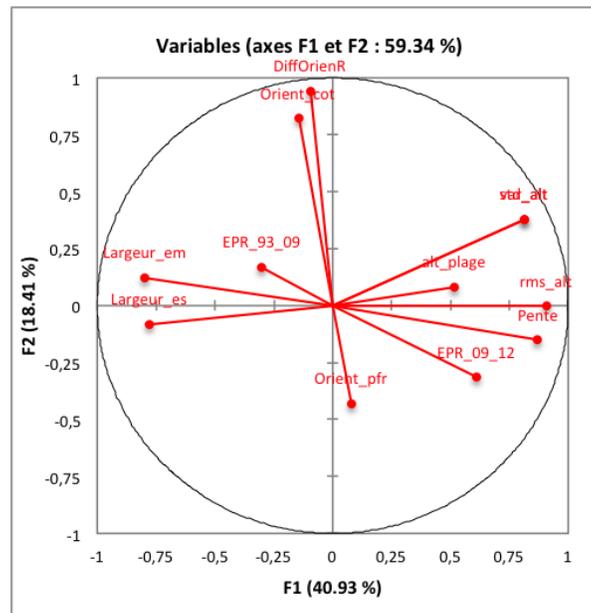


Résultats de l'ACP pour les estrans de la cellule de Tartigou.

SAINTE-FLAVIE

Contribution des variables (%) pour les trois premiers facteurs expliquant la variabilité des données pour la cellule de Sainte-Flavie.

	F1	F2	F3
<i>Orient_{pfr}</i>	0,128	8,455	9,547
<i>L_{tot}</i>	12,288	0,311	17,155
<i>Orient_{cote}</i>	0,428	30,512	2,082
<i>EPR₁₉₉₃₋₂₀₀₉</i>	1,833	1,277	26,734
<i>EPR₂₀₀₉₋₂₀₁₂</i>	7,605	4,502	2,440
<i>S_{moy}</i>	15,385	1,039	0,543
<i>H_{LR}</i>	5,406	0,293	30,781
<i>R_{std}</i>	13,487	6,432	0,105
<i>R_{var}</i>	13,487	6,432	0,105
<i>R_{rms}</i>	16,799	0,000	0,378
<i>L_{em}</i>	12,970	0,699	9,983
<i>Orient_{diff}</i>	0,183	40,048	0,146



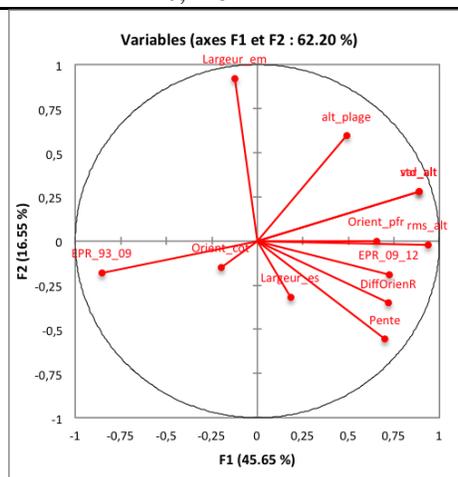
Résultats de l'ACP pour les estrans de la cellule de Sainte-Flavie

RESULTATS DES ACP A L'ECHELLE LOCALE (PAR SITE SPECIFIQUE) – EXEMPLE DE DEUX SITES

SITE 1

Tableau 5. 39 : Contribution des variables (%) pour les trois premiers facteurs expliquant la variabilité des données pour le site 1

	F1	F2	F3
<i>Orient_{pfr}</i>	6,154	5,476	2,329
<i>L_{tot}</i>	0,716	0,900	1,748
<i>Orient_{cote}</i>	0,535	12,729	4,677
<i>EPR₁₉₉₃₋₂₀₀₉</i>	9,147	0,679	3,429
<i>EPR₂₀₀₉₋₂₀₁₂</i>	7,673	6,506	1,374
<i>S_{moy}</i>	8,166	0,054	8,648
<i>H_{LR}</i>	1,812	10,090	10,326
<i>R_{std}</i>	9,986	0,359	6,394
<i>R_{var}</i>	9,986	0,359	6,394
<i>R_{rms}</i>	13,254	0,051	0,668
<i>L_{em}</i>	1,102	1,801	29,711
<i>Orient_{diff}</i>	8,413	0,411	1,057
<i>H_{flex}</i>	0,000	22,730	2,822
<i>L_{HE}</i>	8,015	8,449	0,312
<i>S_{HE}</i>	6,328	7,479	0,165
<i>S_{BE}</i>	2,483	21,757	0,631
<i>L_{BE}</i>	6,228	0,169	19,314

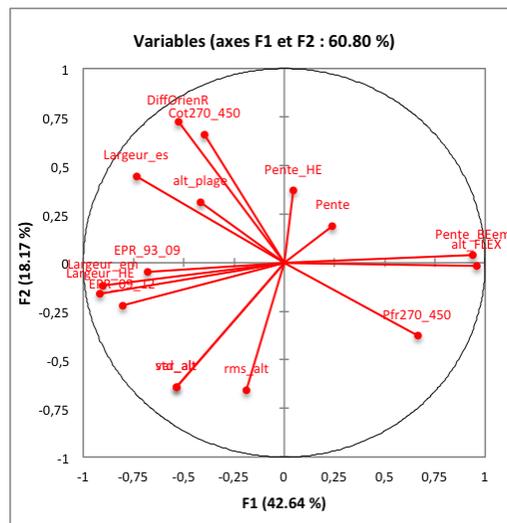


Résultats de l'ACP pour les estrans du site 1.

SITE 3

Contribution des variables (%) pour les trois premiers facteurs expliquant la variabilité des données pour le site 3.

	F1	F2	F3
$Orient_{pfr}$	5,354	5,469	0,060
L_{tot}	6,475	7,583	0,672
$Orient_{cote}$	1,779	15,732	0,147
$EPR_{1993-2009}$	6,253	0,038	4,334
$EPR_{2009-2012}$	8,396	1,285	0,823
S_{moy}	0,787	1,098	21,836
H_{LR}	2,435	3,240	22,386
R_{std}	3,841	13,216	3,437
R_{var}	3,841	13,216	3,437
R_{rms}	0,464	14,263	10,525
L_{em}	11,371	0,380	0,002
$Orient_{diff}$	3,247	18,996	0,105
H_{flex}	12,288	0,045	0,127
L_{HE}	11,066	0,632	0,957
S_{HE}	0,015	4,322	30,990
L_{BE}	10,416	0,469	0,086
S_{BE}	11,975	0,014	0,075



Résultats de l'ACP pour les estrans du site 3

ANNEXE IX

Cette annexe contient les résultats des tests post hoc des ANOVA. Seuls les résultats significatifs ($p\text{-value} < 0,05$) seront présentés et où N = nombre de profils.

RESULTATS DES TESTS POST HOC EFFECTUES SUR L'ENSEMBLE DES 2176 PROFILS.

Résultats du test post hoc T2 de Tamhane pour les types de côte.

Type 1	Type 2	p-value
Marais (N = 4)	Terrasse de plage (N = 1905)	0,069
	Terrasse de plage à base rocheuse (N = 94)	0,025
	Falaise meuble (N = 31)	0,050
	Falaise meuble à base rocheuse (N = 11)	0,127
	Falaise rocheuse (N = 25)	< 0,001
	Falaise rocheuse à sommet meuble (N = 12)	0,002
	Rocheuse sans falaise (N = 91)	0,009
	Tombolo (N = 3)	0,023
Tombolo (N = 3)	Terrasse de plage (N = 1905)	0,006
	Terrasse de plage à base rocheuse (N = 94)	< 0,001
	Falaise meuble (N = 31)	< 0,001
	Falaise meuble à base rocheuse (N = 11)	0,060
	Falaise rocheuse (N = 25)	1,000
	Falaise rocheuse à sommet meuble (N = 12)	1,000
	Rocheuse sans falaise (N = 91)	< 0,001

Résultats des tests post hoc T2 de Tamhane sur les types d'estran de côte à terrasse de plage.

Type 1	Type 2	p-value
5 (N = 120)	1 (N = 67)	0,002
	2(N = 767)	0,001
7 (N =84)	2 (N = 767)	0,042
	3(N = 429)	0,003
	4(N = 33)	0,005
	5(N = 120)	< 0,001
8 (N = 676)	2 (N = 767)	0,002
	3(N = 429)	< 0,001
	4(N = 33)	0,032
	5(N = 120)	< 0,001

Résultats du test post hoc T2 de Tamhane pour les cellules hydrosédimentaires

Cellule 1	Cellule 2	p-value
Anse-au-Lard (N = 29)	Anse-aux-Coques(N = 253)	0,001
	Ste-Flavie(N =125)	0,012
	baie de Mitis(N = 208)	0,007
Anse-aux-Coques (N = 253)	Casse-Pierre(N = 130)	< 0,001
	St-Ulric/Matane(N =251)	< 0,001
Métis-sur-Mer (N = 390)	Anse-aux-Coques(N = 253)	< 0,001
	Ste-Flavie(N =125)	< 0,001
	baie de Mitis(N = 208)	< 0,001
	Casse-Pierre(N = 130)	< 0,001
	St-Ulric/Matane(N =251)	< 0,001
	Tartigou (N = 790)	< 0,001

Cellule 1	Cellule 2	p-value
Tartigou (N = 790)	Anse-aux-Coques(N = 253)	< 0,001
	Ste-Flavie(N =125)	0,024
	baie de Mitis(N = 208)	0,003

Résultats des tests post hoc T2 de Tamhane sur les formations géologiques

Formation 1	Formation 2	p-value
des Landes (N = 292)	Orignal 2 (N = 212)	< 0,001
	Rivière-Ouelle (N = 135)	< 0,001
	Trois-Pistoles (N = 282)	0,003
	Cap-Chat 1 (N = 454)	< 0,001
	Cap-Chat 2 (N = 367)	< 0,001
Cap-Chat 1 (N = 454)	Orignal 1 (N = 156)	< 0,001
	Orignal 2 (N = 212)	< 0,001
	Rivière-Ouelle (N = 135)	< 0,001
	Tourelle 1 (N = 232)	< 0,001
	Trois-Pistoles (N = 282)	< 0,001
	Cap-Chat 2 (N = 367)	< 0,001
Tourelle 1 (N = 232)	Orignal 2 (N = 212)	< 0,001
	Rivière-Ouelle (N = 135)	< 0,001
	Tourelle 2 (N = 46)	0,039
	Trois-Pistoles (N = 282)	0,017
	Cap-Chat 1 (N = 454)	< 0,001
	Cap-Chat 2 (N = 367)	0,005

Formation 1	Formation 2	p-value
Tourelle 2 (N = 46)	Original 1 (N = 156)	< 0,001
	Original 2 (N = 212)	< 0,001
	Rivière-Ouelle (N = 135)	< 0,001
	Trois-Pistoles (N = 282)	< 0,001
	Cap-Chat 2 (N = 367)	< 0,001

Résultats des tests post hoc T2 de Tamhane pour la densité d'algues (D_a)

Densité 1	Densité 2	p-value
2 (N = 303)	4 (N = 640)	< 0,001
	6 (N = 47)	0,047
3 (N = 500)	4 (N = 640)	0,036

RESULTATS DES TESTS POST HOC EFFECTUES SUR LES PROFILS REGROUPES PAR COMBINAISON

Résultats des tests post hoc testant les différences intergroupes pour les segments de degré d'anthropisation, par combinaison.

Combinaison (test utilisé)	Segment 1	Segment 2	p-value
A1 (Bonferroni) (N = 47)	Anthropisée (N = 2)	Naturelle (N = 41)	0,007
A2 (T2 de Tamhane) (N = 714)	Anthropisée (N = 83)	Semi-anthropisée (N = 116)	< 0,001
		Naturelle (N = 515)	0,013
A3 (N = 395)	s/o		
A4 (Bonferroni) (N = 33)	Anthropisée (N = 15)	Semi-anthropisée (N = 8)	< 0,001
		Naturelle (N = 10)	0,003
A5 (Bonferroni) (N = 96)	Anthropisée (N = 17)	Semi-anthropisée (N = 44)	0,020
		Naturelle (N = 35)	0,002
A7 (Bonferroni) (N = 79)	Anthropisée (N = 51)	Naturelle (N = 13)	0,004
	Semi-anthropisée (N = 15)	Naturelle (N = 13)	0,041
A8 ((Bonferroni) (N = 638)	Semi-anthropisée (N = 139)	Naturelle (N = 381)	0,043

Résultats des tests post hoc testant les différences intergroupes pour les formations géologiques, par combinaison.

Combinaison (test utilisé)	Formation 1	Formation 2	p-value
A1 (N = 47)	s/o		
A2 (T2 de Tamhane) (N = 714)	Cap-Chat 1 (N = 159)	des Landes (N = 166)	< 0,001
		Orignal 1 (N = 114)	< 0,001
		Orignal 2 (N = 33)	< 0,001
		Rivière-Ouelle (N = 33)	< 0,001
		Tourelle 1 (N = 51)	< 0,001
		Trois-Pistoles (N = 43)	< 0,001
	des Landes (N = 166)	Cap-Chat 2 (N = 114)	< 0,001
		Orignal 1 (N = 114)	0,013
		Orignal 2 (N = 33)	< 0,001
		Rivière-Ouelle (N = 33)	< 0,001
		Trois-Pistoles (N = 43)	0,022
		Cap-Chat 2 (N = 114)	< 0,001
	Orignal 1 (N = 114)	Orignal 2 (N = 33)	0,008
		Rivière-Ouelle (N = 33)	0,009
		Cap-Chat 2 (N = 114)	0,013
	Tourelle 1 (N = 51)	Orignal 2 (N = 33)	0,004
		Rivière-Ouelle (N = 33)	0,005
		Cap-Chat 2 (N = 114)	0,015
A3 (T2 de Tamhane) (N = 395)	des Landes (N = 51)	Orignal 2 (N = 24)	0,003
		Tourelle 1 (N = 40)	0,030
		Tourelle 2 (N = 13)	0,002
		Cap-Chat 1 (N = 129)	< 0,001
	Orignal 2 (N = 24)	Orignal 1 (N = 28)	0,001
		Tourelle 1 (N = 40)	< 0,001
		Tourelle 2 (N = 13)	< 0,001
		Trois-Pistoles (N = 44)	< 0,001
		Cap-Chat 1 (N = 129)	< 0,001
		Cap-Chat 2 (N = 54)	< 0,001

Combinaison (test utilisé)	Formation 1	Formation 2	p-value
	Cap-Chat 1 (N = 129)	Tourelle 1 (N = 40)	0,003
		Cap-Chat 2 (N = 54)	< 0,001
	Cap-Chat 2 (N = 54)	Tourelle 2 (N = 13)	0,043
A4 (N = 33)	s/o		
A5 (T2 de Tamhane) (N = 96)	Orignal 2 (N = 10)	des Landes (N = 16)	< 0,001
		Tourelle 1 (N = 11)	< 0,001
		Cap-Chat 1 (N = 18)	< 0,001
		Cap-Chat 2 (N = 40)	< 0,001
	Tourelle 1 (N = 11)	Cap-Chat 2 (N = 40)	0,028
A7 (Bonferroni) (N = 79)	Rivière-Ouelle (N = 62)	Trois-Pistoles (N = 9)	0,002
A8 (T2 de Tamhane) (N = 638)	Tourelle 2 (N = 26)	des Landes (N = 21)	0,002
		Orignal 2 (N = 112)	0,005
		Tourelle 1 (N = 55)	0,013
		Trois-Pistoles (N = 161)	< 0,001
		Cap-Chat 2 (N = 135)	0,001
	Cap-Chat 1 (N = 107)	des Landes (N = 21)	< 0,001
		Orignal 2 (N = 112)	< 0,001
		Rivière-Ouelle (N = 18)	0,035
		Tourelle 1 (N = 55)	< 0,001
		Trois-Pistoles (N = 161)	< 0,001
		Cap-Chat 2 (N = 135)	< 0,001

Résultats des tests post hoc testant les différences intergroupes pour les différentes proportions de couvertures de plate-forme rocheuse sur l'estran, par combinaison.

Combinaison (test utilisé)	Superficie 1	Superficie 2	p-value
A1 (Bonferroni) (N = 47)	3 (N = 24)	4 (N = 21)	0,001
A2 (T2 de Tamhane) (N = 714)	2 (N = 178)	3 (N = 364)	< 0,001
		4 (N = 138)	0,031
A3 (T2 de Tamhane) (N = 395)	2 (N = 168)	3 (N = 145)	0,014
A4 (N = 33)	s/o		
A5 (N = 96)	s/o		
A7 (N = 79)	s/o		
A8 (N = 638)	s/o		

Résultats des tests post hoc testant les différences intergroupes pour les différentes orientations des strates de la plate-forme rocheuse, par combinaison.

Combinaison (test utilisé)	Orientation 1	Orientation 2	p-value
A1 (Bonferroni) (N = 47)	N (N = 19)	NNE (N = 2)	0,001
		NNW (N = 14)	0,008
	NNE (N = 2)	NW (N = 12)	0,004
A2 (T2 de Tamhane) (N = 714)	NE (N = 5)	W (N = 6)	0,001
		WNW (N = 108)	< 0,001
		NW (N = 210)	< 0,001
		NNW (N = 179)	< 0,001

Combinaison (test utilisé)	Orientation 1	Orientation 2	p-value
		N (N = 194)	< 0,001
	N (N = 194)	NNW (N = 179)	0,004
A3 (T2 de Tamhane) (N = 395)	NNE (N = 34)	WNW (N = 77)	0,001
		NW (N = 90)	< 0,001
		NNW (N = 98)	< 0,001
		N (N = 73)	0,004
	NE (N = 4)	WNW (N = 77)	< 0,001
		NW (N = 90)	< 0,001
		NNW (N = 98)	< 0,001
		N (N = 73)	< 0,001
A4 (N = 33)	s/o		
A5 (T2 de Tamhane) (N = 96)	NW (N = 13)	Aucune (N = 69)	0,030
		WNW (N = 2)	0,003
		NNW (N = 12)	< 0,001
A7 (T2 de Tamhane) (N = 79)	Aucune (N = 58)	NNW (N = 13)	0,001
A8 (T2 de Tamhane) (N = 638)	NNW (N = 77)	Aucun (N = 257)	< 0,001
		W (N = 7)	0,017
		WNW (N = 97)	0,003
		N (N = 87)	< 0,001

Résultats des tests post hoc testant les différences intergroupes pour les différentes orientations de la côte, par combinaison.

Combinaison (test utilisé)	Orientation 1	Orientation 2	p-value
A1 (Bonferroni) (N = 47)	N (N = 5)	WNW (N = 7)	0,045
A2 (T2 de Tamhane) (N = 714)	WNW (N = 17)	NNE (N = 29)	0,004
	NW (N = 218)	NNW (N = 365)	< 0,001
		NNE (N = 29)	< 0,001
		NE (N = 12)	0,013
	NNE (N = 29)	NNW (N = 365)	< 0,001
	N (N = 62)	< 0,001	
A3 (N = 395)	s/o		
A4 (N = 33)	s/o		
A5 (N = 96)	s/o		
A7 (T2 de Tamhane) (N = 79)	NW (N = 29)	WNW (N = 6)	0,021
		NNW (N = 31)	0,019
A8 (N = 638)	s/o		

Résultats des tests post hoc testant les différences intergroupes pour les différentes densités de placage sédimentaire, par combinaison.

Combinaison (test utilisé)	Densité 1	Densité 2	p-value
A1 (N = 47)	s/o		
A2 (Bonferroni) (N = 714)	0 (N = 63)	1 (N = 297)	< 0,001
		2 (N = 337)	< 0,001
		3 (N = 17)	0,001
A3 (N = 395)	s/o		
A4 (N = 33)	s/o		
A5 (N = 96)	s/o		
A7 (T2 de Tamhane) (N = 79)	2 (N = 19)	1 (N = 13)	0,004
		3 (N = 47)	0,020
A8 (Bonferroni) (N = 638)	0 (N = 3)	1 (N = 31)	0,044
	2 (N = 156)	3 (N = 448)	0,001

Résultats des tests post hoc testant les différences intergroupes pour les différentes densités d'algues, par combinaison.

Combinaison (test utilisé)	Densité 1	Densité 2	p-value	
A1 (Bonferroni) (N = 47)	2 (N = 2)	0 (N = 7)	0,007	
		1 (N = 20)	0,033	
		4 (N = 8)	0,004	
A2 (T2 de Tamhane) (N = 714)	3 (N = 114)	4 (N = 252)	< 0,001	
		6 (N = 23)	0 (N = 32)	0,005
		1 (N = 90)	< 0,001	
		2 (N = 128)	< 0,001	
		3 (N = 114)	< 0,001	
		4 (N = 252)	0,003	
		5 (N = 75)	< 0,001	
A3 (Bonferroni) (N = 395)	2 (N = 63)	4 (N = 129)	0,002	
A4 (T2 de Tamhane) (N = 33)	3 (N = 3)	4 (N = 26)	< 0,001	
		5 (N = 4)	< 0,001	
		4 (N = 26)	5 (N = 4)	< 0,001
A5 (T2 de Tamhane) (N = 96)	1 (N = 23)	4 (N = 23)	< 0,001	
		5 (N = 8)	3 (N = 31)	0,002
		4 (N = 23)	< 0,001	
		6 (N = 7)	1 (N = 23)	< 0,001
		3 (N = 31)	< 0,001	
		4 (N = 23)	0,038	
		5 (N = 8)	< 0,001	
A7 (Bonferroni) (N = 79)	3 (N = 9)	5 (N = 36)	0,004	
A8 (T2 de Tamhane) (N = 638)	2 (N = 88)	1 (N = 89)	0,009	
		3 (N = 218)	0,001	
		4 (N = 176)	0,001	
		5 (N = 37)	0,020	

ANNEXE X

Cette annexe présente le résultat des régressions linéaires par cellule hydrosédimentaire

Régressions linéaires concluantes pour les données de la cellule de l'Anse-au-Lard. N = 29 profils.

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>L_{tot}</i>	9,87E-04	0,311	-0,007	1,240	+
EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>H_{LR}</i>	0,0046	0,234	1,390	-5,100	+
	<i>L_{em}</i>	0,011	0,187	0,028	-4,620	+
	<i>Orient_{diff}</i>	0,0015	0,290	1,31E-04	-0,704	+

Régressions linéaires concluantes pour les données de la cellule de la baie de Mitis. N = 208 profils.

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>R_{rms}</i>	2,13E-09	0,156	-0,276	0,220	-
	<i>R_{std}</i>	3,90E-08	0,133	-0,317	0,255	-
	<i>H_{LR}</i>	1,03E-08	0,143	-0,129	0,375	-
	<i>L_{em}</i>	4,81E-08	0,131	4,21E-04	-0,133	+
EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>R_{rms}</i>	1,76E-06	0,101	1,037	-1,381	+

Régressions linéaires concluantes pour les données de la cellule de Casse-Pierre. N = 130 profils.

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{moy}</i>	2,38E-06	0,154	-0,031	-0,021	-
	<i>R_{rms}</i>	4,65E-08	0,203	-0,163	0,107	-
	<i>R_{std}</i>	7,63E-06	0,139	-0,195	0,110	-
	<i>H_{LR}</i>	1,69E-11	0,294	-0,113	0,284	-

Régressions linéaires concluantes pour les données de la cellule de Métis-sur-Mer. N = 390 profils.

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>R_{rms}</i>	3,371E-12	0,115	-0,226	0,132	-
EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>R_{rms}</i>	7,449E-12	0,112	1,124	-1,754	+

Régressions linéaires concluantes pour les données de la cellule de Sainte-Flavie. N = 125 profils.

Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{moy}</i>	1,26E-04	0,106	-0,107	0,132	-
	<i>H_{LR}</i>	1,35E-06	0,167	-0,142	0,406	-
EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{moy}</i>	8,97E-07	0,172	1,134	-3,392	+
	<i>R_{rms}</i>	1,58E-10	0,278	4,260	-5,660	+
	<i>L_{em}</i>	2,52E-05	0,128	-0,013	0,538	-

ANNEXE XI

Cette annexe présente les résultats des régressions linéaires des combinaisons de chaque cellule.

Régressions linéaires concluantes pour les combinaisons la cellule de l'Anse-au-Lard

Combin	Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
A8 N = 23	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	L_{tot}	3,92E-03	0,302	-0,007	1,253	-
	EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	H_{LR}	7,00E-03	0,263	1,197	-4,304	+

Régressions linéaires concluantes pour les combinaisons la cellule de la baie de Mitis

Combin	Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
A2 N = 96	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	R_{rms}	3,14E-09	0,120	-0,220	0,165	-
		R_{std}	1,00E-03	0,100	-0,260	0,166	-
		H_{LR}	4,04E-05	0,156	-0,110	0,313	-
		L_{tot}	3,38E-04	0,119	3,52E-04	-0,148	+
	EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	S_{moy}	4,21E-05	0,155	0,332	-0,949	+
		R_{rms}	3,60E-07	0,234	1,778	-2,116	+
		R_{std}	7,47E-08	0,258	2,365	-2,400	+
		L_{tot}	6,49E-04	0,108	-0,002	0,180	-
A7 N = 62	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	S_{moy}	5,14E-7	0,334	-0,510	0,370	-
		R_{rms}	2,97E-7	0,346	-0,844	0,590	-
		R_{std}	8,51E-6	0,271	-0,837	0,555	-
		H_{LR}	0,0013	0,146	-0,369	1,069	-
		L_{em}	0,0025	0,129	5,90E-4	-0,191	+

*Aucune relation pour A3 (N = 20) et A8 (N = 21)

Régressions linéaires concluantes pour les combinaisons la cellule de Casse-Pierre

Combin	Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
A1 N = 31	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{moy}</i>	2,30E-03	0,253	-0,053	0,010	-
		<i>R_{rms}</i>	1,22E-04	0,383	-0,281	0,245	-
		<i>H_{LR}</i>	9,32E-06	0,480	-0,117	0,289	-
	EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>S_{moy}</i>	0,014	0,163	0,371	-1,065	+
		<i>R_{rms}</i>	1,70E-03	0,268	2,010	-2,770	+
		<i>H_{LR}</i>	9,72E-03	0,182	0,641	-2,45	+
A3 N = 29	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>H_{LR}</i>	2,35E-04	0,377	-0,218	0,592	-
		<i>L_{tot}</i>	0,026	0,140	5,00E-04	-2,615	-
	EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>R_{rms}</i>	0,026	0,140	1,170	-1,820	+
A8 N = 47	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>H_{LR}</i>	3,81E-04	0,230	-0,159	0,433	-

Régressions linéaires concluantes pour les combinaisons la cellule de Métis-sur-Mer

Combin.	Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
A2 N=115	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{moy}</i>	< 2,2E-16	0,474	-0,114	0,156	-
		<i>R_{rms}</i>	< 2,2E-16	0,480	-0,447	0,386	-
		<i>R_{std}</i>	6,05E-12	0,338	-0,738	0,490	-
		<i>H_{LR}</i>	< 2,2E-16	0,529	-0,446	1,175	-
		<i>L_{tot}</i>	< 2,2E-16	0,565	0,001	-0,409	+
		<i>L_{em}</i>	3,76E-15	0,418	0,002	-0,391	+
		<i>Orient_{diff}</i>	1,89E-06	0,176	0,000	-0,244	-
		EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>S_{moy}</i>	6,38E-09	0,252	0,453	-1,579
	<i>R_{rms}</i>		5,63E-12	0,338	2,040	-2,851	+
	<i>R_{std}</i>		4,83E-06	0,162	2,812	-2,782	+
	<i>H_{LR}</i>		5,95E-07	0,192	1,475	-4,689	+
	<i>L_{tot}</i>		4,95E-08	0,226	-0,004	0,581	-
	<i>L_{em}</i>		4,48E-05	0,130	-0,007	0,456	-

Combin.	Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
A3 N=76	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>R_{rms}</i>	3,43E-03	0,098	0,067	-0,165	-
		<i>R_{std}</i>	1,03E-05	0,222	-0,527	0,368	-
A5 N=20	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>R_{std}</i>	3,05E-05	0,608	-1,003	0,856	-
		<i>H_{LR}</i>	4,11E-03	0,340	-0,305	0,762	-
	EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>H_{LR}</i>	6,82E-03	0,305	1,692	-6,223	+
		<i>L_{tot}</i>	4,98E-03	0,327	0,006	-1,852	+
A8 N=121	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>H_{LR}</i>	9,85E-07	0,176	-0,244	0,611	-
	EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>Orient_{diff}</i>	1,61E-05	0,138	0,000	-0,554	-

Régressions linéaires concluantes pour les combinaisons la cellule de Sainte-Flavie

Combin	Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
A2 N = 83	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>S_{moy}</i>	4,83E-04	0,130	-0,101	0,130	-
		<i>R_{rms}</i>	1,95E-04	0,148	-0,291	0,249	-
		<i>H_{LR}</i>	5,17E-06	0,218	-0,189	0,559	-
	EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>S_{moy}</i>	1,65E-04	0,151	1,000	-3,327	+
		<i>R_{rms}</i>	3,77E-07	0,265	3,540	-5,110	+
A3 N = 28	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	<i>H_{LR}</i>	1,30E-02	0,183	-0,194	0,520	-
	EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	<i>S_{moy}</i>	3,40E-02	0,130	1,325	-3,470	+
		<i>R_{rms}</i>	1,50E-04	0,409	8,550	-9,890	+
		<i>R_{std}</i>	1,01E-04	0,426	8,530	-9,690	+
		<i>L_{tot}</i>	0,018	0,167	-0,025	3,294	-

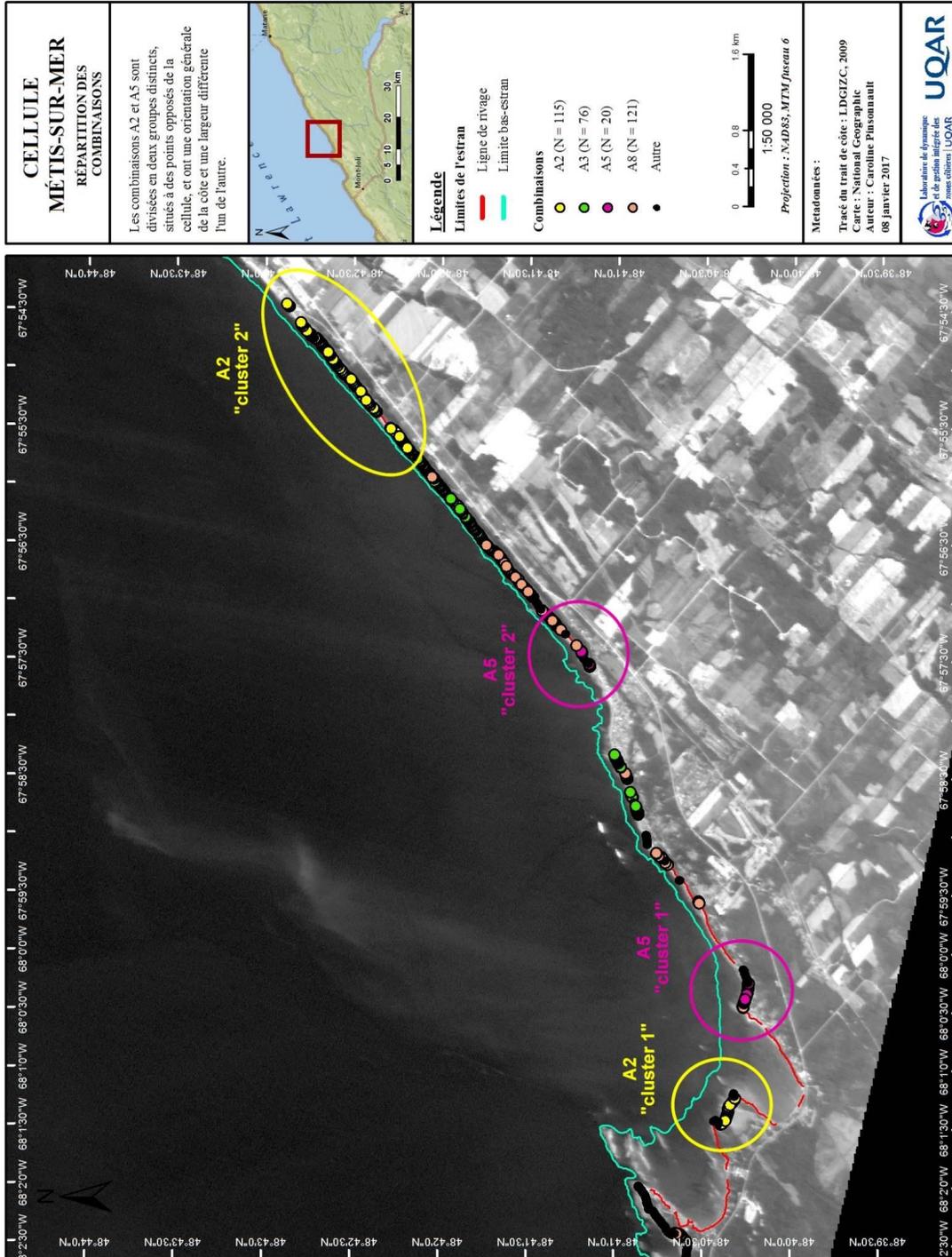
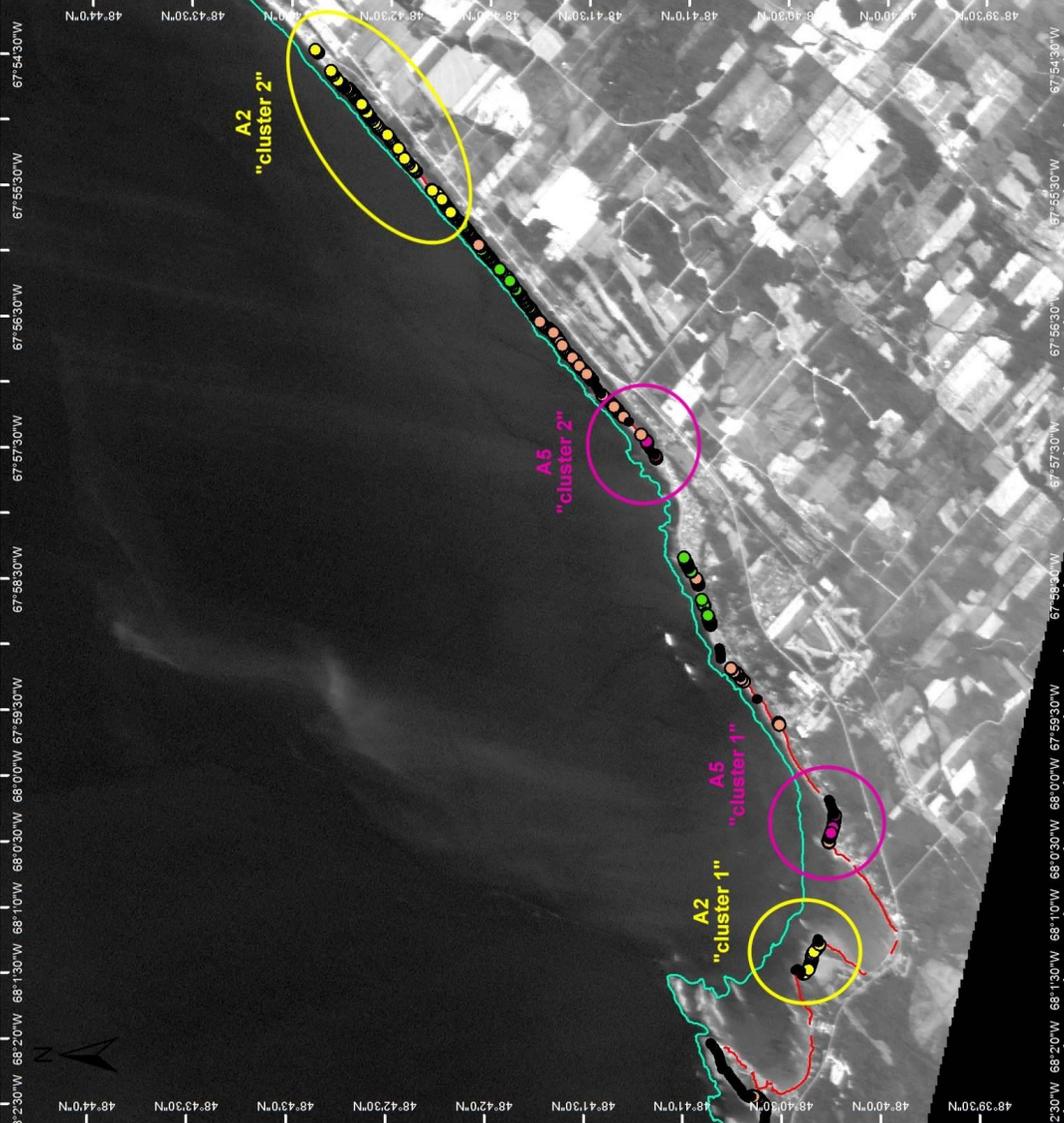
Régressions linéaires concluantes pour les combinaisons la cellule de Sainte-Ulric/Matane

Combin	Variable y	Variable x	p-value	R ² ajusté	a	b	sens de la relation
A2 N = 10	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	L_{tot}	1,70E-03	0,693	0,002	-0,512	+
A3 N = 11	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	L_{tot}	3,74E-02	0,331	-0,013	1,932	-
	EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	R_{rms}	3,87E-02	0,327	5,878	-8,144	+
A4 N = 33	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	S_{moy}	3,40E-03	0,221	-0,010	0,056	-
		R_{rms}	1,08E-02	0,166	-0,344	0,267	-
		R_{std}	2,75E-05	0,420	-0,550	0,489	-
		H_{LR}	3,37E-03	0,221	-0,279	0,727	-
		L_{tot}	8,85E-06	0,459	0,003	-0,846	+
		L_{em}	8,39E-06	0,461	0,006	-0,838	+
	EPR ₂₀₀₉₋₂₀₁₂	S_{moy}	9,40E-03	0,172	0,534	-1,243	+
		R_{rms}	3,32E-03	0,222	2,330	-3,038	+
		R_{std}	2,20E-04	0,340	2,980	-3,600	+
		H_{LR}	5,14E-04	0,305	1,925	-6,260	+
	L_{em}	9,90E-03	0,170	-0,022	2,580	-	
A5 N = 42	EPR ₁₉₉₃₋₂₀₀₉	R_{std}	1,30E-03	0,210	-0,695	0,625	-

*Aucune relation pour A8 (N = 153).

ANNEXE XII

Cette annexe présente une carte illustrant la répartition des combinaisons principales réparties en petits groupes dans la cellule de Métis-sur-Mer

ANNEXE XIII

Cette annexe présente quelques exemples du couplage des régressions linéaires avec les degrés d'anthropisation, identifiées à la section 5.1.2., dans une même illustration.

Taux de déplacement 1993-2009 en fonction de l'indice de rugosité 'moyenne quadratique'
Combinaison A1

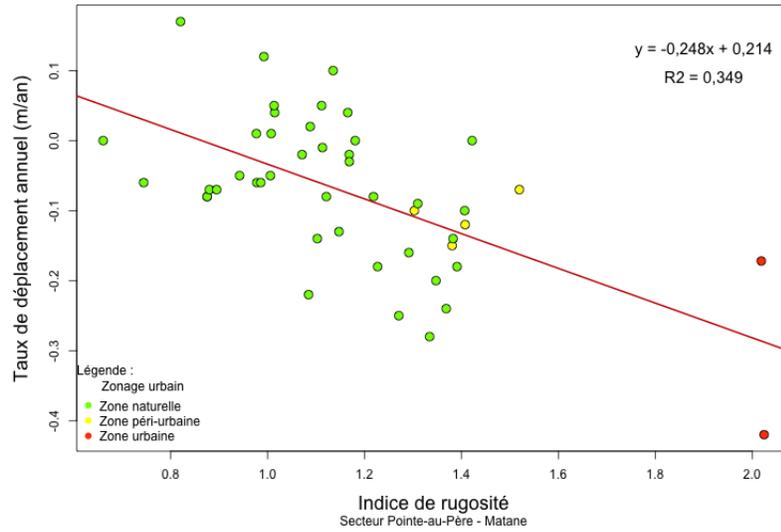


Illustration de la variable "degré d'anthropisation" avec la relation entre l'indice de rugosité "moyenne quadratique" et le taux de déplacement 1993-2009 pour A1.

Taux de déplacement 1993-2009 en fonction de la largeur totale émergée de l'estran
Combinaison A7

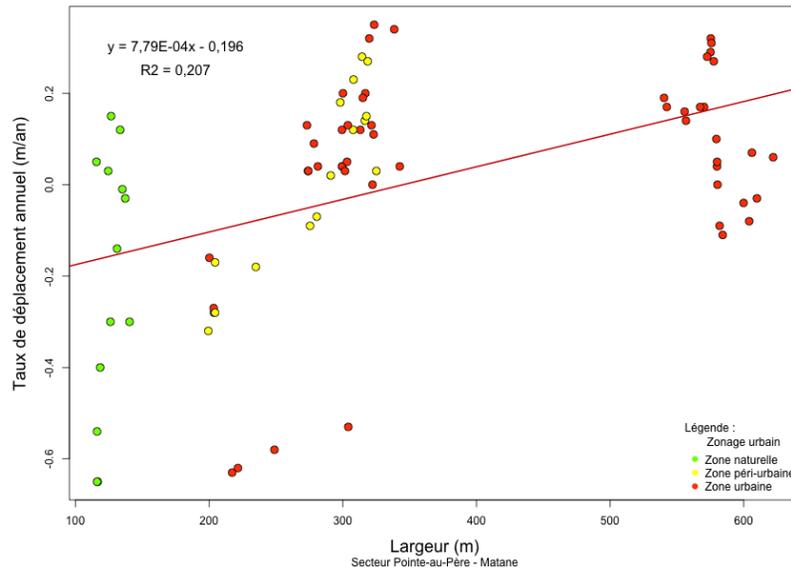


Illustration de la variable "degré d'anthropisation" avec la relation entre la largeur émergée de l'estran et le taux de déplacement 1993-2009 pour A7.

ANNEXE XIV

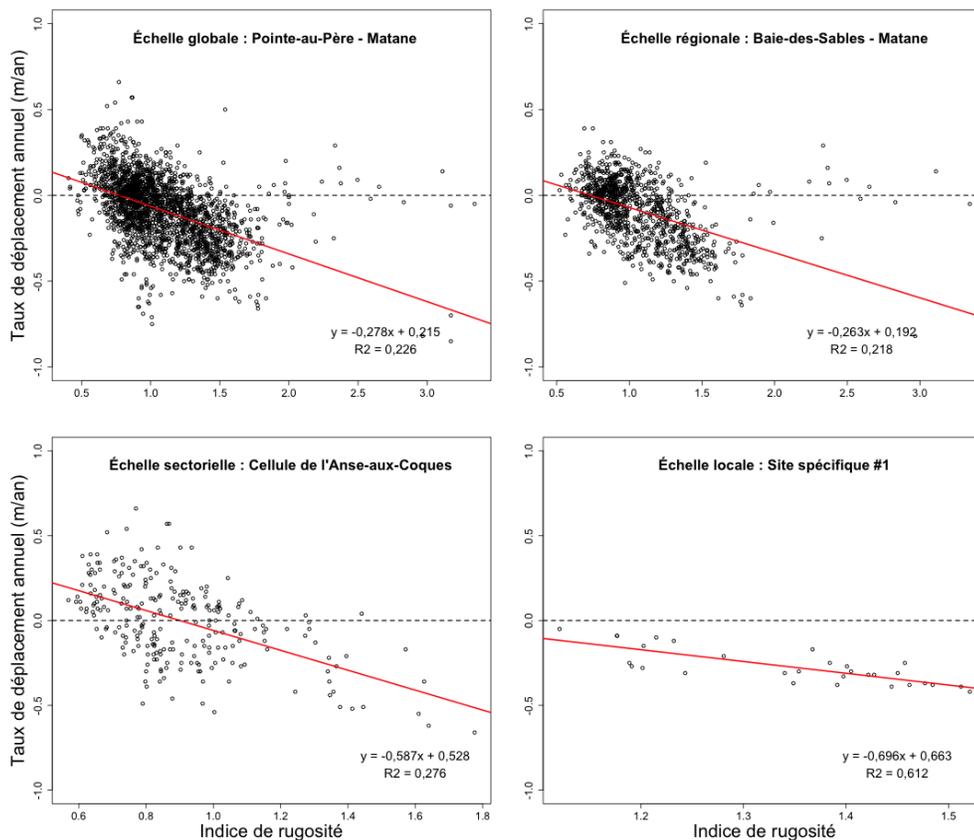
Cette annexe compare les échelles spatiales

POUR L'ENSEMBLE DES PROFILS

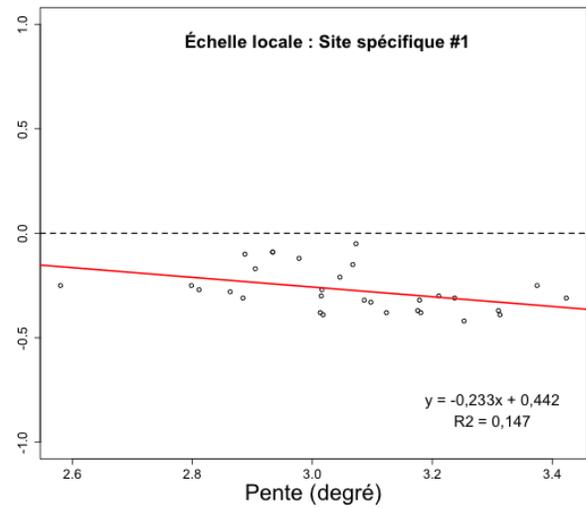
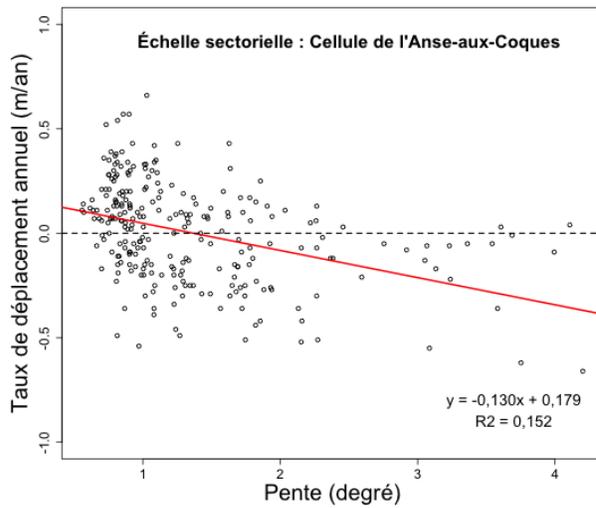
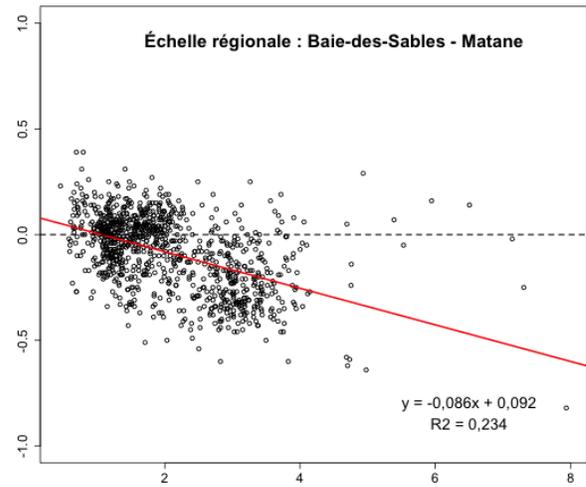
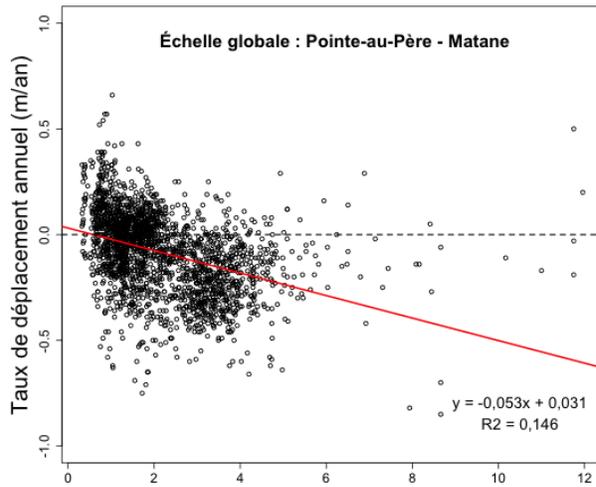
La cellule de l'Anse-aux-Coques et le site #1 ont été choisis parce que ces groupes présentent le plus grand nombre de relations à leur échelle respective.

Étant donné que le site #1 ne possède pas de relation entre la largeur totale de l'estran et le taux de déplacement, le site #3 a été choisi pour présenter la comparaison des relations concernant la largeur totale de l'estran pour chaque échelle spatiale.

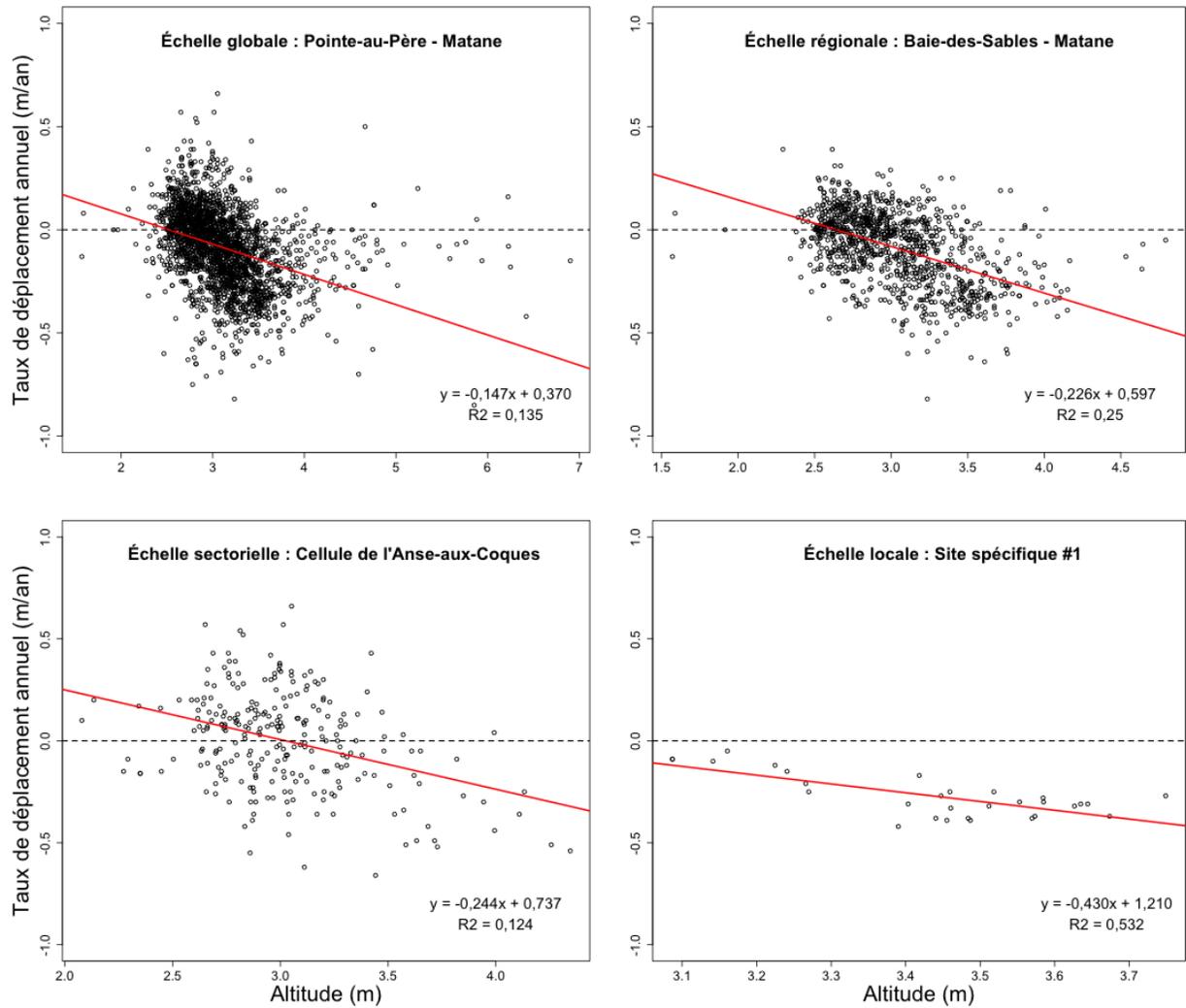
Relation entre le taux de déplacement de la côte en fonction de l'indice de rugosité 'moyenne quadratique' à différentes échelles spatiales



Relation entre le taux de déplacement de la côte en fonction de la pente moyenne de l'estran à différentes échelles spatiales



Relation entre le taux de déplacement de la côte en fonction de l'altitude de la ligne de rivage à différentes échelles spatiales

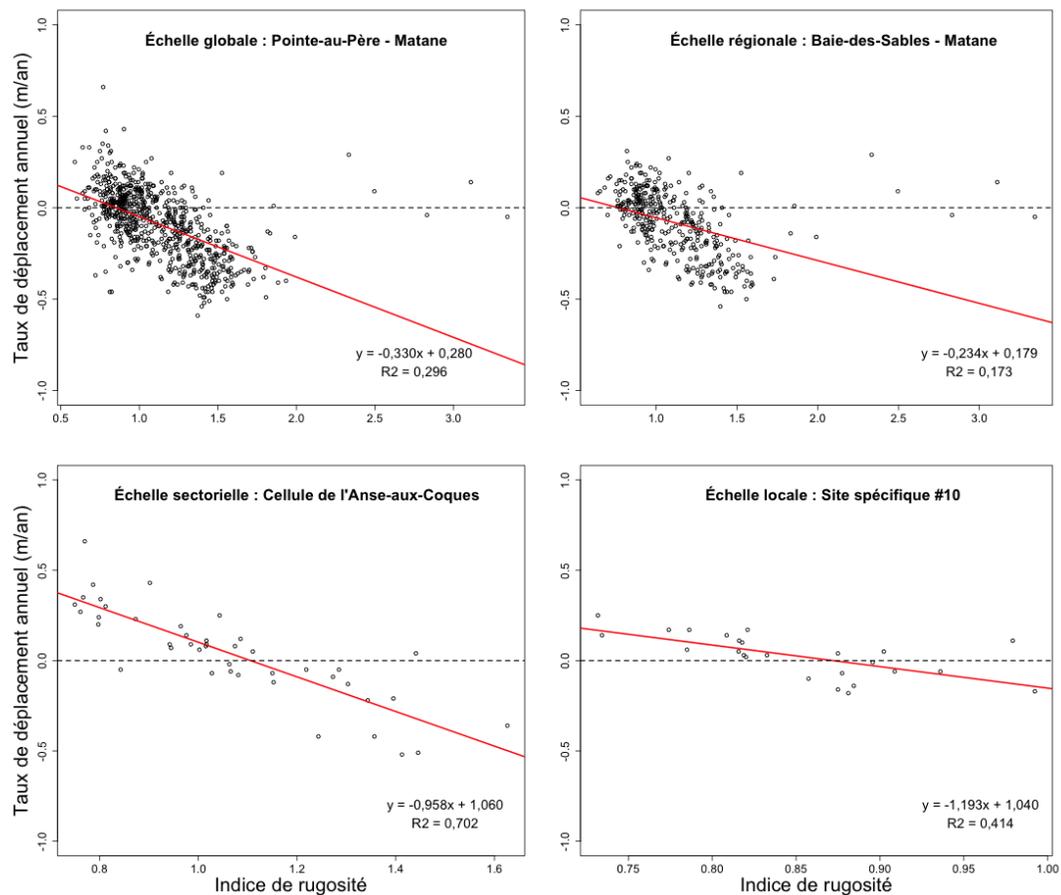


ANNEXE XV

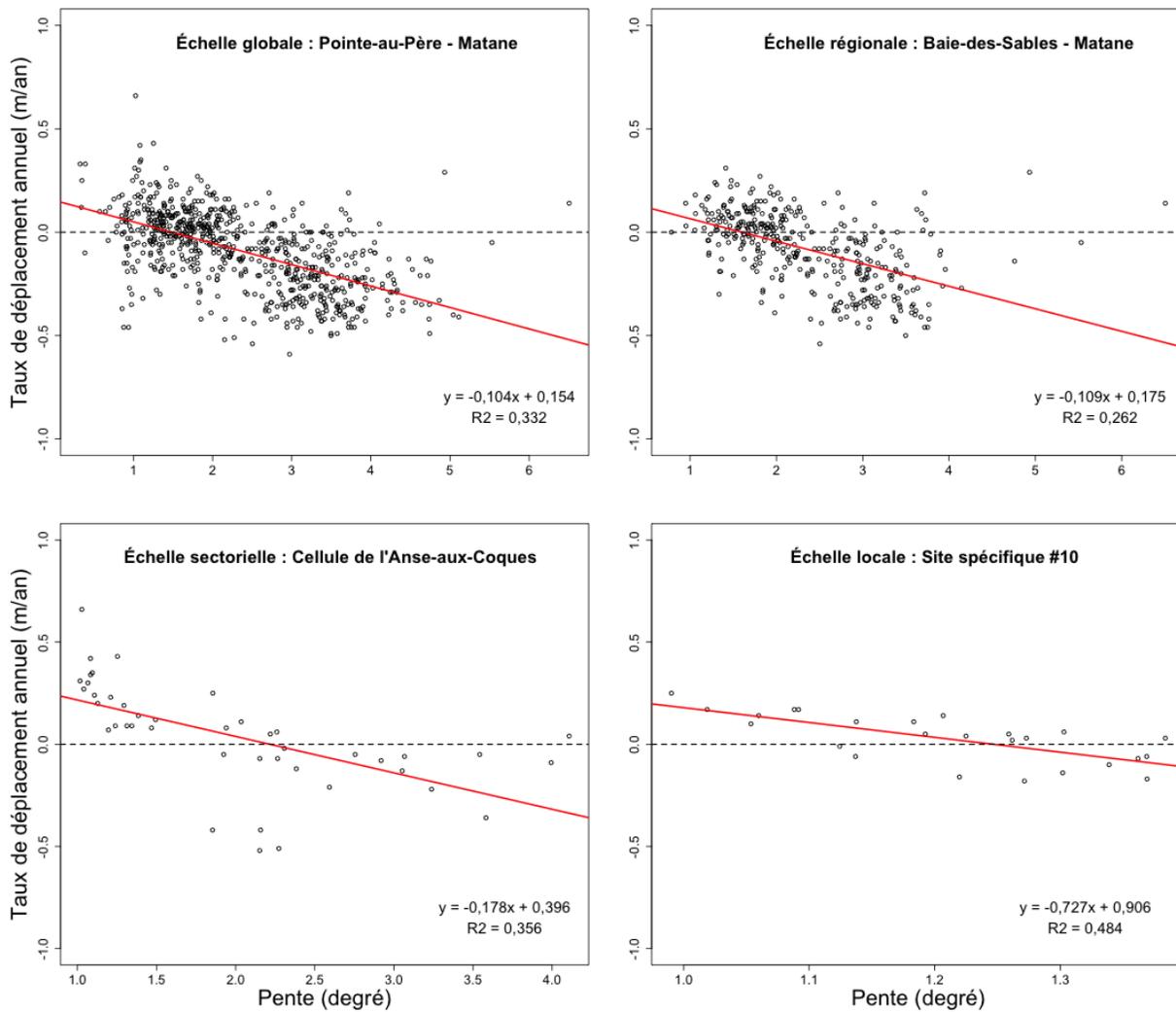
Cette annexe compare les résultats par combinaison : exemple avec la combinaison A2.

La combinaison A2 a été choisie parce qu'elle est la plus fréquente sur le site d'étude. La cellule Anse-aux-Coques a été choisie pour l'échelle sectorielle car la combinaison A2 de cette cellule présente les plus fortes relations retrouvées dans l'ensemble des groupes de données. Enfin, le site #10 a été choisi puisqu'il est le seul à faire partie de la cellule Anse-aux-Coques, et qu'il possède parmi les plus fortes relations pour chaque caractéristique morphométrique. Il permet aussi de faire la comparaison avec les résultats du site #1 présentés dans l'annexe 1A.

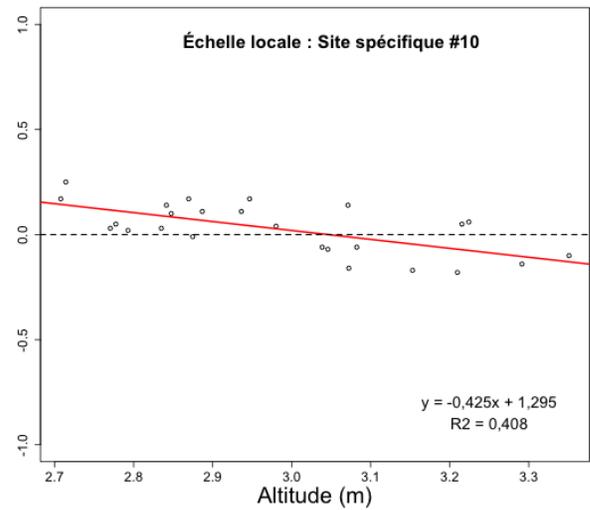
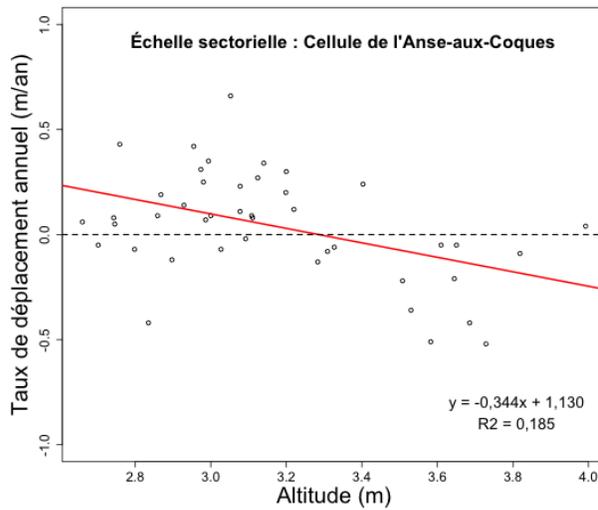
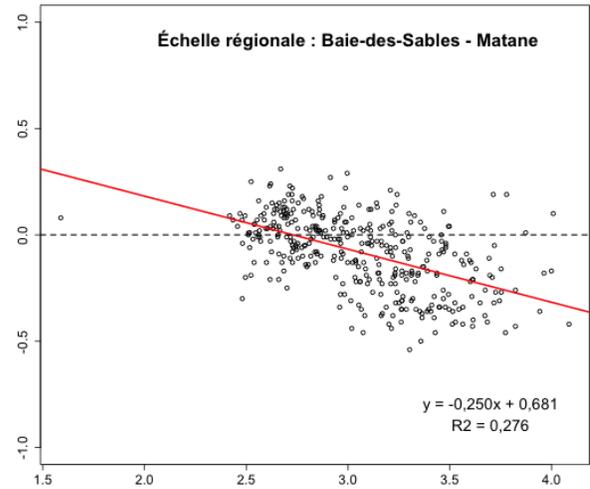
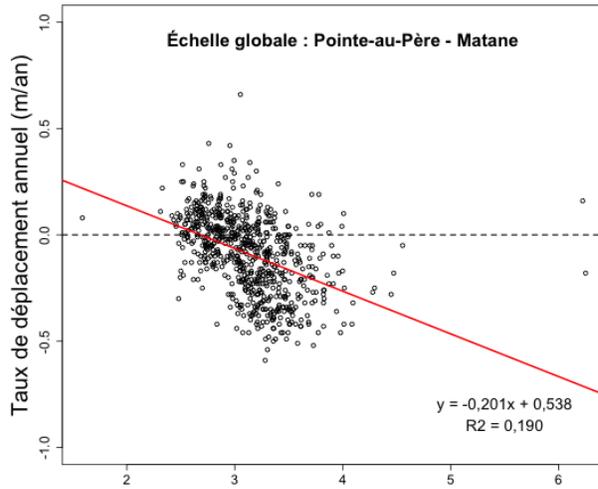
Relation entre le taux de déplacement de la côte en fonction de l'indice de rugosité 'moyenne quadratique' à différentes échelles spatiales pour la combinaison A2



Relation entre le taux de déplacement de la côte en fonction de la pente moyenne de l'estran à différentes échelles spatiales pour la combinaison A2



Relation entre le taux de déplacement de la côte en fonction de l'altitude de la ligne de rivage à différentes échelles spatiales pour la combinaison A2

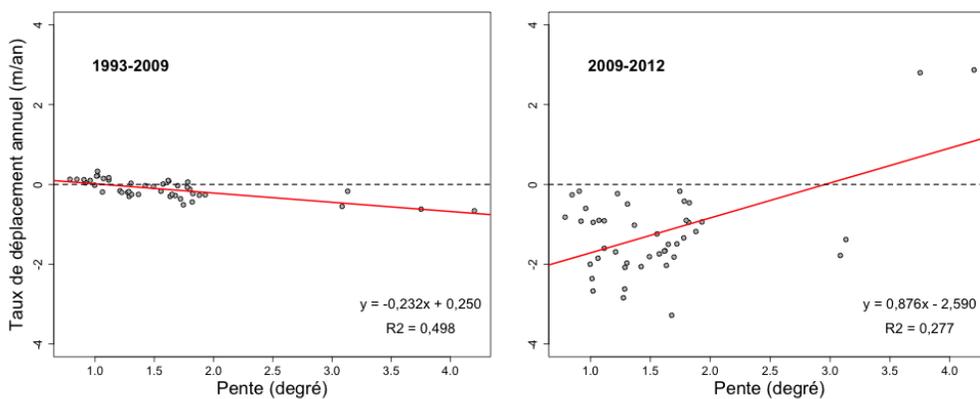


ANNEXE XVI

Cette annexe compare les périodes 1993-2009 et 2009-2012.

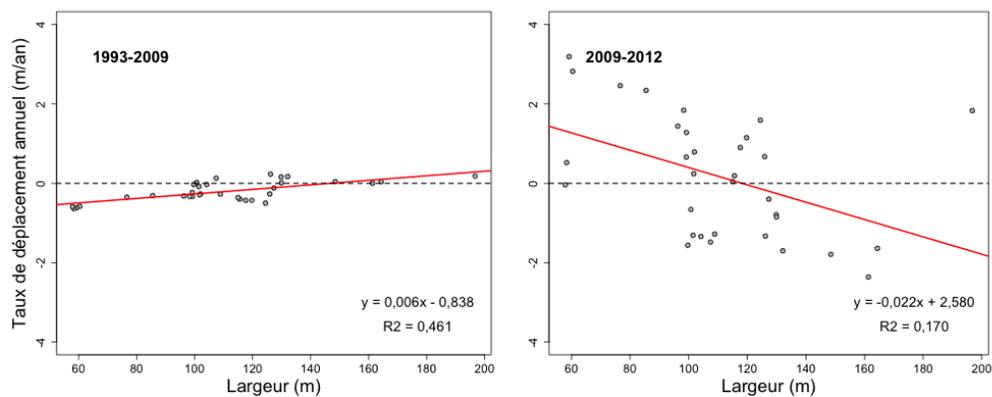
SENS CONTRAIRE DES RELATIONS D'UNE PERIODE A L'AUTRE.

Taux de déplacement de la côte en fonction de la pente moyenne de l'estran



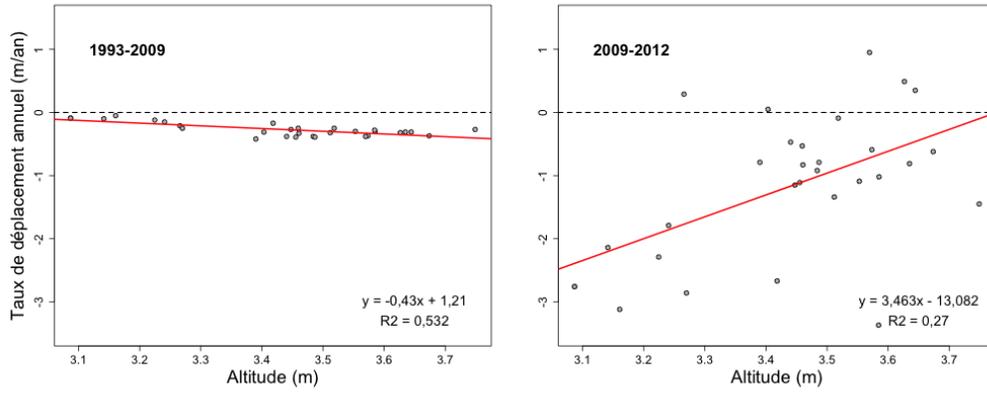
Combinaison A3 - Échelle sectorielle (cellule Anse-aux-Coques)

Taux de déplacement de la côte en fonction de la largeur émergée de l'estran



Combinaison A4 - Échelle sectorielle (cellule Saint-Ulric - Matane)

Taux de déplacement de la côte en fonction de l'altitude de la ligne de rivage



Site spécifique #1 - 'Secteur Baie-des-Sables - Matane'

**SENS OPPOSE A LA TENDANCE GENERALE, CAS DES SITES #6 ET #7
CONCERNANT LA PENTE MOYENNE**