

METHODE DE DETERMINATION DE LA LIGNE DES HAUTES EAUX POUR LE DOMAINE MARITIME DANS L'ESTUAIRE ET LE GOLFE DU SAINT-LAURENT DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Rapport final

Réalisé pour le compte du ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MDDELCC) et du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec (MTMDET) (Projet MTMDET CC14.1)

Sous la direction de
Pascal Bernatchez, Ph. D.
Décembre 2018



**Développement durable,
Environnement et Lutte
contre les changements
climatiques**

Québec 

**Transports,
Mobilité durable
et Électrification
des transports**

Québec 


Fondsvert

AVERTISSEMENT

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte aux Changements Climatiques et du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET) et a été financée par le Service de l'environnement, Direction de l'environnement et de la recherche du MTMDET et du ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte aux Changements Climatiques, Direction de l'agroenvironnement et du milieu hydrique (DAEMH), Direction générale des politiques de l'eau (DGPE).

Le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports ainsi que le ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte aux Changements Climatiques ne sont pas responsables de l'exactitude, de l'actualité et de la fiabilité du contenu de ce mémoire. Les points de vue exprimés dans ce rapport émanent des auteurs et ne coïncident pas nécessairement avec ceux des ministères mentionnés ci-haut.

CHERCHEUR RESPONSABLE DU PROJET

Pascal Bernatchez, Ph. D.

Université du Québec à Rimouski

Département de biologie, chimie et géographie

Chaire de recherche en géoscience côtière

Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC)

300, allée des Ursulines, case postale 3300

Rimouski (Québec) G5L 3A1

Téléphone : (418) 723-1986, poste 1257 (bureau) ou poste 1206 (laboratoire)

Télécopieur : (418) 724-1847

Courriel : pascal_bernatchez@uqar.ca

Site web : <http://dgizc.uqar.ca>

**CHARGÉ DE PROJET AU MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE
L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES**

Francis Bourret, biologiste, M. Sc.

Direction de l'agroenvironnement et du milieu hydrique (DAEMH)

Direction générale des politiques de l'eau (DGPE)

Ministère du Développement durable, de l'Environnement

et de la Lutte contre les changements climatiques.

Édifice Marie-Guyart, 8^e étage

675, boulevard René-Lévesque Est

Québec (Québec) G1R 5V7

Téléphone : 418 521-3885, poste 4971

Courriel : francis.bourret@mddelcc.gouv.qc.ca

**CHARGÉE DE PROJET AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS, DE LA
MOBILITÉ DURABLE ET DE L'ÉLECTRIFICATION DES TRANSPORTS**

Isabelle Falardeau, géographe, M. Sc. Eau

Direction de l'environnement et de la recherche

Service de l'environnement (SE)

Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports

930, chemin Sainte-Foy, 6^e étage

Québec (Québec) G1S 4X9

Téléphone : 418 643-7828, poste 24054

Courriel : isabelle.falardeau@transport.gouv.qc.ca

COMITÉ DE SUIVI

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET
DE LA LUTTE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Francis Bourret, biologiste, chargé du projet à la DAEMH-DGPE
Élisabeth Bussièrès, M. Env, DAEMH-DGPE

Jean-Denis Bouchard, géologue, Direction de l'expertise hydrique
François Godin, ing., Direction de l'expertise hydrique
Jacinthe Girard, inspectrice, Direction régionale du Bas-Saint-Laurent et de la
Gaspésie-Île-de-la-Madeleine(DBGI)
Michel Levasseur, biologiste, direction régionale de la Côte-Nord (DCN)

MINISTÈRE DES TRANSPORTS, DE LA MOBILITÉ DURABLE ET DE
L'ÉLECTRIFICATION DES TRANSPORTS

Michel Michaud, conseiller en recherche et chargé de projet en adaptation
aux changements climatiques, (DCRI)
Corina Nicorici, conseillère en recherche, géomorphologue (DCRI)
Isabelle Falardeau, chargée de projet, géog., M Sc. Eau, direction de
l'environnement et de la recherche(DENV)
Benoit Vigneault, conseiller en environnement, géomorphologue M. Sc.
(DENV)
Marie-Hélène Grenon, ingénieure, DGCN
Simon Bickay, biologiste, DGCN
Rosaire-Gil Arsenaul, ing., Centre de services des Îles-de-la-Madeleine,
DGBGI
Yves Blanchard, géographe, B. Sc., DGBGI
Tristan Caron, géomorphologue, M. Sc., DGBGI

MINISTÈRE DE LA SÉCURITÉ PUBLIQUE

Yvon Jodoin, cartographe, Ministère de la Sécurité Publique

MRC ET MUNICIPALITÉ

Paul Gingras, aménagiste, MRC de la Mitis
Serge Bourgeois, Directeur de l'aménagement du territoire et de l'urbanisme,
Municipalité des Îles-de-la-Madeleine

ÉQUIPE DE RECHERCHE

Pascal Bernatchez, Ph. D., Professeur et titulaire, LDGIZC, UQAR

Myriane Houde-Poirier, M. Sc., professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR

David Didier, Candidat au doctorat, LDGIZC, UQAR

Maud Touchette, M. Sc., professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR

Catherine Bruyère, B. Sc., candidate à la maîtrise, LDGIZC, UQAR

Denys Dubuc, B. Sc., LDGIZC, UQAR

Valérie Hallé, B. Sc., LDGIZC, UQAR

Jean David Jalbert-Dupuis, B. Sc., LDGIZC, UQAR

Catherine Leblanc-Jomphes, B. Sc., LDGIZC, UQAR

Audrey Mercier-Rémillard, Ph. D., LDGIZC, UQAR

AUTRES COLLABORATEURS

Benoît Tremblay, botaniste, Direction de l'expertise en biodiversité, MDDELCC

Cédric Villeneuve, technicien en cartographie écologique, Direction de l'expertise en biodiversité, MDDELCC

DAEMH : Direction de l'agroenvironnement et du milieu hydrique

DGBGI : Direction générale du Bas-Saint-Laurent-Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine

DGCN : Direction générale de la Côte-Nord

DCRI : Direction de la coordination de la recherche et de l'innovation

DENV : Direction de l'environnement

DGPE : Direction générale des politiques de l'eau

SE : Service de l'environnement

RÉFÉRENCE SUGGÉRÉE

Houde-Poirier, M., Didier, D., Bernatchez, P., Touchette, M. 2018. Méthode de détermination de la ligne des hautes eaux pour le domaine maritime dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans un contexte de changements climatiques : Rapport final. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport final remis au ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte aux changements climatiques et au ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec, décembre 2018, 222 p. + annexes.

SYNTHÈSE DES CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'analyse comparative entre la ligne des hautes eaux déterminée par la méthode botanique experte (LHEB) et la limite déterminée à partir de critères éco-géomorphologiques (LG) montre que les facteurs déterminants quant à l'altitude et la position des limites par rapport à la mer sont la localisation le long de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent (amplitude marégraphique et exposition aux vagues), le type de côte et l'état de la côte.

Les limites identifiées à partir des critères éco-géomorphologiques définis dans le cadre de ce projet étant plus éloignées de la mer comparativement aux limites basées sur le niveau marégraphique (méthode hydrologique actuelle) ou à celles d'une LHEB déterminée au niveau de la haute-plage, la méthode éco-géomorphologique permet d'optimiser la stabilité de la position d'une LG. L'emplacement des limites éco-géomorphologiques répond aux plus hauts niveaux d'eau et de vagues dans des conditions météo-marines normales (incluant les tempêtes normales). Une LG déterminée par cette méthode représente adéquatement la limite entre l'écosystème marin et l'écosystème terrestre ; elle est cohérente avec la morphologie et la dynamique intrinsèques aux milieux côtiers maritimes.

Il a été observé que le niveau de récurrence 2 ans (méthode hydrologique actuelle), qui n'inclut pas l'effet des vagues, n'était pas adéquat en milieu côtier le long du Saint-Laurent. Sur les 12 sites instrumentés, la fréquence de surpassement de ce niveau statistique par les niveaux d'eau moyens et totaux mesurés à la côte est relativement élevée, traduisant la nécessité d'inclure l'effet des vagues à la côte dans ce genre de méthode statistique. La fréquence de dépassement semble liée au marnage le long du Saint-Laurent. La prédominance des marées ou des vagues caractérisant le régime côtier, qui varie selon la localisation, appert donc être un facteur déterminant quant au surpassement du niveau de récurrence 2 ans.

La possibilité d'adapter la méthode hydrologique actuelle en y intégrant les hauteurs significatives maximales des vagues mesurées à la côte a pu être confirmée dans le cadre de la présente étude. Sur les 12 sites étudiés, en ajoutant, au niveau de récurrence 2 ans statistique actuel, les mesures de niveaux d'eau et de vagues prises *in situ*, on obtient une bonne concordance avec le niveau d'eau total mesuré à la côte. Les limites obtenues grâce aux méthodes botanique experte, éco-géomorphologique et hydrodynamique côtière (hydrologique adaptée) sur ces 12 sites sont bien corrélées entre elles et, donc, représentent bien la dynamique côtière locale. Il reste que le développement d'une méthode hydrodynamique côtière à l'échelle de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent requiert davantage de données et d'efforts consacrés à la modélisation des hauteurs de vagues à la côte.

L'analyse des séries temporelles mesurées aux 12 sites témoins dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent a permis d'observer que l'altitude des plus hautes vagues enregistrées à la côte était significativement corrélée à l'altitude des

critères éco-géomorphologiques utilisés pour le positionnement d'une LG sur les côtes basses meubles. Les LG déterminées localement sur ces types de côtes pourraient donc constituer une référence altitudinale en termes de gestion des zones côtières dans une optique de changements climatiques.

À la lumière des résultats obtenus, il est recommandé de prioriser une approche basée sur des critères éco-géomorphologiques pour le domaine maritime dans l'ensemble de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent, incluant l'archipel des Îles-de-la-Madeleine, en ce qui a trait à l'application de la PPRLPI. Il reste qu'une méthode alternative doit être prévue à la politique pour des cas particuliers où la méthode éco-géomorphologique n'est pas applicable.

Finalement, la ligne des hautes eaux et la PPRLPI impliquent nécessairement de s'intéresser à la gestion des zones côtières, qui rapporte aux bandes riveraines dans l'application de la politique. Il appert pertinent de revoir la largeur de ces bandes pour le domaine maritime et de débiter une réflexion quant à l'équivalence des systèmes côtiers par rapport à la protection des écosystèmes et à l'aménagement. Il est recommandé de revoir minimalement la largeur de la bande riveraine, voire les règlements d'aménagement et de zonage, notamment pour les côtes à flèche littorale.

TABLES DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	25
1.1. Mise en contexte et problématique	25
1.2. Objectifs du projet et du rapport	27
2. REVUE DE LITTÉRATURE	28
2.1. Méthodes de détermination de la LHE	28
2.1.1. Indicateurs côtiers visibles	28
2.1.2. Niveaux marégraphiques et niveaux d'eau total	29
2.1.3. Analyse d'images numériques et LiDAR	31
2.2. Position des différents indicateurs sur la côte	32
2.3. Les lignes de référence au Canada	34
2.3.1. Québec	35
2.3.2. Nouvelle-Écosse	36
2.3.3. Nouveau-Brunswick	37
2.3.4. Île-du-Prince-Édouard	37
2.3.5. Terre-Neuve-et-Labrador	38
2.3.6. Colombie-Britannique	39
2.4. Lignes de référence à l'international	40
2.4.1. Les États-Unis	40
2.4.2. France	41
2.4.3. Royaume-Uni	44
2.4.4. Australie– Nouvelle-Galles du Sud (New South Wales)	45
2.4.5. Australie – Queensland	46
2.4.6. Nouvelle-Zélande	50
2.5. En résumé	55
3. ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RESULTATS	59
3.1. Retour sur l'atelier 1	59
3.1.1. Lacunes et problématiques	63
3.1.2. Solutions	64
3.2. Détermination d'une ligne des hautes eaux à partir de critères géomorphologiques	64
3.2.1. Typologie des critères éco-géomorphologiques	65
3.2.2. Cas géomorphologiques types	74

3.3.	Analyse comparative entre la méthode botanique experte et une approche basée sur les critères éco-géomorphologiques	88
3.3.1.	Analyse comparative de l'altitude des limites LG et LHEB ..	95
3.3.2.	Analyse comparative des distances entre les limites	107
3.3.3.	Discussion sur l'analyse comparative entre les deux limites	119
3.3.4.	Analyse comparative des limites aux Îles-de-la-Madeleine	122
3.4.	Proposition d'une méthode éco-géomorphologique adaptée au milieu côtier	135
3.4.1.	Les côtes exposées.....	135
3.4.2.	Les côtes abritées	144
3.4.3.	Organigramme d'aide à la décision.....	148
3.5.	Retour sur les ateliers 2	158
3.6.	Évaluer la concordance entre les méthodes hydrologique, éco- géomorphologique, hydrologique actuelle (0-2 ans) et hydrologique dynamique	163
3.6.1.	Méthodologie	163
3.6.2.	Surpassement du niveau de récurrence 2 ans.....	168
3.6.3.	Surpassement de la LHEB	183
3.6.4.	Surpassement de la LG	188
3.6.5.	Analyse de surpassement des limites à la côte	195
3.6.6.	Limites et ouvertures potentielles	202
4.	RECOMMANDATIONS.....	204
5.	CONCLUSION.....	208
6.	REFERENCES	212
	ANNEXE A	223
	ANNEXE B	227
	ANNEXE C	226
	ANNEXE D	231

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1.	Classification des variables dans l'index de sensibilité des côtes de la Nouvelle-Zélande.....	54
TABLEAU 2.	Intervenants ayant répondu au questionnaire envoyé avant l'Atelier 1.....	60
TABLEAU 3.	Problématiques soulevées dans le questionnaire envoyé avant l'Atelier 1.....	61
TABLEAU 4.	Lacunes et problématiques relevées par les participants lors des cinq ateliers de décembre 2016.....	63
TABLEAU 5.	Définition des principaux types de côte du Québec maritime selon le LDGIZC.....	85
TABLEAU 6.	Localisation des profils et types de côtes associés.....	88
TABLEAU 7.	Types de côtes étudiés selon la localisation.....	91
TABLEAU 8.	Distribution des altitudes pour la LG et la LHEB selon la localisation.....	96
TABLEAU 9.	Distribution des altitudes pour la LG et la LHEB selon le type de côte.....	98
TABLEAU 10.	État de la côte pour chaque type de côte étudié.....	99
TABLEAU 11.	Distribution des altitudes en mètre pour la LG et la LHEB selon l'état de la côte.....	100
TABLEAU 12.	Position verticale relative entre les deux limites.....	102
TABLEAU 13.	Profils où une limite n'a pas pu être déterminée.....	103
TABLEAU 14.	Position verticale relative entre les deux limites selon le type et l'état de la côte.....	106
TABLEAU 15.	Distribution des distances entre la LG et la LHEB selon la localisation.....	108
TABLEAU 16.	Distribution des distances entre la LG et la LHEB selon le type de côte.....	110

TABLEAU 17. Distribution des distances entre la LG et la LHEB selon l'état de la côte.....	111
TABLEAU 18. Position horizontale relative entre les deux limites	111
TABLEAU 19. Table de fréquence et des résidus relatifs au test de khi ² de Pearson pour la variable localisation.....	112
TABLEAU 20. Table de fréquence et des résidus relatifs au test de khi ² de Pearson pour la variable type de côte.....	115
TABLEAU 21. Sites étudiés sur l'archipel des Îles-de-la-Madeleine.....	124
TABLEAU 22. Types de côtes et état des profils étudiés selon la localisation.....	125
TABLEAU 23. Position verticale relative entre les deux limites	128
TABLEAU 24. Position verticale relative entre les deux limites en fonction du type et de l'état de la côte	129
TABLEAU 25. Position horizontale relative entre les deux limites	130
TABLEAU 26. Position horizontale relative entre les deux limites en fonction du type et de l'état de la côte.....	131
TABLEAU 27. Avantages et inconvénients de la méthode éco-géomorphologique énoncés lors des ateliers 2	159
TABLEAU 28. Déploiement des capteurs sur les sites suivis dans le cadre du projet sur la ligne des hautes eaux.....	165
TABLEAU 29. Probabilité de dépassement des limites par les niveaux marins moyens aux sites instrumentés	194
TABLEAU 30. Probabilité de dépassement des limites par les niveaux marins totaux aux sites instrumentés	194

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.	Représentation schématique des niveaux d'eau sur la côte et du jet de rive qui se compose du jet de rive et du <i>setup</i>	31
FIGURE 2.	Zones maritimes du Canada (Pêches et Océans Canada, 2016)	35
FIGURE 3.	Aléa de submersion côtière - adaptation aux changements climatiques (tiré de AusencoSandwell, 2011).....	40
FIGURE 4.	Zones maritimes des États-Unis et limites entre le domaine privé et le domaine de l'État (tiré de NOAA Office of Coast Survey, 2013)	41
FIGURE 5.	Délimitation de la zone côtière dans l'État du Queensland, Australie (tirée de State of Queensland, 2013a).....	48
FIGURE 6.	Profil type de plage sableuse à l'état stable (modifiée de Fraser et Bernatchez, 2006).....	66
FIGURE 7.	Profil type de plage sableuse à l'état actif (modifiée de Fraser et Bernatchez, 2006).....	66
FIGURE 8.	Profil type d'une côte à falaise (modifiée de Fraser et Bernatchez, 2006).....	67
FIGURE 9.	Sommet d'un escarpement utilisé comme critère géomorphologique ; (A) Escarpement vertical ; (B) près de la verticale ; (C) en surplomb ; (D) avec un talus.....	69
FIGURE 10.	Critères relatifs à une dune	69
FIGURE 11.	Déplacements de la ligne de rivage mesurés annuellement sur les terrasses de plage et les cordons littoraux du réseau de suivi de bornes du LDGIZC entre 2000 et 2017	71
FIGURE 12.	Critères pour déterminer l'inclusion ou l'exclusion d'une terrasse de plage dans les cas de côtes mixtes	72
FIGURE 13.	Microfalaise d'érosion au front du schorre supérieur montrant la nature du substrat et les sédiments vaseux. Le schorre repose sur une unité de slikke et d'argile marine postglaciaire (unité gris-bleu à la base).....	74
FIGURE 14.	Côte à terrasse de plage (Longue-Pointe-de-Mingan, Côte-Nord).....	75

FIGURE 15.	Terrasse de plage composée de sédiments de la taille des galets (Anse-au-Griffon, Gaspésie)	76
FIGURE 16.	Terrasse de plage présentant une dune bordière (Longue-Pointe-de-Mingan, Côte-Nord)	76
FIGURE 17.	Côte à flèche littorale (Rivière-Saint-Jean, Côte-Nord) ; la face exposée (ou extérieure) se trouve à droite et la face abritée (ou intérieure) se trouve à gauche.....	77
FIGURE 18.	Côte dunaire (Sandy Hook, Îles-de-la-Madeleine).....	78
FIGURE 19.	Côte à marais maritime frangeant (Baie des Bacon, Côte-Nord).....	79
FIGURE 20.	Côte à marais maritime abrité (Cap-Marteau, Bas-Saint-Laurent)	79
FIGURE 21.	Côte à falaise meuble (Longue-Pointe-de-Mingan, Côte-Nord).....	80
FIGURE 22.	Versant continental en Haute-Gaspésie (vue de profil)	81
FIGURE 23.	Versant continental en Haute-Gaspésie (vue frontale)	81
FIGURE 24.	Côte rocheuse sans falaise (Cap-Marteau, Bas-Saint-Laurent)	82
FIGURE 25.	Côte rocheuse sans falaise dont l'estran est meuble (Saint-Simon, Bas-Saint-Laurent).....	82
FIGURE 26.	Côte rocheuse sans falaise dont l'estran est rocheux (Kegaska, Côte-Nord)	83
FIGURE 27.	Côte artificialisée par un enrochement (Godbout, Côte-Nord)	83
FIGURE 28.	Localisation des profils étudiés dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent	90
FIGURE 29.	Méthodologie d'acquisition des données utilisée pour les profils ; le trait pointillé représente le trajet suivi avec le DGPS.	94
FIGURE 30.	Médianes des altitudes de LG et de LHEB selon la localisation	96
FIGURE 31.	Médianes des altitudes de LG et de LHEB selon le type de côte. Terrasse de plage (DB) : terrasse de plage avec dune	

	bordière ; ext. : face extérieure ; int. : face intérieure ; Artif. : côte artificialisée.	97
FIGURE 32.	Médiane des altitudes des limites en fonction de l'état de la côte.....	100
FIGURE 33.	Écart type des altitudes de LG et de LHEB selon le type de côte.....	101
FIGURE 34.	Position verticale relative entre les deux limites selon la localisation.....	104
FIGURE 35.	Exemple de profils de flèches littorales : A : face extérieure active ; B : face extérieure végétalisée.....	107
FIGURE 36.	Médiane des distances entre les deux limites selon la localisation.....	108
FIGURE 37.	Médiane des distances entre les limites selon le type de côte	109
FIGURE 38.	Médiane des distances entre les limites selon l'état de la côte	110
FIGURE 39.	Occurrence des scénarios de position relative entre les deux limites selon la localisation.....	113
FIGURE 40.	Distances entre les deux limites selon la position relative et la localisation.....	114
FIGURE 41.	Occurrence des scénarios de position relative entre les deux limites selon le type de côte.....	116
FIGURE 42.	Position horizontale relative entre les deux limites selon le type de côte et la présence de végétation éparses.....	117
FIGURE 43.	Distances entre les deux limites selon la position relative et le type de côte.....	118
FIGURE 44.	Carte de localisation des profils réalisés aux Îles-de-la- Madeleine.....	123
FIGURE 45.	Médiane des altitudes des deux limites selon le type de côte	126
FIGURE 46.	Médiane des altitudes des deux limites selon l'état de la côte	127
FIGURE 47.	Écart type des altitudes des limites selon le type de côte.....	127

FIGURE 48.	Position horizontale relative entre les deux limites selon le type de côte et la présence de végétation éparse	132
FIGURE 49.	Médianes des distances entre les deux limites en fonction de leur position horizontale relative et du type de côte	133
FIGURE 50.	Méthode éco-géomorphologique pour les côtes d'accumulation granulaire végétalisées.....	136
FIGURE 51.	Méthode éco-géomorphologique pour les côtes d'accumulation granulaire actives	137
FIGURE 52.	Méthode éco-géomorphologique pour les côtes dunaires végétalisées.....	138
FIGURE 53.	Méthode éco-géomorphologique pour les côtes dunaires actives	138
FIGURE 54.	Méthode éco-géomorphologique pour les côtes dunaires à terrasse de plage	139
FIGURE 55.	Méthode éco-géomorphologique pour les côtes à marais maritime frangeant	140
FIGURE 56.	Méthode éco-géomorphologique pour les côtes avec lambeaux de schorre.....	140
FIGURE 57.	Méthode éco-géomorphologique pour les côtes rocheuses sans falaise. À gauche de la figure, la LG se situe au front de la végétation éparse ; à droite de la figure, la LG se situe au front du lichen (orangé).	141
FIGURE 58.	Méthode éco-géomorphologique pour les côtes à falaise.....	142
FIGURE 59.	Méthode éco-géomorphologique pour les côtes à falaise à terrasse de plage	142
FIGURE 60.	Méthode éco-géomorphologique pour les côtes artificialisées	143
FIGURE 61.	Méthode éco-géomorphologique pour les côtes artificialisées à terrasse de plage	143
FIGURE 62.	Méthode éco-géomorphologique pour les côtes d'accumulation granulaire abritées.....	145
FIGURE 63.	Méthode éco-géomorphologique pour les côtes d'accumulation granulaire abritées aux Îles-de-la-Madeleine	146

- FIGURE 64.** Organigramme d'aide à la décision pour définir la LG selon les types de côtes et les critères éco-géomorphologiques définis par le LDGIZC..... 151
- FIGURE 65.** Application de la méthode éco-géomorphologique à l'embouchure des rivières. Le trait noir marque la LG parallèle à la côte alors que les points noirs marquent la fin de l'application de la méthode pour le domaine maritime. 153
- FIGURE 66.** Localisation de la LG sur les côtes à falaise artificialisées 155
- FIGURE 67.** Îlots de végétation côtière devant les dunes aux Îles-des-la-Madeleine 157
- FIGURE 68.** Localisation des capteurs de pression pour la mesure des vagues, des profils topographiques (mis à part les Îles-de-la-Madeleine) et des points de modélisations des vagues au large issus du modèle WW3 (représentation des vagues significatives maximales Hs max (m) sur la période 1980-2010; Bernatchez et al., 2017) 164
- FIGURE 69.** Exemple de capteurs RBR nécessaires aux inventaires en zone intertidale (a) ; exemple d'installation sur roc (b) ; et en milieu sableux (c) 165
- FIGURE 70.** Représentation de la variabilité des profils au DGPS suivis par des capteurs de pression pour les mesures de vagues. La courbe en bleu dans l'encadré du profil de Maria représente le profil de St-Omer, alors que celle du profil de Tourelle est un agrandissement du profil sur la portion de haut estran au pied de la falaise meuble. 167
- FIGURE 71.** Élévation du jet de rive (*runup*) (gauche) en fonction des vagues significatives à la côte à l'Anse au Lard et du niveau d'eau total mesuré par la caméra à Pointe-Lebel 168
- FIGURE 72.** Séries temporelles des niveaux marins moyen et total à Cacouna et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surpassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 170
- FIGURE 73.** Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Cap-des-Rosiers et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surpassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 171

- FIGURE 74.** Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Pointe-Fortin et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surpassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 172
- FIGURE 75.** Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Maria et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surpassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 173
- FIGURE 76.** Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Trois-Pistoles et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surpassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 174
- FIGURE 77.** Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Longue-Pointe-de-Mingan et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surpassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 175
- FIGURE 78.** Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Paspébiac et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surpassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 176
- FIGURE 79.** Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Penouille et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surpassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 177
- FIGURE 80.** Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Pointe-Lebel et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surpassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 178
- FIGURE 81.** Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Saint-Omer et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surpassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 179

- FIGURE 82.** Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Saint-Ulric et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surpassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 180
- FIGURE 83.** Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Saint-Simon et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surpassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 181
- FIGURE 84.** Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Tourelle (Sainte-Anne-des-Monts) et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surpassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 182
- FIGURE 85.** Distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics de niveaux marins total et moyen à Cacouna. S'il y a surpassement de la LHEB, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 183
- FIGURE 86.** Distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics de niveaux marins total et moyen à Trois-Pistoles (marais de Cap-Marteau sur le secteur de la flèche et de la terrasse de plage). S'il y a surpassement de la LHEB, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 184
- FIGURE 87.** Distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics de niveaux marins total et moyen à Cap-des-Rosiers (CDR), Tourelle (Sainte-Anne-des-Monts) et Penouille. S'il y a surpassement de la LHEB, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 185
- FIGURE 88.** Distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics de niveaux marins total et moyen à Paspébiac, Saint-Siméon et Saint-Omer. S'il y a surpassement de la LHEB, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 186
- FIGURE 89.** Distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics de niveaux marins total et moyen à Pointe-Lebel, Pointe-Fortin et Longue-Pointe-de-Mingan. S'il y a surpassement de la LHEB, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 187

- FIGURE 90.** Distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics de niveaux marins total et moyen à Cap-des-Rosiers, Tourelle et Penouille. S'il y a surpassement de la LG, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 188
- FIGURE 91.** Distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics de niveaux marins total et moyen à Paspébiac, Saint-Siméon et Saint-Omer. S'il y a surpassement de la LG, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 189
- FIGURE 92.** Distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics de niveaux marins total et moyen à Maria. S'il y a surpassement de la LG, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 190
- FIGURE 93.** Distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics de niveaux marins total et moyen à Cacouna et Trois-Pistoles (secteur de la flèche et de la terrasse de plage de Cap-Marteau). S'il y a surpassement de la LG, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 191
- FIGURE 94.** Distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics de niveaux marins total et moyen à Saint-Ulric. S'il y a surpassement de la LG, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 192
- FIGURE 95.** Distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics de niveaux marins total et moyen à Pointe-Lebel, Pointe-Fortin et Longue-Pointe-de-Mingan. S'il y a surpassement de la LG, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas. 193
- FIGURE 96.** Élévation des limites en fonction du marnage relatif (RTR) et du marnage (m) pour l'ensemble des sites étudiés, excluant les Îles-de-la-Madeleine : Géo. réfère à la LG ; 0-2 ans réfère au niveau de récurrence 2 ans ; et Bot. réfère à la LHEB..... 196
- FIGURE 97.** Fréquence de dépassement du niveau de récurrence 2 ans selon le marnage 197
- FIGURE 98.** Corrélation entre la LHEB (LHE Botanique), la LG (LHE Géomorphologique), la hauteur des vagues au large (Hmax), la PMSGM et le niveau de récurrence 2 ans (LHE 0-2 ans) sans les vagues pour l'ensemble des sites. 198
- FIGURE 99.** Corrélation entre la LG (LHE Géomorphologique), la LHEB (LHE Botanique) et le niveau de récurrence 2 ans (LHE 0-2 ans) (en- haut) et la PMSGM la LG et la LHEB (en-bas) pour l'ensemble des sites..... 199

- FIGURE 100.** Relation entre le niveau de récurrence 2 ans (LHE 0-2 ans) auquel est ajouté un paramètre de vague au large ou à la côte et le niveau marin total maximal observé à la côte. 200
- FIGURE 101.** Relations entre les différentes limites et le niveau déterminé par une méthode hydrodynamique côtière (0-2 ans total), qui intègre l'effet des vagues à la côte. 201
- FIGURE 102.** Relations entre les altitudes des limites et les niveaux marins totaux maximaux à la côte (en-haut). Le graphique du bas représente, pour chaque capteur (axe horizontal), l'élévation de chaque limite (sous forme de points) et l'écart qui les sépare du niveau marin total au capteur (bandes verticales). La moyenne des écarts (MD) est représentée par la bande jaune et est inscrite dans le coin supérieur gauche du panneau inférieur. Les écarts absolus entre le NMT et chaque type de limite sont représentés en rouge (niveau de récurrence 2 ans), vert (LG) et bleu (LHEB). 202

LISTE DES ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

CEHQ : Centre d'expertise hydrique du Québec (lors du dépôt de ce projet, les unités du CEHQ venaient d'être intégrées au MDDELCC).

DGPS : Système de positionnement global différentiel (*differential global positioning system*).

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

LG : Limite éco-géomorphologique

LHE : Ligne des hautes eaux

LHEB : Ligne des hautes eaux, botanique

LHEM : Ligne des hautes eaux moyennes

LHEMP : Ligne des hautes eaux moyennes de printemps

LHEO : Ligne des hautes eaux ordinaires

LHHEM : Ligne des plus hautes hautes eaux moyennes

NET : Niveau d'eau total

NMM : Niveau marin moyen

PMSGM : Pleine mer supérieure de grande marée

PMSMM : Pleine mer supérieure de marée moyenne

PPRLPI : Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables.

GLOSSAIRE

Arrière-plage : zone qui peut être submergée lors de tempêtes exceptionnelles, souvent caractérisée par la présence de gros débris. Se situe entre la haute-plage (ou le haut estran si la haute-plage est inexistante) et l'arrière-côte.

Bas estran : zone couverte par la marée, située entre la plage sous-marine (avant-plage) et le haut estran. La flexure sépare le bas estran du haut estran, dont la granulométrie et la pente diffère.

Berne : corps sédimentaire sableux situé sur la haute-plage créé lors de période d'accumulation. Plusieurs bermes peuvent se succéder sur un profil de plage.

Côte à falaise : escarpement côtier dont la hauteur fait plus de 1,5 m. L'escarpement peut être constitué de roche consolidée ou de dépôts non consolidés (argile, limon, sable, gravier, galet, blocs, matière organique). L'escarpement peut également avoir une portion rocheuse et une portion non consolidée (définition adaptée de Bernatchez et Drejza, 2015).

Côte à marais maritime : zone d'accumulation de sédiments fins colonisée par de la végétation herbacée (Bernatchez et Drejza, 2015).

Côte artificialisée : côte présentant un ouvrage de protection au front de l'arrière-plage (côte d'accumulation granulaire, côte dunaire ou côte rocheuse sans falaise), sur le schorre supérieur (marais maritime) ou devant l'escarpement (côte à falaise) dans le cadre de l'application de la méthode éco-géomorphologique.

Côte d'accumulation granulaire : côte basse d'accumulation de sable ou de gravier littoral. Ce type de côte inclut les terrasses de plage, les flèches littorales, les tombolos et les cordons littoraux.

Côte dunaire ou dunifiée : côte principalement formée de sable accumulé au fil du temps par des processus éoliens qui ont modelé un bourrelet ou une succession de bourrelets (dunes).

Côte rocheuse sans falaise : côte rocheuse à pente douce, sans falaise, possédant parfois des écueils rocheux (Bernatchez et Drejza, 2015).

Escarpement : paroi verticale ou près de la verticale dont le talus se situe entre 15° et la verticale ; le talus peut également être en surplomb (CETMEF, 2013). L'escarpement peut s'apparenter à une microfalaise (hauteur inférieure à 1,5 m) ou à une falaise (hauteur de 1,5 m et plus).

Falaise morte : falaise qui n'est plus soumise à l'action de l'érosion, qui est soustraite à l'influence de la mer.

Flexure : délimitation entre le bas et le haut estran, marquant une rupture de pente et souvent un changement de granulométrie.

Haut estran : zone couverte par la marée, située entre le bas estran et la haute-plage (ou l'arrière-plage si la haute-plage est inexistante).

Haute-plage : zone submergée par les houles de tempêtes normales, située entre le haut estran et l'arrière-plage. Sa partie inférieure débute à la ligne de rivage. La haute-plage est normalement colonisée par de la végétation éparse, parfois dense.

Ligne de rivage : limite géomorphologique qui correspond soit à la limite de la végétation herbacée éparse, le cas échéant, sinon à la limite de la végétation dense, à la base d'un ouvrage de protection rigide ou à la base d'une falaise. Elle correspond approximativement à la limite des hautes mers maximales.

Ligne des hautes eaux (PPRLPI) : ligne qui, aux fins de l'application de la PPRLPI, sert à délimiter le littoral et la rive (MDDELCC, 2015a).

Limite géomorphologique : limite déterminée sur la base de critères éco-géomorphologiques tels qu'établis par la méthode éco-géomorphologique.

Trait de côte : limite géomorphologique correspondant au sommet d'un talus côtier. C'est la limite de la zone d'influence des processus côtiers, la limite entre la côte et l'arrière-côte.

Végétation éparse : lorsque le recouvrement de végétation est inférieur à 75%.

Végétation dense : lorsque le recouvrement de végétation est supérieur à 75%.

Versant continental : versant dont le profil est convexe, généralement végétalisé jusqu'à la mer (CETMEF, 2013), ne reculant pas en réponse à l'attaque des agents hydrodynamiques côtiers (Pinot, 1998) tels que les vagues et les marées.

1. INTRODUCTION

1.1. Mise en contexte et problématique

Les écosystèmes côtiers constituent des milieux importants en termes de diversité écologique. Au Québec, la *Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables* (PPRLPI) élaborée par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), conformément à la Loi sur la qualité de l'environnement (LQE), sert de cadre légal pour établir des normes de protection minimale pour prévenir la dégradation de ces milieux, en conserver l'intégrité écologique et pour assurer la sécurité des personnes et des biens (MDDELCC, 2015a).

L'application des normes et de la réglementation dépend de la ligne des hautes eaux (LHE) qui délimite deux zones : le littoral et la rive. La rive réfère à une bande minimale de 10 ou 15 mètres s'étendant depuis la LHE vers les terres ; le littoral s'étend de la LHE jusqu'au milieu du cours ou du plan d'eau. À quelques exceptions près, les constructions, ouvrages ou travaux sont en principe interdits dans la zone littorale (MDDELCC, 2015a). La délimitation adéquate de la ligne des hautes eaux est donc primordiale. Bien que la politique propose plusieurs méthodes pour délimiter la LHE, elle privilégie la méthode botanique (experte ou simplifiée) qui consiste à déterminer la limite de prédominance entre les plantes aquatiques et terrestres, ou s'il n'y a pas de plantes aquatiques, à la limite inférieure des plantes terrestres, c'est-à-dire l'endroit où les plantes terrestres s'arrêtent (MDDELCC, 2015b). La méthode privilégiée pour définir la LHE en présence d'un ouvrage de retenue des eaux est la cote maximale d'exploitation. En présence d'un mur de soutènement, la LHE se situe au sommet de l'infrastructure. La PPRLPI prévoit également la méthode hydrologique, qui établit la LHE à l'altitude des inondations basée sur les statistiques des crues de récurrence 2 ans (MDDELCC, 2015a).

Les méthodes de détermination de la LHE prévues dans la PPRLPI s'appliquent sans distinction aux milieux fluvial, lacustre et maritime. Actuellement, la délimitation de la LHE basée sur les données marégraphiques ne tient pas compte des conditions de vagues, de vent et de tempêtes, ce qui n'est pas adaptée au milieu maritime du Saint-Laurent.

Au cours de la dernière décennie, plusieurs difficultés ont été soulevées par les intervenants qui ont à délimiter la LHE, notamment par les arpenteurs, les inspecteurs municipaux, le personnel des différents ministères, les aménagistes du territoire, etc. Bien que ces difficultés soient rencontrées dans de nombreuses situations (milieux agricoles, sites perturbés, milieux humides, etc.), la détermination de la LHE est particulièrement problématique en milieu côtier (estuaire et golfe du Saint-Laurent), où la marée et surtout les vagues peuvent faire migrer rapidement cette limite. Par conséquent, il est

problématique actuellement d'appliquer des normes et réglementations à partir de cette limite. Par exemple, lors des travaux de protection des infrastructures routières, le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET) et ses partenaires doivent tenir compte de cette limite, ce qui n'est pas forcément évident en milieu côtier. Parmi les problèmes les plus souvent évoqués, on retrouve :

- Application réglementaire difficile sur un repère (LHE) fortement mobile en milieu maritime ;
- Limite de végétation côtière fluctuant de manière significative latéralement selon la saison et le moment où les relevés d'arpentage sont effectués ;
- Faible concordance entre la limite botanique et le niveau de récurrence 2 ans causant des problèmes d'interprétation entre les différents intervenants concernés et un flou légal lors de l'application des normes.

La tempête du 6 décembre 2010 a montré l'importance de revoir les critères et les méthodes d'identification de la LHE. Dans les secteurs fortement endommagés par les vagues de tempête, le recul moyen a été de 3,9 m, mais a atteint un recul maximal de 15 m (Quintin et al., 2013). Dans certaines municipalités, plus de 60% des ouvrages de protection ont cédé, entraînant un recul aussi important derrière les ouvrages que dans les zones naturelles. À la suite de cet événement, sur la base de relevés d'arpentage foncier et de la cote de récurrence 2 ans, des résidents ont pu remblayer immédiatement le haut de plage et une partie de la plage. Certains en ont même profité pour gagner du terrain sur le domaine littoral sur la base de ce critère hydrologique, au détriment des écosystèmes sensibles. Ces lacunes posent aussi un problème au niveau des zones inondables en milieu maritime (submersion côtière), car l'écart entre le niveau d'eau mesuré au marégraphe lors de cette tempête et celui atteint sur le terrain a été en moyenne de 1,5 m plus élevé sur le terrain et a atteint localement une valeur maximale de 3,5 m. Le niveau d'eau réellement atteint sur la côte est non seulement déterminé par le niveau marégraphe et la surcote, mais aussi par la hauteur des vagues et leur patron de déferlement qui est conditionné par la géomorphologie de la zone côtière (Bernatchez et al., 2011 ; Didier et al., 2015).

Dans le contexte des changements climatiques et de la hausse accélérée du niveau de la mer (Vermeer et Rahmstorf, 2009 ; Rahmstorf et al., 2012 ; Horton et al., 2015), la problématique et les lacunes associées à l'identification de la LHE avec les méthodes proposées par la PPRLPI n'en seront qu'exacerbées. En plus de la hausse du niveau marin qui va modifier de manière verticale cette limite, la réduction du couvert de glace va exposer la côte à un plus grand nombre d'événements de tempête ce qui aura un effet sur la migration latérale de la LHE (Bernatchez et al., 2008 ; Senneville et al., 2014). Il devient donc important de revoir la méthodologie de détermination de la LHE en milieu maritime en y intégrant les plus récentes connaissances scientifiques en géomorphologie et océanographie et en intégrant notamment les phénomènes marégraphiques, hydrodynamiques et les projections climatiques. Une

méthodologie adaptée au milieu maritime et faisant consensus au sein des utilisateurs permettra l'application d'un cadre législatif efficace afin de protéger tant les écosystèmes que le cadre bâti en milieu maritime. Le cadre législatif doit se baser sur une LHE identifiée par une approche adéquate qui représente bien la réalité terrain.

1.2. Objectifs du projet et du rapport

L'objectif principal du projet vise à préciser la méthode de détermination de la LHE en milieu côtier pour le territoire bordant l'estuaire moyen, l'estuaire maritime et le golfe du Saint-Laurent au Québec, en tenant compte des changements climatiques appréhendés.

Ce rapport vise dans un premier temps à compléter les objectifs 1 et 2, lesquels avaient été partiellement répondus dans le rapport d'étape 2 (Touchette et al., 2017), puis à répondre aux objectifs 3 et 4.

Objectif 1 : expliquer la méthode de détermination de la LHE à partir de critères géomorphologiques ;

Objectif 2 : évaluer si les critères géomorphologiques sont mieux adaptés que la méthode botanique en milieu côtier et si une approche mixte (éco-géomorphologique) serait plus appropriée ;

Objectif 3 : évaluer la possibilité d'adapter la méthode hydrologique actuelle (0-2 ans) au contexte maritime, notamment en mesurant le "runup" des vagues sur la base d'une modélisation calibrée à l'aide de données provenant de 12 sites installés sur les berges de l'estuaire et du golfe Saint-Laurent. Ces sites seront choisis en concertation avec le comité de suivi en fonction de l'amplitude du marnage, de l'exposition aux vagues et des types d'estran représentatifs de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent.

Objectif 4 : évaluer la concordance entre la LHE déterminée par des critères géomorphologiques, celle déterminée par la méthode hydrologique actuelle (0-2 ans) et celle adaptée par l'UQAR qui tiendrait compte du "runup".

Objectif 5 : rédiger un guide décrivant les méthodes les plus appropriées pour identifier sur le terrain la LHE pour le milieu côtier. Ce guide s'adresserait notamment aux inspecteurs municipaux, aux arpenteurs et aux analystes des directions régionales du MDDELCC et du MTMDET.

Les résultats obtenus relatifs aux quatre premiers objectifs spécifiques sont exposés dans le présent rapport.

2. REVUE DE LITTÉRATURE

La ligne des hautes eaux est une limite utilisée à travers le monde tant pour délimiter le secteur public du secteur privé que pour la gestion des zones côtières et des risques naturels. Les indicateurs utilisés et les méthodes de détermination de cette ligne varient grandement. Il n'y a donc pas de définition ni d'interprétation unique d'une LHE (Liu et al., 2014b). Selon Shalowitz (1964), la ligne des hautes eaux (*high water line*) réfère à un terme général associé à un niveau marégraphique mais pas à une période spécifique de hautes eaux. Parallèlement, une laisse des hautes eaux (*high water mark*) est associée à une évidence physique laissée par le jet de rive des vagues à une certaine hauteur lors d'un épisode récent de hautes eaux (Hicks, 1984). Plusieurs auteurs ont d'ailleurs mis en évidence la difficulté d'établir une ligne de référence des hautes eaux en milieu côtier (Nichols, 1983 ; Morton et Speed, 1998 ; Pajak et Leatherman, 2002 ; Boak et Turner, 2005 ; Cole, 2007 ; Liu et al., 2014a). Ces milieux dynamiques se transforment au gré des saisons et des effets des tempêtes, des marées, des courants, des vagues et des glaces. L'identification d'une simple ligne indicatrice dans de tels environnements représente un défi considérable (Pajak et Leatherman, 2002 ; Moore et al., 2006 ; Cole, 2007 ; Liu et al., 2014b). Effectivement, la position d'une ligne reste variable à différentes échelles de temps, étant affectée par les niveaux de marée haute, les marées astronomiques, les changements morphologiques de la plage, les événements de tempête, le vent, les vagues, certains événements climatiques cycliques et les variations du niveau marin (Pajak et Leatherman, 2002 ; Boak et Turner, 2005 ; Moore et al., 2006 ; Liu et al., 2014a). Les types de côte, les objectifs visés et les limites relatives aux méthodes et aux données peuvent aussi expliquer la diversité des limites utilisées (Liu et al., 2014b).

La littérature permet de faire ressortir trois types de méthodes utilisés pour définir une limite telle que la LHE en milieu maritime : (1) les méthodes basées sur les indicateurs côtiers visibles (*in situ* ou sur photographies aériennes), (2) les méthodes statistiques basées sur des données marégraphiques et, de manière moins fréquente, (3) les méthodes basées sur l'analyse d'images numériques (Boak et Turner, 2005 ; Moore et al., 2006 ; Almar et al., 2012 ; Liu et al., 2014b).

2.1. Méthodes de détermination de la LHE

2.1.1. Indicateurs côtiers visibles

Les indicateurs côtiers visibles sont variés. Boak et Turner (2005) ont recensé une liste des indicateurs de la ligne de rivage, laquelle est associée à l'interface physique entre la terre et l'eau (Dolan et al., 1980 ; NRC, 1990 ; Boak et Turner, 2005 ; Guariglia et al., 2006). La LHE est identifiée comme indicateur de la ligne de rivage dans cette liste. Dans ce contexte, les indicateurs visibles de la LHE

réfèrent à l'extension vers les terres de la dernière marée haute. Les indicateurs peuvent être une ligne de débris, la limite de sédiment mouillé/sec ou la limite du jet de rive. Il s'agit alors d'une ligne des hautes eaux instantanées (Morton et Speed, 1998 ; Pajak et Leatherman, 2002 ; Boak et Turner, 2005 ; Moore et al., 2006 ; Hanslow, 2007). L'utilisation d'une telle limite implique une variation significative de position en réponse au niveau maximum quotidien de la marée, aux conditions de vent et de vagues ainsi qu'aux changements morphologiques de la plage à court terme (Hanslow, 2007). Comme indicateurs visibles de la ligne de rivage, qui peuvent parallèlement être associés à une LHE, on retrouve les éléments morphologiques suivants : le sommet ou le pied d'une falaise ou d'une dune, le sommet d'une structure de protection, la limite de la végétation (éparse ou dense), la microfalaise d'érosion et la crête d'une berme. Ces indicateurs sont dynamiques dans le temps et l'espace et leur position change en fonction des conditions hydrodynamiques et du transit sédimentaire qui a lieu dans la zone littorale (Boak et Turner, 2005).

La précision des méthodes basées sur des éléments visibles est davantage influencée par l'identification et la localisation des indicateurs mentionnés ci-haut que des instruments et méthodes utilisés. Les conditions de marée et de vagues, les tempêtes ainsi que les tendances saisonnières et la morphologie préexistante de la plage sont des facteurs importants à considérer lors des levés. Ces dernières peuvent influencer de façon significative la position des indicateurs (Boak et Turner, 2005 ; Liu et al., 2014b). Les éléments visibles peuvent être totalement absents par endroit et ainsi rendre plus difficile la détermination d'une ligne de référence (Boak et Turner, 2005 ; Liu et al., 2014a). Parallèlement, d'autres marqueurs laissés sur la plage par le jet de rive lors d'une marée haute, peuvent être présents que pour une courte période, voire totalement absents par endroit (Liu et al., 2014b). Une fois les indicateurs sélectionnés, identifiés et localisés, l'acquisition de données *in situ* nécessite l'utilisation d'un DGPS (*Differential Global Position Satellite System* ou système de positionnement par satellites) et les données acquises le sont souvent à une haute résolution. Le temps nécessaire à l'acquisition de données sur de grands segments de côte est donc assez long, à moins d'utiliser un système mobile de LiDAR terrestre (Didier et al., 2015).

2.1.2. Niveaux marégraphiques et niveaux d'eau total

La méthode statistique réfère à un niveau altitudinal précis. Celui-ci est déterminé par l'intersection d'une élévation verticale sur un profil topographique côtier (Boak et Turner, 2005 ; Moore et al., 2006). L'élévation verticale réfère souvent à un niveau marégraphique, par exemple le niveau moyen des hautes eaux, défini à l'aide des données mesurées par une jauge de marée locale (Moore et al., 2006).

Il est bien documenté que les données issues des stations marégraphiques sous estiment systématiquement le niveau réellement atteint sur les plages, les fluctuations associées aux vagues n'étant pas incluses dans ce type de données

(Morton et Speed, 1998 ; Moore et al., 2006 ; Liu et al., 2014a-b). Cette différence est d'autant plus importante sur les plages sableuses à pente faible (Morton et Speed, 1998 ; Pajak et Leatherman, 2002). Néanmoins, l'utilisation d'un niveau marégraphique reste une méthode davantage répétable, objective et élimine l'effet des variations des conditions océaniques. La position d'une limite associée à un niveau marégraphique variera seulement en fonction des changements morphologiques de la plage (Moore et al., 2006).

On remarque une certaine variabilité quant aux données utilisées avec la méthode statistique. Un rapide coup d'œil à la nomenclature utilisée à travers le monde par rapport à la LHE permet de faire ressortir le terme ligne des hautes eaux ordinaires (LHEO ; ex. Nichols, 1983 ; Olson and Stockdale, 2010 ; Gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2015), qui est aussi considérée comme la ligne des hautes eaux moyennes (Coutts, 1989 ; Liu et al., 2014b). La ligne des hautes eaux moyennes (LHEM) est définie comme étant la hauteur moyenne des niveaux de hautes eaux sur une longue période de temps.

La définition de la LHEM peut être interprétée de différente façon, c'est-à-dire que les niveaux de hautes eaux pris en compte et la période de temps sélectionnée dans le calcul peuvent varier. Par exemple, il peut être question de la ligne des hautes eaux moyennes de printemps (LHEMP), qui spécifie la période de l'année à laquelle les niveaux d'eau sont pris en compte dans la détermination de la ligne. Il peut s'agir de la ligne des plus hautes hautes eaux moyennes (LHHEM), qui précise d'utiliser la plus haute de deux marées hautes quotidiennes (types de marée mixte ou diurne) dans le calcul de la hauteur de la ligne (ICSM, 2016).

Briscoe (1983) soulignait également que la signification et la différenciation des termes « hautes eaux » et « marée haute » dans l'utilisation de ces lignes de référence n'a pas été définitivement établie. Le terme « hautes eaux » permet aussi d'intégrer les surcotes qui ont une influence sur l'élévation du niveau de l'eau au-dessus du niveau marégraphique.

La période d'enregistrement utilisée dans le calcul n'est pas non plus fixée de façon universelle et elle aura une influence sur le niveau marégraphique déterminé (Liu et al., 2014b). Cela est d'autant plus vrai dans les régions où les niveaux marégraphiques sont marqués par des changements saisonniers (Cole, 1997). Pour inclure les effets de tous les cycles tidaux, une période de 19 ans, qui inclut le cycle orbital lunaire de 18,6 ans, est suggérée (Liu et al., 2014b-c).

Par ailleurs, la méthode statistique basée sur des données de jauges de marée est uniquement précise pour le secteur immédiat. Des méthodes d'interpolation doivent être appliquées à des secteurs plus éloignés des jauges (Greenfeld, 2002 ; Liu et al., 2014c).

Qui plus est, une limite marégraphique ne coïncidant avec aucun élément physique visible est difficile à utiliser et ne peut être déterminée que par des données topographiques à l'aide d'un DGPS ou d'une station totale (Morton et Speed, 1998 ; Moore et al., 2006). C'est pour cette raison que plusieurs adoptent dorénavant le niveau d'eau total (NET) qui est défini sur la côte par la limite supérieure du jet de rive (Stockdon et al., 2006). Ce dernier peut être déterminé

directement sur la côte dans différentes conditions météo-marines pour établir ou calibrer des équations empiriques de jet de rive (Cariolet et Suanez, 2013 ; Guimarães et al., 2015 ; Suanez et al., 2015).

Le passage des vagues en eaux peu profondes induit une élévation du niveau d'eau à la côte qui est aussi fonction de la géomorphologie de la zone intertidale. Ce jet de rive peut atteindre le trait de côte et varier le long du littoral en fonction des conditions hydro-morphodynamiques. Le jet de rive se compose du *setup*¹, soit une surélévation du plan d'eau à la suite du déferlement des vagues, et du jet de rive, la variabilité haute fréquence de la nappe d'eau autour du *setup* (figure 1). Le *setup* est un niveau moyen alors que le jet de rive oscille au-dessus et en-dessous de ce niveau.

La limite supérieure du jet de rive à l'avantage de tenir compte du niveau marégraphique, des surcotes, des vagues et de la topographie de la zone côtière.

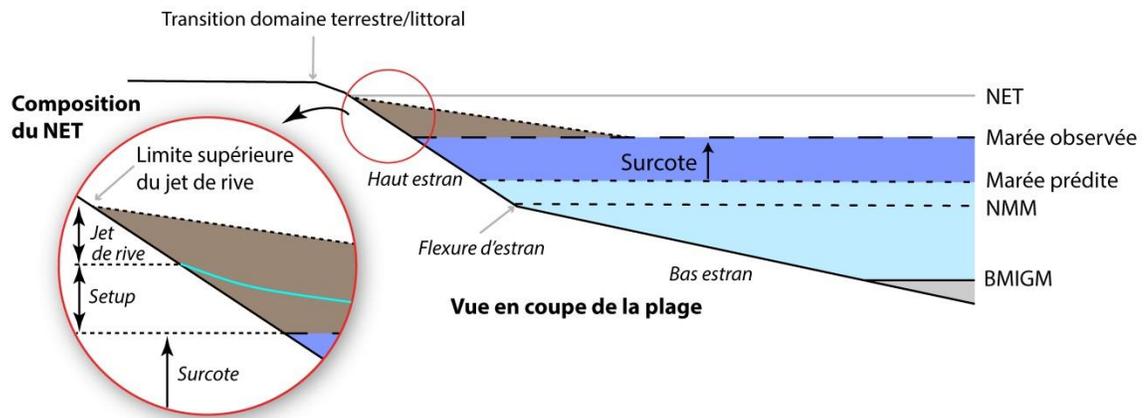


Figure 1. Représentation schématique des niveaux d'eau sur la côte et du jet de rive qui se compose du jet de rive et du *setup*

2.1.3. Analyse d'images numériques et LiDAR

Les indicateurs recensés pouvant être identifiés à l'aide de l'analyse d'images numériques sont la ligne de végétation, la ligne des hautes eaux instantanée (luminosité des pixels) et la limite de sédiment mouillé/sec (classification par la couleur ou la réflectance des pixels ; Boak et Turner, 2005). L'analyse d'images peut être basée sur les contrastes entre les pixels en utilisant différentes bandes

¹ En France, le CETMEF considère le *wave setup* (ou surcote liée à l'effet des vagues) comme étant « une surélévation moyenne (calculée sur une dizaine de minutes) du plan d'eau par transfert d'énergie dans la colonne d'eau suite au déferlement des vagues ».

spectrales (infrarouge, couleur, etc.) (Liu et al., 2014b). L'utilisation d'une classification non-supervisée constitue une méthode plus objective (Boak et Turner, 2005). L'analyse d'images provenant de caméras vidéo est de plus en plus utilisée depuis une décennie (Stockdon et al., 2006 ; Holman et Stanley, 2007 ; Almar, 2012). Ces images permettent d'obtenir en continu les niveaux d'eau totaux atteints sur la côte et d'établir des statistiques de récurrence pour déterminer un niveau de référence.

Il est à noter que la résolution des images satellitaires peut s'avérer insuffisante, la taille des pixels pouvant aller jusqu'à plus d'un mètre (Liu et al., 2014b). Toutefois, les nouveaux capteurs satellitaires disponibles permettent une résolution spatiale de 30 cm, en plus de couvrir de grand territoire.

Avec l'accès grandissant aux données LiDAR, cette technologie devient aussi très intéressante pour déterminer des lignes de référence sur la côte. En plus d'offrir une bonne précision planimétrique (en X,Y), les données LiDAR aéroportées offrent généralement une précision en Z de 15 cm (Sallenger et al., 2003). Cette technologie permet de couvrir de vastes territoires en zone côtière à haute résolution et précision spatiale (Brock et Purkis, 2009). Ces données ont notamment été utilisées pour cartographier les niveaux d'eau sur la côte et les limites géomorphologiques (Liu et al., 2007 ; Robertson et al., 2004 ; Stockdon et al., 2002).

2.2. Position des différents indicateurs sur la côte

Les variations du positionnement de la LHE sont influencées par les niveaux d'eau, le changement morphologique des plages, les événements de tempête et le jet de rive des vagues (Pajak et Leatherman, 2002 ; Boak et Turner, 2005). Morton et Speed (1998) ont simultanément mesuré la position et l'élévation d'éléments morphologiques visibles (ligne de végétation et berme), du niveau moyen des plus hautes marées hautes (LHHEM ; niveau marégraphique), de la LHE instantanée et du niveau des hautes eaux prédit par les données de jauges de marée (LHEM). Ces éléments ont été mesurés sur six plages de l'État du Texas (États-Unis) sur une période d'un an pour évaluer leur variabilité spatiotemporelle (fréquence de deux semaines à un mois). Bien que les résultats de cette étude restent fonction des conditions hydrodynamiques locales et des caractéristiques intrinsèques aux secteurs étudiés, les auteurs ont observé que la ligne de végétation était la limite visible la plus stable dans le temps et dans l'espace. Cette dernière étant contrôlée par les inondations associées aux plus hauts niveaux d'eau. La position de la berme, des niveaux des hautes eaux (instantané et prédit) et de la LHHEM sont quant à eux contrôlés par la morphologie de la plage, le niveau d'eau et les vagues précédant les levés. La LHE instantanée et la berme étaient les éléments les moins stables, fluctuant avec les cycles d'aggradation et d'érosion de la plage. La position de la LHHEM a quant à elle varié horizontalement sur 20 m. De plus, deux mesures prises de manière consécutives n'étaient jamais au même endroit

sur la plage. La LHEM était aussi systématiquement plus basse que la LHE instantanée en raison du jet de rive des vagues. Pajak et Leatherman (2002) ont mesuré une distance horizontale d'environ 40 m et une différence d'élévation de 2 m entre la LHE instantanée et la LHEM sur leurs sites d'étude (Maryland et Caroline du Nord). Dans l'État de Washington, Ruggiero et al. (2003) ont mesuré des distances allant jusqu'à 50 m entre ces deux mêmes lignes sur une plage de pente faible.

Bien qu'un niveau marégraphique puisse être verticalement stable au cours d'une époque tidale, son point d'intersection horizontal au niveau sur la plage peut grandement varier en fonction des conditions océaniques et de l'apport sédimentaire à la côte. Morton et Speed (1998) notent que pour les côtes dont l'estran est composé de matériel érodable, la stabilité des indicateurs liés à la ligne de rivage augmente vers les terres alors que la fréquence des fluctuations des indicateurs augmente vers la mer. En ce sens, les éléments tels que la ligne de végétation, la microfalaise d'érosion ou le pied d'une falaise sont plus stables que la berme ou la LHE instantanée, car ils sont peu ou pas affectés par les changements à court terme des niveaux d'eau.

Sur les côtes sableuses et dans les marais, la ligne de végétation est un indicateur de la limite des inondations régulières par les hautes eaux. Cet indicateur peut encore une fois s'avérer plus fiable que la LHE instantanée, n'étant pas affecté par les variations des niveaux d'eau à court terme. Néanmoins, Morton et Speed (1998) notent trois facteurs à considérer concernant l'utilisation de la ligne de végétation comme indicateur de la ligne de rivage. Sur les plages sableuses, la ligne de végétation peut fluctuer indépendamment des variations morphologiques de la plage pour de courtes périodes. De plus, la ligne de végétation n'est pas toujours distincte et facilement identifiable (ex. présence de végétation éparse et dense). La position de la ligne de végétation peut également être influencée par l'activité humaine. La limite de végétation dans des secteurs en accumulation et en progradation n'est pas non plus toujours claire.

Liu et al. (2014a) ont évalué le niveau de la ligne des hautes eaux à partir des probabilités d'atteinte du jet rive (basé sur une période de dix ans de données de vagues enregistrées). Ces probabilités sont calculées à partir de différents indicateurs de la LHE déterminés par l'analyse d'images (niveau des hautes eaux moyennes - marégraphique, limite sable sec/sable mouillé, limite de la végétation éparse, pied de dune) et par le principe d'autocorrélation spatiale. Celui-ci implique qu'au-delà d'une certaine distance, la probabilité d'atteinte du jet de rive n'existe plus. La position de cette limite permet d'évaluer le niveau maximal pouvant être atteint par les vagues sous des conditions normales et, conséquemment, la position de la ligne des hautes eaux. Aux deux sites étudiés par les auteurs (ouest de l'Australie), la position et l'altitude de la limite de probabilité de jet de rive se situaient à proximité du pied de la dune frontale, concluant que cet élément morphologique constitue un indicateur raisonnable de la ligne des hautes eaux lorsque davantage de données de vagues et de marées ne sont pas disponibles. En appliquant un modèle de décision multicritères pour déterminer la LHE sur les deux mêmes plages, Liu et al.

(2014c) estiment que le pied de la dune frontale et la ligne de végétation sont les indicateurs optimaux dans une optique de gestion des risques côtiers, qui doit prendre en compte l'effet des vagues. Les auteurs ont observé que la LHEMP ou la LHHEM réfèrent à une position acceptable dans des milieux caractérisés par des vagues de faible énergie. Liu et al. (2014b) estiment que des calculs statistiques basés sur des observations à long terme des vagues et des marées permettraient d'inclure les facteurs non-astronomiques influençant le niveau d'eau (vagues, conditions météorologiques, hausse du niveau marin, El Nino/La Nina) ainsi que le système côtier (morphologie de la plage, transit sédimentaire).

Les plages sableuses sont des milieux particulièrement dynamiques et la position d'une ligne, qu'elle soit associée à un niveau marégraphique ou à un élément géomorphologique, varie dans le temps en réponse aux changements de conditions environnementales (Morton et Speed, 1998). Il semble peu probable qu'un seul indicateur puisse servir de référence universelle dans le futur. Il importe donc de déterminer une méthode adaptée au milieu étudié en fonction des objectifs visés (Boak et Turner, 2005).

2.3. Les lignes de référence au Canada

La *Convention des Nations Unies sur le droit de la mer* du 10 décembre 1982 (Vol. 1834, I-31363, article 5) associe la ligne de base des États côtiers à « la laisse de basse mer le long de la côte, telle qu'elle est indiquée sur les cartes marines à grande échelle reconnues officiellement par l'État côtier ». En tant qu'État côtier et en vertu de cette Convention, le Canada a délimité six zones maritimes (Figure 2) établies à partir de cette ligne de base. Celle-ci délimite les eaux intérieures du Canada, situées côté terre de la ligne, de la mer territoriale, qui s'étend à 12 milles marins en mer (Pêches et Océans Canada, 2016). Cette ligne de base constitue la limite inférieure de gestion territoriale. Les lignes de référence utilisées aux fins de la protection des écosystèmes côtiers, de l'aménagement et de la gestion des zones côtières diffèrent en fonction des pays. Au Canada, elles diffèrent également selon les provinces.

Zones maritimes

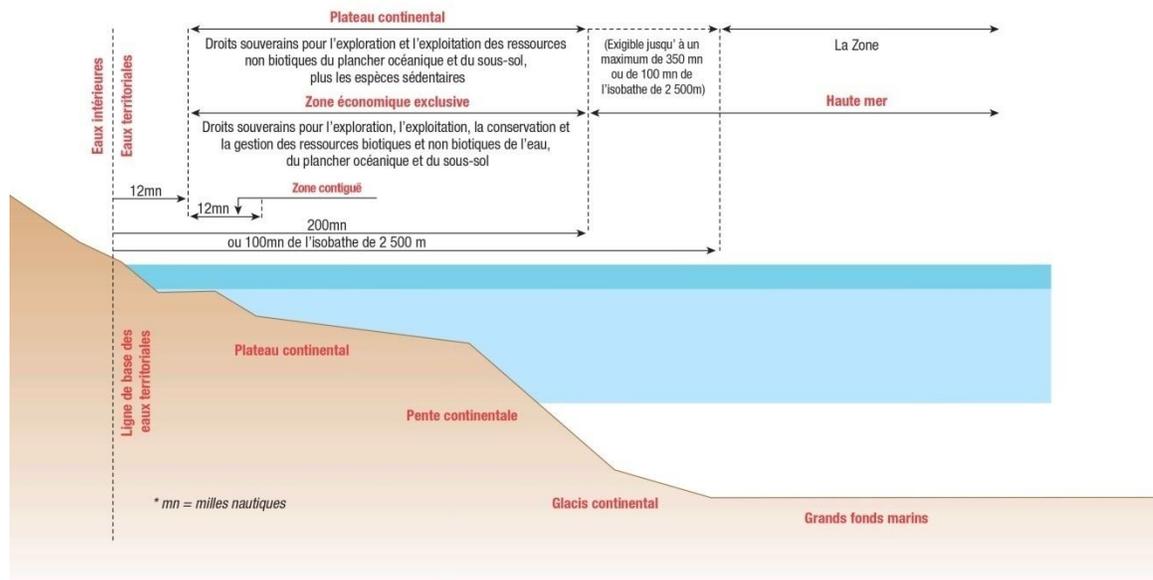


Figure 2. Zones maritimes du Canada (Pêches et Océans Canada, 2016)

2.3.1. Québec

La LHE et la délimitation du littoral et de la rive servent à contrôler les interventions (construction, ouvrage ou travaux) pouvant être réalisées en bordure des cours d'eau (MDDELCC, 2015a). Cette limite définie dans la PPRLPI est donc davantage établie dans une optique de protection de l'environnement et des écosystèmes riverains et côtiers. La LHE utilisée dans le Code civil du Québec sert quant à elle de limite foncière ; elle sert à délimiter le domaine public de l'État en bordure des cours d'eau. L'article 919 stipule que « le lit des lacs et des cours d'eau navigables et flottables est, jusqu'à la ligne des hautes eaux, la propriété de l'État. Il en est de même du lit des lacs et cours d'eau non navigables ni flottables bordant les terrains aliénés par l'État après le 9 février 1918 ; avant cette date, la propriété du fonds riverain emportait, dès l'aliénation, la propriété du lit des cours d'eau non navigables ni flottables » (CcQ 1991, c. 64, a. 919). Dans les *Instructions générales d'arpentage* du Bureau de l'arpenteur général du Québec (2013), la LHE servant à délimiter le domaine hydrique de l'État réfère au niveau pleins bords, sans débordement ni inondation. Ce niveau rapporte aux plans d'eau non-assujettis aux marées. En milieu maritime, la ligne des hautes eaux permettant de délimiter le domaine privé du domaine de l'État constitue la cote de la plus haute marée du mois de

mars, moyennée sur une période de 19 ans (observations de marégraphes et/ou prédictions des tables de marées).

2.3.2. Nouvelle-Écosse

En Nouvelle-Écosse, la ligne des hautes eaux ordinaires (LHEO) est utilisée pour délimiter le domaine public des terres privées. Cette ligne sert autant à l'aménagement des côtes qu'à la protection des écosystèmes (CBCL Limited, 2009). En 1977, le *Nova Scotia Land Surveyors Act* définissait la LHEO comme la limite d'un plan d'eau, là où la terre avait été couverte par l'eau assez longtemps pour enlever la végétation ou laisser une marque distincte sur la végétation atteinte par l'eau ou sur le sol lui-même (Nichols, 1983). Les indicateurs pour définir la limite étaient alors plutôt physiques. En 2010, les *Land Surveyors Regulations* (subsection 12(1) du *Land Surveyors Act* S.N.S. 2010, c. 38) associent la LHEO en milieu côtier au niveau moyen des marées hautes moyennes entre les marées de printemps et les marées de mortes-eaux de chaque quart de révolution lunaire au cours de l'année, en excluant seulement les catastrophes et les débordements extraordinaires². Il s'agit alors d'une méthode statistique. Cette même définition est utilisée quant à la limite supérieure d'une plage (R.S.N.S 1989, c. 32). Cette loi précise que dans le cas où aucun enregistrement de marée n'a été effectué sur une période minimale d'un an, la ligne des hautes eaux correspond aux signes visibles sur le sol (ex. état de la végétation ou accumulation de débris).

Les municipalités sont responsables du zonage et de la planification de stratégies relatives à l'utilisation de leur territoire, incluant ce qui a trait au milieu côtier et à la gestion des risques. En 2009, environ 45% du territoire néo-écossais présentait une stratégie municipale de planification de l'utilisation des terres. Le gouvernement provincial est en processus de développement d'une stratégie de développement durable des côtes, traitant notamment des enjeux liés au développement côtier, à la hausse du niveau marin, aux événements de tempête et aux écosystèmes côtiers (CBCL Limited, 2009).

Pour estimer la portée des aléas côtiers, un guide d'assistance est fourni aux municipalités en vue d'élaborer leur plan d'action face aux impacts des changements climatiques. Ce dernier propose de se baser sur des observations passées et des scénarios de niveaux d'eau futurs pour établir des niveaux de référence (Elemental Sustainability Consulting Ltd, 2012). Ces différents scénarios de niveaux d'eau visent à guider la planification de l'utilisation du territoire en milieu côtier en fonction des niveaux de risque d'inondation. Règle générale, selon la précision des données topographiques disponibles, la zone entre la ligne d'eau et le niveau altitudinal de 5 m devraient référer à des probabilités d'inondation de premier ordre, selon le niveau de tolérance face aux

²Traduction libre de « for tidal waters, the mark on the seashore reached by the average of the mean high tides of the sea between the spring and neap tides in each quarter of a lunar revolution during the year excluding only extraordinary catastrophes or overflows » (tiré de *Land Surveyors Regulations*, S.N.S. 2010, c. 38, a. 70 (1) b)

risques. La zone entre 5 et 10 m d'altitude doit être considérée comme pouvant être temporairement submergée en prenant en compte le jet de rive des vagues non-inclus dans les scénarios de niveaux d'eau (Elemental Sustainability Consulting Ltd, 2012).

2.3.3. Nouveau-Brunswick

Au Nouveau-Brunswick, l'arrière-plage est considérée comme étant privée alors que la zone intertidale est du domaine public. C'est la LHEO qui délimite ces deux domaines (Gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2015). La méthode de délimitation est marégraphique. La *Politique sur les terres submergées de la Couronne* (CLM 014 2004, section 2.2 ; Ministère des Ressources naturelles, 2014) définit la LHEO à partir de l'élévation moyenne des marées hautes normales.

La *Politique de protection des zones côtières pour le Nouveau-Brunswick* (Ministère de l'Environnement et des Gouvernements locaux, 2002) établit des marges de protection dans le but d'orienter la gestion et l'aménagement du milieu côtier. La zone côtière est ainsi divisée en trois sections relatives à leur degré de sensibilité. La zone A est la zone centrale des terres côtières et inclut les secteurs les plus proches de l'eau. Elle est délimitée par des limites marégraphiques et des éléments géomorphologiques. Cette zone comprend les plages, les dunes, les plateformes rocheuses, les marais côtiers et les terres endiguées s'étendant entre la laisse des basses eaux de grandes marées et la laisse des hautes eaux de grandes marées, en plus d'inclure les dunes présentes au-delà de cette limite supérieure. La zone B est la zone tampon des terres côtières s'étendant sur une largeur de 30 m. Finalement, la zone C est la zone de transition des terres côtières. La sensibilité à l'intérieur de cette zone est fonction de la variabilité des caractéristiques morphologiques et la largeur de cette marge n'a donc pas encore été définie. Les aménagements autorisés dans cette zone de transition seront fonction (1) de la vulnérabilité de l'aménagement face aux événements de tempêtes et (2) de l'impact de l'aménagement sur l'écosystème côtier (contamination, perturbation de l'habitat, perturbation des processus côtiers). Il est aussi mentionné dans la politique que les ouvrages permanents devraient être construits à une élévation minimale de deux mètres au-dessus de la laisse des hautes eaux de grandes marées.

2.3.4. Île-du-Prince-Édouard

Dans un contexte cadastral, l'Île-du-Prince-Édouard utilise la ligne des hautes eaux moyennes (ou ordinaires) comme ligne de référence. Elle constitue la limite supérieure dans la définition d'une plage (*Planning Act* R.S.P.E.I. 1988, Cap. P-8, art. 1(b.2)) ; il s'agit de la ligne centrale de la zone côtière, qui s'étend sur 500 m de part et d'autre de la ligne des hautes eaux moyennes (*Planning Act* R.S.P.E.I. 1988, Cap. P-8, art. 1(d.3)). Dans une optique environnementale, le *Environmental Protection Act* (R.S.P.E.I. 1988, Cap. E-9, art. 1(a.3)) place la

limite supérieure de la plage à la base du banc ou de la pente où la terre rencontre la ligne de rivage ou au pied d'une dune (côté mer) ; la plage s'étend sur trois miles vers la mer (comprenant la masse d'eau, les sédiments et/ou le roc).

Dans une optique de développement, le cadre législatif de la province prévoit certaines mesures en bordure d'une plage ou d'un système de dunes (*Planning Act* R.S.P.E.I. 1988, Cap. P-8, art. 16(1)). La portion extérieure d'un bâtiment ou d'une structure doit respecter une marge de recul de : 22,9 m (75 pi) ou une distance correspondant à 60 fois le taux d'érosion annuel à partir d'une plage (le plus large des deux) ; 30,5 m (100 pi) d'une dune primaire ou secondaire qui migre (mesuré à partir de la limite terrestre de la dune) ; et 22,9 m de la frontière terrestre d'une zone humide ou d'un cours d'eau. Lors de la subdivision d'une terre à l'intérieur d'une zone côtière, des zones tampons doivent être incluses. Pour les subdivisions adjacentes à une plage, cette zone doit avoir une largeur minimale de 18,3 m (60 pi) ou 60 fois les taux d'érosion annuel dans le secteur (le plus large des deux) à partir du sommet du banc adjacent à la plage. Pour les subdivisions adjacentes à une dune, la largeur minimale de la zone tampon doit être de 18,3 m à partir de la limite terrestre de la dune.

Dans une optique de gestion des côtes en lien avec les changements climatiques, le rapport de Richards et Daigle (2011) a été réalisé pour la Nouvelle-Écosse et l'Île-du-Prince-Édouard. Les mêmes types de scénarios ont été élaborés pour des localités de la province. La hausse du niveau marin utilisée est la même que celle déterminée pour la Nouvelle-Écosse : $0,90 \pm 0,43$ m (par rapport au zéro hydrographique) sur l'horizon 2000-2100. Les valeurs relatives à la subsidence sont davantage variables : $0,10 \pm 0,05$ m (West Point et Summerside), $0,15 \pm 0,05$ m (St Peter's Bay), $0,16 \pm 0,05$ m (Charlottetown), $0,18 \pm 0,05$ m (Alberton et Rustico) ainsi que $0,20 \pm 0,05$ m (North Lake Harbour, Naufrage et Georgetown). Des niveaux de hausse résultants ont été calculés pour 2025, 2055 et 2085 à partir de ces valeurs (Richards et Daigle, 2011).

2.3.5. Terre-Neuve-et-Labrador

La province de Terre-Neuve-et-Labrador utilise la zone de rivage (*shore water zone*) qui définit l'interface entre la terre et l'eau, que ce soit de l'eau douce ou salée. Cette zone est délimitée dans sa partie supérieure par la ligne des hautes eaux (*High water mark*) et dans sa partie inférieure par la ligne des basses eaux (*low water mark*). La limite supérieure de cette zone réfère au niveau d'eau ayant une récurrence de 1 : 100 ans. La Politique pour le Développement des zones littorales (*Policy for Development in Shore Water Zones*) stipule qu'en milieu maritime, ce niveau doit inclure le maximum des vagues, l'effet du vent sur le niveau d'eau, les ondes de tempête et les niveaux d'eau moyens ultimes en lien avec les prévisions climatiques globales pour un modèle de 1 :100 ans (Water Resources Management, 2001). À partir de cette limite, le gouvernement provincial prévoit une bande de terre publique devant rester à l'état naturel d'au moins 15 mètres (selon les activités) afin de séparer les zones de

développement des plans d'eau. Pour certains secteurs, une zone à risque d'inondation relative aux projections de changements climatiques pour les périodes 1 : 20 ans et 1 : 100 ans (*Climate Change Flood Zone*) a été déterminée (Water Resources Management, 2014 - *Policy for Flood Plain Management*).

En 2010, un article provenant du *Department of Natural Resources* de la province proposait une approche pour évaluer l'une des variables comprises dans la définition de la ligne des hautes eaux : les tendances liées au niveau marin dans une optique de changements climatiques sur un horizon de 50 à 100 ans. Les deux facteurs pris en compte sont la hausse globale du niveau marin et la tendance locale liée aux facteurs géologiques. Selon les données du IPCC (2007) et les prévisions de Rahmstorf et al. (2007), une hausse globale de 30 cm et de 79 cm au-dessus du niveau marin de 1990 est estimée sur les horizons 2049 et 2099 respectivement. Les tendances relatives aux variations verticales de la croûte terrestre varient, selon le secteur, entre +2 et -1 mm par année. Les niveaux résultants peuvent servir dans la planification du développement et la délimitation des zones inondables (Batterson et Liverman, 2010).

2.3.6. Colombie-Britannique

Dans la province de la Colombie-Britannique, le gouvernement possède les terres comprises dans la zone intertidale jusqu'à la *natural boundary* (Greenshores, 2009), traduite ici comme la limite naturelle. Cette limite réfère au niveau des hautes eaux ordinaires moyennes (Ministry of Environment, Lands and Parks Land and Water Programs Branch, 1995). La limite naturelle reflète le changement de végétation et de sol en fonction de l'effet de la mer (AusencoSandwell, 2011) et se situe à la frontière de la végétation terrestre permanente (Ministry of Water, Land and Air Protection, 2004). Il est alors question d'une méthode botanique. Deux processus définissent la position de la limite naturelle : les niveaux d'eau et les vagues associés aux tempêtes ordinaires (AusencoSandwell, 2011). Le *Flood Hazard Area Land Use Guidelines* (Ministry of Water, Land and Air Protection, 2004) prévoit, sauf exceptions, une marge de 15 m ainsi qu'une élévation de 1,5 m depuis la limite naturelle exempte de construction. AusencoSandwell (2011) souligne qu'en prévision des changements climatiques, de la hausse du niveau marin relatif et des tempêtes subséquentes, la limite naturelle est appelée à migrer vers les terres. Pour estimer la position d'une future limite naturelle (Figure 3), les auteurs suggèrent d'ajouter un niveau d'inondation lors d'une tempête désignée (*Designated Flood Level* : l'addition de la hausse présumée du niveau marin relatif sur l'horizon 2100, du maximum des marées hautes et du total de l'onde d'une tempête désignée) et l'effet estimé des vagues durant cette tempête. Ces facteurs vont varier en fonction du secteur, selon les mouvements verticaux de la croûte terrestre, la nature des marées et l'effet local de tempêtes et de vagues anticipées.

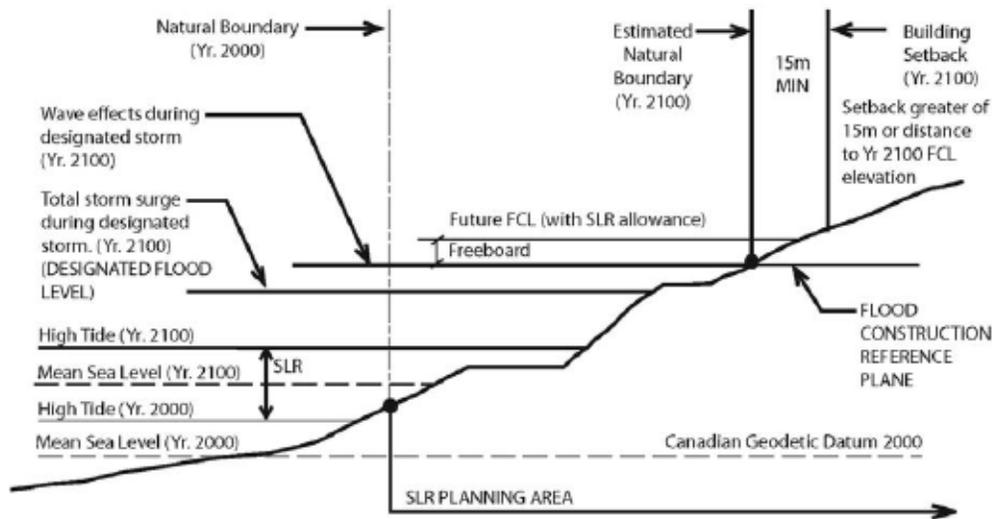


Figure 3. Aléa de submersion côtière - adaptation aux changements climatiques (tiré de AusencoSandwell, 2011)

2.4. Lignes de référence à l'international

2.4.1. Les États-Unis

La figure 4 montre les lignes utilisées par les divers États des États-Unis pour délimiter le domaine public du domaine privé. Plusieurs États utilisent la ligne des hautes eaux moyennes (MHW ou *Mean high water* sur la figure 4) : Alabama, Alaska, Californie, Connecticut, Floride, Géorgie, Maryland, Mississippi, New Jersey, New York, Caroline du Nord, Caroline du Sud, Oregon, Rhode Island et Washington (NOAA Office of Coast Survey, 2013). L'altitude de la ligne des hautes eaux moyennes est généralement déterminée à partir d'une méthode statistique, soit la moyenne des marées hautes sur une certaine période de temps, préférablement le plus près du cycle astronomique de 18,6 ans (Cole, 2007). L'État de Washington associe quant à lui la ligne des hautes eaux en milieu maritime à la moyenne des plus hautes marées. Celle-ci coïncide avec la limite supérieure de la végétation tolérante au sel. Cet État utilise une méthode botanique similaire à celle du Québec, ayant dressé une liste des espèces de plantes des milieux humides et terrestres (facultatives, obligées, non-indicatrices). La liste comprend d'ailleurs des notes sur l'habitat (ex. côtier) et la localisation des plantes par rapport à la ligne des hautes eaux (Olson et Stockdale, 2010). Alors que ces États définissent leur limite en fonction de la portée quotidienne des marées, les États d'Hawaï, de la Louisiane et du Texas se sont davantage inspirés du droit civil avec une limite basée sur la portée maximale des eaux (Cole, 2007), utilisant la ligne des plus hautes eaux

moyennes (MHHW ou *Mean higher high water* sur la figure 4). Finalement, les États atlantiques suivants utilisent la ligne des plus basses eaux moyennes (MLLW ou *Mean lower low water* sur la figure 4) : Delaware, Massachussets, Maine, New Hampshire, Pennsylvanie et Virginie (NOAA Office of Coast Survey, 2013).

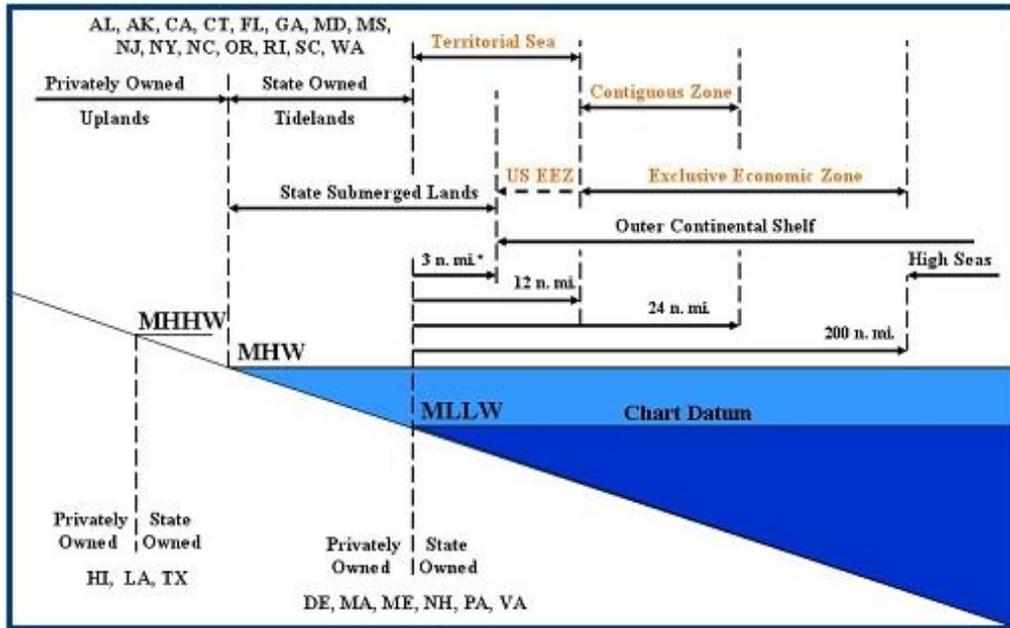


Figure 4. Zones maritimes des États-Unis et limites entre le domaine privé et le domaine de l'État (tiré de NOAA Office of Coast Survey, 2013)

Depuis la poursuite juridique de *Borax Consolidated Ltd vs. City of Los Angeles* en 1935, l'utilisation des niveaux d'eau moyens obtenus par les enregistrements de jauges de marée sur une période de 18,6 ans est devenue la méthode scientifique acceptée pour déterminer la limite légale entre le domaine public et le domaine privé aux États-Unis (Morton et Speed, 1998 ; Cole, 2007).

2.4.2. France

2.4.2.1. Limites légales

En France, le rivage de la mer appartient au domaine public de l'État. L'article L.2111-4 du *Code général de la propriété des personnes publiques* (CGPPP) inclut les éléments suivants dans le domaine public maritime :

1. Le sol et le sous-sol de la mer entre la limite extérieure de la mer territoriale et, côté terre, le rivage de la mer.

Le rivage de la mer est constitué par tout ce qu'elle couvre et découvre jusqu'où les plus hautes mers peuvent s'étendre en l'absence de perturbations météorologiques exceptionnelles ;

2. Le sol et le sous-sol des étangs salés en communication directe, naturelle et permanente avec la mer ;
3. Les lais et relais de la mer.

Les modifications apportées au CGPPP en 2006 définissent également le domaine public maritime artificiel. Celui-ci est constitué des ouvrages portuaires et de leurs dépendances ainsi que des ouvrages liés à la navigation (art. L.2111-6).

La méthode de détermination du rivage de la mer est basée sur la constatation de l'étendue des flots *in situ* ou sur des informations fournies par des procédés scientifiques (article L. 2111-5 du CGPPP). Ces procédés concernent notamment le traitement de données topographiques, météorologiques, marégraphiques, houlographiques, morpho-sédimentaires, botaniques, zoologiques, bathymétriques, photographiques, géographiques, satellitaires ou historiques (article 2 du décret n° 2004-309 du 29 mars 2004 ; CETMEF, 2013).

Les deux méthodes classiques suivantes servent à délimiter le rivage de la mer selon le CETMEF (2013). La première méthode consiste à marquer, à l'aide de piquets ou de peinture, la limite supérieure du jet de rive à l'étalement de pleine mer (aux 100 m minimum) pour ensuite procéder au relevé planimétrique de la limite constatée *in situ*. Ce type de méthode implique de prévoir les dates des plus hautes mers. Or, les facteurs de surcote et de houle sont plus difficiles à prévoir et à quantifier. La seconde méthode consiste à déterminer une certaine altitude référant à la limite supérieure du domaine public maritime et de procéder au relevé de cette altitude sur le terrain. Toutefois, une altitude de référence n'est pas nécessairement valide pour plusieurs endroits et l'état de la côte (actif ou accumulation) peut influencer la localisation de cette altitude.

Dans son document sur la reconnaissance de la limite du rivage de la mer, le CETMEF (2013) souligne notamment les difficultés suivantes :

- La définition du rivage de la mer telle qu'écrite dans le CGPPP rapporte à la plus forte marée astronomique, soit sur une période d'au moins 18,6 ans, et non pas sur la plus forte marée annuelle ;
- Les variations dans la morphologie et la pente de la plage (d'origine saisonnière ou événementielle) influencent la portée de la houle et du jet de rive, faisant varier les résultats de détermination d'une limite ;
- Les conditions météorologiques à prendre en compte lors d'un levé sont ambiguës dans les textes (quantification de surcote et de houle ainsi que conditions dépressionnaires ou anticycloniques faisant varier les niveaux d'eau) ;

- La délimitation du rivage de mer est une constatation instantanée, non-reproductible, effectuée dans un milieu dynamique. La limite du domaine public maritime est donc variable dans le temps.

En réponse à ces ambiguïtés, le CETMEF (2013) a développé une méthode d'identification de la ligne de rivage par des indicateurs naturels, basés sur le type de côte, leurs caractéristiques morpho-sédimentaires et les indicateurs botaniques. Le document place la limite des plus hautes eaux en fonction du type de côte, de son état et des divers indicateurs. Par exemple, pour une plage sableuse en accumulation, la limite des plus hautes eaux se situerait au sommet de la berme de haute-plage, au niveau des plantes telles que *Cakile sp.* installées au niveau des pleines mers de grande vive-eau.

2.4.2.2. Gestion des zones côtières

La ligne de rivage et le trait de côte réfèrent à la même limite mais, dans ce contexte technique, diffèrent de la limite juridique du domaine public maritime (CEREMA, 2015). Dans son cahier technique *Analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral*, le CEREMA (2015) stipule que le trait de côte réfère à un indicateur, souvent à la laisse des hautes mers, pouvant migrer sur un intervalle de temps donné. Le changement de position d'un indicateur traduit l'évolution du littoral, pourvu qu'un même objet géographique soit comparé à une même échelle. Le document énumère les indicateurs recensés dans l'article de Boak et Turner (2005) et les place dans quatre classes : les indicateurs altimétriques (cote d'un niveau marin), les indicateurs hydrodynamiques (relatifs aux phénomènes météo-marins), les indicateurs géomorphologiques (discontinuités morphologiques) et les indicateurs botaniques (présence de végétation ou d'espèces en particulier). Rappelons que l'État français s'est tourné vers des critères morpho-sédimentaires et botaniques (CETMEF, 2013). Le trait de côte ne peut cependant être réduit à une simple ligne tracée à l'aide de ces indicateurs. Il traduit en fait une frange littorale dynamique et mobile sous l'action des éléments (CEREMA, 2015).

Le trait de côte constitue une ligne de référence en ce qui a trait à la gestion des risques côtiers. Dans son guide méthodologique des plans de prévention des risques littoraux, la Direction générale de la prévention des risques du Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (2014) établit trois aléas : le recul du trait de côte, la migration dunaire (front dunaire) et la submersion marine.

L'analyse du recul du trait de côte et de la migration dunaire est basée sur l'évolution historique du littoral (taux de recul/migration à long terme) et les épisodes de recul maximal liés à des événements de tempête ponctuels. Une enveloppe relative à la projection sur 100 ans du taux de recul/migration est déterminée à partir du trait de côte actuel. Le recul ponctuel maximal lié à un événement de tempête majeur est ajouté à cette enveloppe (Direction générale de la prévention des risques, 2014).

L'aléa de submersion des zones côtières par la mer peut s'apparenter à trois situations : par débordement, soit lorsque le niveau d'eau est supérieur à l'élévation du terrain ou d'une artificialité, par le déferlement des vagues ou par la rupture des ouvrages de protection. Un niveau altitudinal pouvant être atteint par l'eau est utilisé comme ligne de référence. La caractérisation de cet aléa se fait par la détermination de scénarios de référence, qui impliquent un événement météo-marin de récurrence 100 ans ou historique (le plus important des deux est retenu) et les hypothèses de défaillance des défenses géomorphologiques naturelles et/ou des ouvrages de protection. Les événements naturels doivent être décrits minimalement par le niveau d'eau et la hauteur des vagues ; d'autres facteurs peuvent être ajoutés selon le secteur. Dans une optique de changements climatiques, 20 cm sont ajoutés au niveau d'eau pour l'aléa de référence à court terme et 60 cm pour l'aléa de récurrence 100 ans (Direction générale de la prévention des risques, 2014).

2.4.3. Royaume-Uni

2.4.3.1. Limites légales

Depuis 1965 au Royaume-Uni, l'estran (ou zone intertidale) est légalement compris entre la ligne des hautes eaux moyennes et la ligne des basses eaux moyennes. En Écosse, ce sont les lignes des hautes eaux de printemps moyennes et des basses eaux de printemps moyennes qui s'appliquent. Ces zones sont la propriété de la Couronne (The Crown Estate, ND ; Baily, 2011). C'est donc dire que la ligne des hautes eaux moyennes (ou ligne des hautes eaux moyennes de printemps en Écosse) constitue la limite entre le domaine public et le domaine privé. En cas d'accrétion, la nouvelle portion de terrain s'élevant alors au-dessus de la ligne des hautes eaux moyennes devient la propriété du propriétaire riverain adjacent. En cas d'érosion, la portion d'estran nouvellement formée revient à la Couronne (The Crown Estate, ND).

2.4.3.2. Gestion des zones côtières

Deux études conduites par Environment Agency (2011a-b) servent de support à la décision dans une optique de gestion adéquate des risques côtiers. Les auteurs ont utilisé deux modèles pour ressortir des statistiques de fréquence relatives aux facteurs engendrant les aléas de submersion et d'érosion : les niveaux d'eau et les hauteurs de vagues. Combinées à des données locales (bathymétrie, topographie, morphologie de la côte, etc.), ces données peuvent être utilisées pour estimer l'étendue de la zone (avec une altitude déterminée) soumise à un aléa.

Environment Agency (2011a) a mis sur pied une méthode pour déterminer les niveaux d'eau extrêmes le long de la côte du Royaume-Uni. Les résultats sont obtenus à partir de modèles statistiques basés sur des données de jauges de

marée. En parallèle, des données de niveaux de marée et de surcote sont estimées à partir d'un modèle numérique qui ré-analyse et interpole des données météorologiques sur 45 ans (de 1957 à 2002). Les niveaux ayant des périodes de retour entre 1 et 10 000 ans sont ainsi estimés. Un travail similaire a été effectué pour déterminer la hauteur des vagues au large associée aux périodes de retour de 1 à 1000 ans ainsi que les périodes de vagues correspondantes. Les hauteurs de vagues étant déterminées pour des eaux relativement profondes, les auteurs soulignent qu'il convient, d'un point de vue pratique, de prendre en compte la transformation des vagues en eau peu profonde à l'approche de la côte (Environment Agency, 2011b). Les auteurs soulignent que les données des modèles restent théoriques et que leur précision dépend de la qualité et de la quantité des données disponibles. En ce sens, il conviendrait de réviser les résultats dans le futur lorsque davantage de données marégraphiques seront disponibles (recommandation de mise à jour aux cinq ans).

Des plans de gestion de la ligne de rivage (*Shoreline management plans*) ont été élaborés pour l'ensemble de la côte du Royaume-Uni. Bien que l'ensemble du système côtier, en tant que zone, serve de référence dans l'élaboration des plans de gestion de la ligne de rivage, la ligne de rivage en tant que telle est utilisée comme limite de base, principalement en ce qui a trait aux scénarios d'évolution côtière sur une échelle de 100 ans (DEFRA, 2006a-b). Dans le glossaire de DEFRA (2006a), la ligne de rivage réfère à la limite entre la terre et la mer. Les indicateurs utilisés pour tracer la ligne de rivage ne sont pas davantage énoncés.

2.4.4. Australie– Nouvelle-Galles du Sud (New South Wales)

2.4.4.1. Limites légales

En milieu maritime, l'État de la Nouvelle-Galles du Sud utilise la ligne des hautes eaux moyennes. Celle-ci est définie comme la ligne des marées hautes moyennes entre les hautes marées ordinaires de printemps et les hautes marées ordinaires de morte-eau (*Surveying Regulation 2001*, art. 55). La méthode utilisée pour déterminer la ligne des hautes eaux moyennes en est une statistique : elle est basée sur les données marégraphiques provenant du Manly Hydraulics Laboratory. Dans le cas d'une accrétion, les propriétaires riverains peuvent réclamer la propriété de la portion de terre nouvellement formée dans la mesure où ils prouvent, par le biais d'une opinion professionnelle, que cette tendance sera soutenue indéfiniment par les processus naturels, et ce, en considérant les impacts d'une hausse du niveau marin de 50 cm relativement aux changements climatiques. Le propriétaire, par une telle réclamation, ne pourra pas non plus restreindre ou interdire l'accès public à la plage. Dans la mesure où ces conditions ne peuvent être remplies, la ligne des hautes eaux moyennes d'origine doit être adoptée. Les nouveaux plans déposés doivent alors également présenter la ligne de rivage actuelle. Celle-ci est définie comme étant la ligne d'intersection du niveau de la ligne des hautes eaux moyennes

avec le terrain adjacent le long de l'estran (*Surveyor General's Directions No. 6 Water as a boundary - Procedures*, 2004).

2.4.4.2. *Gestion des zones côtières*

La gestion des zones côtières dans une optique de développement durable écologique, de conservation et de protection des écosystèmes est encadrée par la *Coastal Policy 1997* (NSW Government, 1997). La zone côtière est l'interface entre le milieu marin et le milieu terrestre. Dans cette politique, les limites de la zone côtière s'étendent, vers la mer, à trois miles nautiques du continent et des îles et à un kilomètre à l'intérieur des terres à partir de la ligne des hautes eaux des milieux côtiers ouverts. Cette marge d'un kilomètre s'applique également autour des baies, estuaires, lacs côtiers, lagons et îles. Il s'agit de la définition de la zone côtière telle qu'établie dans la *Coastal Protection Act 1979* (No. 13, art. 4).

Le document *Guidelines for preparing coastal zone management plans* (Office of Environment and Heritage NSW, 2013) indique que les plans de gestion des zones côtières doivent être faits en fonction du *Coastal Protection Act 1979* et de la *Coastal Policy 1997*. La définition de la zone côtière utilisée est la même que celle énoncée dans le *Coastal Protection Act 1979*.

Le gouvernement de la Nouvelle-Galles du Sud fournit un Guide de gestion des risques côtiers pour aider les différents intervenants à évaluer les risques en milieu côtier dans une optique de hausse du niveau marin relatif (Department of Environment, Climate Change and Water NSW, 2010). L'évaluation des impacts potentiels de la hausse du niveau marin, liés notamment aux risques de submersion et d'érosion et à l'aménagement de la zone côtière, est basée sur l'implantation de points de référence associés aux scénarios de hausse du niveau marin. Le niveau de référence pour l'installation de ces repères est le niveau marin moyen de 1990. Les niveaux de projection sont de 0,4 m et de 0,9 m (correspondant aux scénarios de hausse du niveau marin du IPCC, 2007) au-dessus du niveau marin moyen de 1990, respectivement pour les horizons 2050 et 2100 (ces niveaux peuvent être révisés dans le temps à la lumière d'études futures). Au-delà de 2100, on peut ajouter 0,1 m par décennie à la marque de 2100 (Department of Environment, Climate Change and Water NSW, 2010).

2.4.5. *Australie – Queensland*

2.4.5.1. *Limites légales*

Dans l'État du Queensland, en Australie, la ligne des hautes eaux délimitant les terres publiques des terrains privés réfère à la ligne des hautes eaux moyennes des marées de printemps (Department of Environment and Heritage Protection, 2016). Il s'agit d'une mesure statistique à long terme des hauteurs de deux marées hautes successives sur une période de 24 heures, lorsque l'amplitude

de la marée est la plus grande, durant la pleine lune et la nouvelle lune (Maritime Safety Queensland, 2016). Cette ligne des hautes eaux moyennes des marées de printemps est une limite maritime spécifique au sens du *Survey and Mapping Infrastructure Act 2003* (Part 7, s. 71, art. 1a).

2.4.5.2. Gestion des zones côtières

Le *Survey and Mapping Infrastructure Act 2003* (Part 7, s. 72) aborde également les limites maritimes en lien avec des caractéristiques naturelles dont la localisation est fonction de la portée de la mer. Le document établit six critères de localisation d'une limite maritime :

1. La limite ne doit pas être sujette à la submersion marine en cas de combinaison de conditions astronomiques et météorologiques moyennes ;
2. La limite doit être du côté terre des plages sableuse, avant-dunes, mangroves, herbiers maritimes, marais maritime, battures intertidales, bancs sableux maritime et autres éléments similaires ;
3. La localisation de la limite maritime doit être dans l'intérêt du public ;
4. La limite maritime doit être stable et durable sur le long terme sous des conditions saisonnières normales, sans nécessiter de construction pour éviter la submersion ;
5. Une caractéristique naturelle doit être utilisée comme limite maritime sauf s'il n'y a pas d'éléments naturels à proximité d'où la limite devrait être positionnée (ex. sommet d'un banc, forme géomorphologique, changement dans le type de végétation indigène) ;
6. Dans le cas où le quatrième critère ne peut être appliqué et qu'une caractéristique naturelle ne peut être utilisée en fonction du cinquième critère, la limite déterminée doit être du côté terre des plages sableuses ou des dunes et de toute zone active ne présentant pas de végétation naturelle.

La limite maritime doit donc être préférentiellement un élément naturel du paysage côtier. Pour décider de la position de cette limite, les principes de limite mobile doivent être pris en compte. Les limites en bordure des étendues d'eau (1) peuvent changer de position au sens de la loi en raison d'un déplacement graduel et imperceptible dans le temps des éléments constituant la limite ; et (2) ne changent pas de position au sens de la loi considérant tout déplacement ou toute modification des éléments constituant la limite qui n'est pas graduel et imperceptible, comme un déplacement causé par une inondation, une tempête ou un autre processus naturel subit ou encore par une modification substantielle du territoire d'origine anthropique (*Survey and Mapping Infrastructure Act 2003*, Part 7, s. 76, art. 2-3).

Dans le *Coastal Protection and Management Act 1995* (Part 3, s. 10), la côte est définie comme étant la portion de terre comprise dans l'estran ou l'avoisinant.

Une cartographie de l'ensemble de la zone côtière du Queensland a été réalisée (la méthode de délimitation n'est pas spécifiée). Dans la loi de 1995, la zone côtière réfère à la partie de l'État (eau et terre) comprise à l'intérieur de la zone définie comme la zone côtière sur la carte certifiée des zones côtières. La limite intérieure de la zone côtière (figure 5) réfère au point le plus à l'intérieur des terres parmi les deux options suivantes : un point situé à 5 km de la ligne des hautes eaux ou le point le plus près de la ligne des hautes eaux atteignant une altitude de 10 m (*Australian Height Datum*).

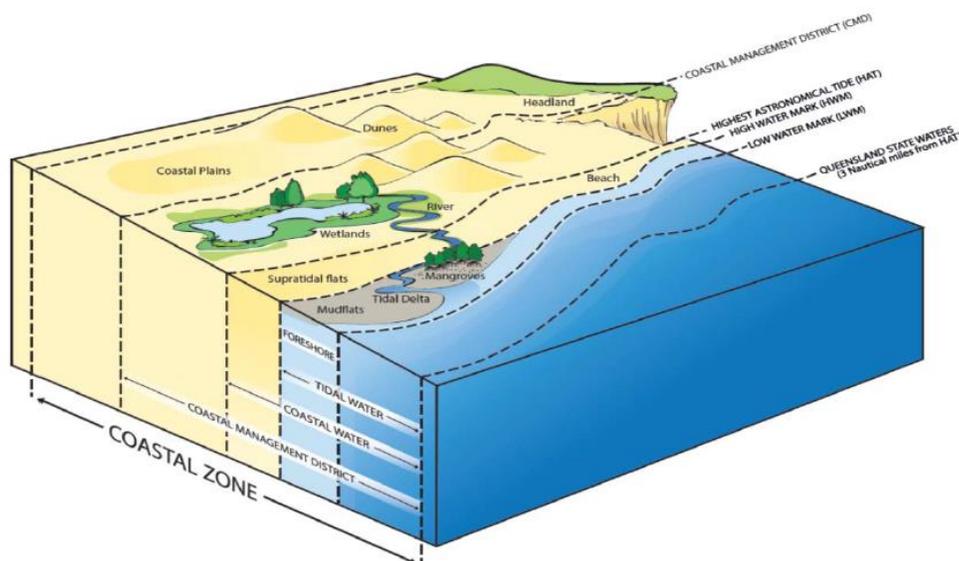


Figure 5. Délimitation de la zone côtière dans l'État du Queensland, Australie (tirée de State of Queensland, 2013a)

En vertu du *Coastal Protection and Management Act 1995*, une zone localisée à l'intérieur de la zone côtière peut être déclarée susceptible à l'érosion. La largeur de cette zone peut être mesurée à partir des composantes suivantes (State of Queensland, 2013b ; Department of Environment and Heritage Protection, 2016) :

- L'érosion à court terme lors d'évènements de tempête extrême (probabilité d'occurrence 100 ans) ;
- L'érosion graduelle de la côte à long terme (taux d'érosion annuel) ;
- L'escarpement de dunes dû à l'érosion ;
- Le risque d'érosion lié à la hausse éventuelle du niveau marin relatif (inondation permanente des terres par la mer et réponse morphologique de la côte en raison de l'élévation du niveau de la mer). Une hausse du

niveau marin de 0,8 m par rapport au niveau marin moyen de 1990 est prise en compte ;

- Un facteur de sécurité de 40%.

La largeur des zones sujettes à l'érosion est donc fonction des prévisions d'érosion des côtes à court et long termes, en prenant en compte les conditions actuelles et futures. Pour le calcul de l'érosion à court terme en lien avec un événement de tempête, il faut estimer les probabilités de hauteur de vagues et de niveau d'eau de tempête pour un secteur donné en fonction des conditions locales. L'utilisation de modèles ou de techniques empiriques ou théoriques permettra d'estimer le recul de la ligne de rivage. Le recul relatif à la tempête désignée correspond alors à la limite du jet de rive des vagues (State of Queensland, 2013b).

Pour définir l'étendue de la zone sujette à l'érosion à l'intérieur des terres de l'État du Queensland, l'une des méthodes suivantes, celle donnant la plus grande largeur, peut être utilisée (State of Queensland, 2013b) :

1. La zone sujette à l'érosion s'étend sur la zone des eaux de marée (*tidal water* sur la figure 5), jusqu'à la limite des eaux côtières du Queensland (*coastal water* sur la figure 5), et sur les terres adjacentes aux eaux de marée ;
2. La zone sujette à l'érosion comprend le secteur susceptible d'être inondée par les plus hautes marées astronomiques de l'horizon 2100 (niveau des plus hautes marées astronomiques actuel plus 0,8 m) ou à risque d'être érodé ;
3. La limite, vers les terres, de la zone sujette à l'érosion sera définie par la méthode, parmi les suivantes, donnant la plus grande largeur :
 - a) Une ligne à 40 m vers les terres depuis la position du niveau actuel des plus hautes marées astronomiques. Le calcul de la largeur de la zone ne prend pas en compte la présence d'un mur. Celui-ci peut effectivement être endommagé ou s'effondrer en cas de tempête extrême. S'il peut être garanti qu'un mur ne cédera pas, la largeur de la zone peut être réduite. Dans le cas où des infrastructures approuvées sont présentes, la ligne s'étend à 10 m depuis le sommet de l'infrastructure (côté mer), indépendamment de la présence d'affleurement rocheux ;
 - b) Une ligne déterminée à l'aide de la formule d'évaluation de la largeur de la zone sujette à l'érosion et mesurée depuis (1) le pied de la dune frontale (souvent associé à la limite de la végétation terrestre côté mer ou, sinon, au niveau des plus hautes marées astronomiques) ou (2) une ligne droite tracée de bord en bord de l'embouchure d'un cours d'eau et alignée au pied de la dune frontale de part et d'autre de l'embouchure ;
 - c) Au niveau des plus hautes marées astronomiques additionné d'une élévation verticale de 0,8 m ;

- d) Dans le cas d'affleurements rocheux, où il n'y a pas de revêtement approuvé, la ligne est établie à la limite de l'affleurement le plus près de la mer à la position des plus hautes marées astronomiques plus 0,8 m d'élévation.

Le niveau des plus hautes marées astronomiques actuel est établi par les tables de marées du Queensland de l'année du relevé. En ce sens, la limite de la zone sujette à l'érosion est appelée à migrer vers les terres à mesure que le niveau marin s'élèvera dans le futur. La largeur de la zone sera révisée et mise à jour dans le futur.

Au sujet des inondations par les tempêtes, les terres situées à plus de 1,5 m au-dessus du niveau des plus hautes marées astronomiques, dans le sud-est du Queensland, et à plus de 2,0 m au-dessus de ce même niveau dans le reste de l'État sont considérées comme étant à faible risque d'inondation pour les 100 prochaines années. Si une évaluation de la zone sujette à inondation n'a pas été réalisée en lien avec un développement proposé, ces derniers niveaux constituent le niveau par défaut d'un évènement de tempête défini (probabilité de récurrence 1 : 100 ans) et, donc, la limite de la zone sujette à inondation à l'intérieur des terres ; la limite côté mer est la ligne des hautes eaux. Il est mentionné que les données historiques relatives aux évènements de tempêtes étant limitées, une analyse statistique des niveaux d'eau extrêmes est généralement irréalisable. L'évaluation est alors basée sur des modèles numériques déterminant les caractéristiques de tempêtes. Pour les côtes exposées, le setup des vagues devrait être incorporé dans l'analyse soit en étant intégré dans la modélisation, soit en ajoutant une marge de valeur constante. Pour ce qui est du jet de rive et du franchissement des vagues, le guide souligne que ces facteurs peuvent jouer un rôle dans les risques d'inondation en cas de conditions de vagues extrêmes, même sans tempête (State of Queensland, 2013b), sans préciser de méthode pour évaluer ces éléments.

2.4.6. Nouvelle-Zélande

2.4.6.1. Limite légales

En Nouvelle-Zélande, la zone côtière et marine est délimitée, côté mer, par la limite extérieure de la mer territoriale et, côté terre, par la ligne des marées hautes moyennes de printemps (*Resource Management Act 1991*, Part 1, s. 2 ; *Marine and Coastal Area (Takutai Moana) Act 2011*, Part 1, s. 9). Dans les cas où la ligne traverse une rivière, la limite terrestre est celle dont la distance est la moindre entre un kilomètre en amont de l'embouchure de la rivière et le point en amont correspondant à la largeur de l'embouchure de la rivière multipliée par 5 (*Resource Management Act 1991*, Part 1, s. 2).

On retrouve deux limites légales, en Nouvelle-Zélande, en ce qui a trait à la frontière cadastrale en bordure de mer : la ligne des hautes eaux moyennes et la ligne des hautes eaux moyennes de printemps (New Zealand Government, ND). La *Common Law* définit la limite entre la terre et la mer comme étant la

ligne de marée haute moyenne, soit la moyenne de tous les hauts niveaux d'eau (Baker et Watkins, 1991). Il n'y a pas de méthode unique pour établir ces limites maritimes. Les arpenteurs à travers le pays conviennent d'abord d'utiliser des indicateurs significatifs et reconnaissables entre la terre et la mer, c'est-à-dire le pied d'une falaise, d'un banc ou d'une dune, la limite de la végétation, la plus haute ligne de débris, la limite inférieure de la *Salicornia Australis* (dans les vasières et les bancs de coquillages), etc. Les indicateurs utilisés doivent être illustrés sur le plan d'arpentage en termes de référence, notamment pour les levés subséquents. Le guide de détermination de la ligne des hautes eaux moyennes de Baker et Watkins (1991) stipule que les deux limites maritimes sont à des positions proches. Cette supposition est basée sur les tables de ports secondaires qui montrent une différence de 0,1 m à 0,6 m entre le niveau moyen des marées hautes de printemps et celui des marées hautes de morte-eau. La différence entre les deux limites est d'environ la moitié de ces valeurs. Notons que l'amplitude des marées est généralement peu élevée.

Si un propriétaire de terrain de forte valeur en bordure de plage n'accepte pas les indicateurs pratiques tels que décrits ci-haut en tant que frontière, le niveau de la ligne des hautes eaux moyennes doit être établi à partir de la méthode Education, de la méthode Range-Ratio ou en installant une jauge de marée au site pour une période minimale d'un mois. Ces méthodes permettent de transférer au site de levé un niveau précis déterminé à une station marégraphique standard en utilisant une jauge de marée locale et des mesures de niveaux d'eau. La méthode marégraphique directe, appliquée à partir des niveaux enregistrés à une station marégraphique donnée (période de 18,6 ans), fournit des données fiables seulement si le levé est effectué à une distance de quelques kilomètres de la jauge de marée en question. Il est recommandé, pour les plages sableuses changeantes, de répéter la procédure à tous les 2-3 mois durant une année et d'utiliser la position moyenne en tant que ligne des hautes eaux moyennes (Baker et Watkins, 1991).

Généralement, la limite maritime légale reste la ligne des hautes eaux moyennes (LHEM). La ligne des hautes eaux moyennes de printemps (LHEMP) est utilisée comme limite lorsqu'une marge côtière de protection est instituée par la subdivision d'une portion de terre (New Zealand Government, ND). La portion de terre sous la LHEMP est intégrée dans la zone marine et côtière commune (New Zealand Government, 2013). Les méthodes de détermination restent les mêmes que celles utilisées pour la LHEM (Baker et Watkins, 1991).

2.4.6.2. Gestion des zones côtières

Le *New Zealand Coastal Policy Statement 2010* (Department of Conservation, 2010) énonce les mesures à intégrer dans la gestion des zones côtières, notamment en planifiant les nouveaux développements en-dehors des zones à risque, en protégeant et restaurant les défenses naturelles face aux aléas et en analysant les réponses face aux risques dans les développements existants. Selon la politique 24, les conseils régionaux doivent identifier les zones de

l'environnement côtier pouvant potentiellement être affectées par les aléas côtiers sur un horizon de 100 ans, en priorisant les zones à haut risque, et gérer ces zones selon une approche préventive. La zone côtière marine (de la ligne des hautes eaux de printemps à la limite de la mer territoriale) et les terres adjacentes sont incluses dans l'environnement côtier (Ministry for the Environment, 2008 ; Department of Conservation, 2010). Celui-ci inclut les zones susceptibles aux aléas côtiers, les zones de végétation côtière et les systèmes côtiers et terrestres en interrelation (Department of Conservation, 2010). L'approche de gestion du guide sur les risques côtiers et les changements climatiques (*Coastal Hazards and Climate Change: Guidance Manual* ; Ministry for the Environment, 2008) prévoit d'abord d'identifier la marge côtière à risque d'érosion et d'inondation par les tempêtes ou les tsunamis. Puis, une estimation de ces risques en lien avec les changements climatiques ou le développement en marge côtière doit être réalisée. Les probabilités d'occurrence (probabilité de dépassement annuel ou période de retour) et les conséquences de ces risques doivent être évaluées sur la période de temps analysée (Ministry for the Environment, 2008).

Pour intégrer les conséquences des changements climatiques, deux niveaux marins doivent être pris en compte dans l'évaluation des risques : un niveau de base correspondant à une hausse du niveau marin de 0,5 m sur l'horizon 2100 par rapport à la moyenne du niveau marin sur la période 1980-1999 ainsi qu'un niveau estimée correspondant à une hausse de 0,8 m par rapport à la moyenne du niveau marin sur la période 1980-1999 relatif à une hausse potentielle plus élevée. Pour les prévisions allant au-delà de 2100, le document suggère une hausse de 10 mm par année supplémentaire. Il est assumé, jusqu'à ce que des études apportent davantage de précisions, que les niveaux de tempête monteront au même rythme que le niveau marin moyen. Pour estimer le climat des vagues dans les zones exposées, le document recommande d'utiliser pour la période 2050-2100 une augmentation de 10% du climat des vagues en eau très profonde et, en modélisation des vagues près de la côte, une augmentation de 10% des vents moyens d'ouest (Ministry for the Environment, 2008).

L'étendue de la zone vulnérable à la submersion côtière en cas de tempête est déterminée par la quantification de probabilité d'occurrence de niveau d'eau extrême à la ligne de rivage. La submersion côtière est habituellement une combinaison du niveau de la marée, de la surcote et des conditions de vagues. À la ligne de rivage, l'élévation verticale atteinte par la mer est une combinaison du setup des vagues, de la zone de déferlement et du jet de rive. Pour déterminer les niveaux de tempête extrêmes actuels et futurs, l'approche intègre : (1) une estimation probabiliste (probabilité d'occurrence de 1% ou 1:100 ans) des niveaux d'eau extrêmes de tempête basée sur les enregistrements de jauge de marée sur plusieurs décennies ; (2) la variabilité spatiale des niveaux de tempêtes extrêmes le long de la côte basée sur un modèle hydrodynamique calibré pour la région ; (3) un modèle des conditions de vagues extrêmes à la côte calibré pour la région (setup extrême des vagues, jet de rive et volume de franchissement des vagues) et ressortir les valeurs extrêmes statistiques de hauteur de vague (probabilité d'occurrence de 1% ou 2%) ; et (4) la corrélation des extrêmes de conditions de vague et de niveaux de

tempête, c'est-à-dire la probabilité d'occurrence conjointe des conditions de vague et des niveaux d'eau. Les niveaux d'eau extrêmes déterminés à la ligne de rivage peuvent ensuite être superposés sur un modèle d'élévation numérique (données LiDAR) et ainsi traduire l'étendue et la profondeur potentielles d'une submersion dans une région côtière donnée (Ramsay et al., 2012).

Pour définir les zones sujettes à l'érosion côtière, il s'agit de quantifier la migration de la ligne de rivage ou d'une falaise sur une certaine période de temps. Dans les cas de falaise, il est suggéré d'établir une marge de recul derrière le sommet de la falaise soit d'une largeur de deux fois la hauteur de la falaise (pour les falaises reculant de moins de 5 m par 100 ans), soit de deux fois la hauteur de la falaise et d'une marge supplémentaire dont la largeur est fonction du taux moyen de recul historique (pour les falaises ayant un taux de recul supérieur à 5 m par 100 ans). Bien qu'il reste difficile d'évaluer avec précision la migration de la ligne de rivage à une échelle décennale ou centennale en raison d'une multitude de variables, incluant les impacts des changements climatiques, le développement d'un modèle conceptuel du fonctionnement d'une section de côte permettra de réaliser une telle estimation. Ce modèle inclut les changements historiques de la ligne de rivage, les tendances actuelles, si les changements sont permanents, en cours ou en inversion, ainsi que les facteurs et processus en cause. Sur un horizon de planification de 100 ans, la migration de la ligne de rivage est fonction des fluctuations à court terme relatives à des événements épisodiques, de la dynamique à moyen terme et de la tendance à long terme, en lien notamment avec des événements de tempête érosifs et le réajustement, les cycles climatiques, les mouvements verticaux de la croûte terrestre, la hausse du niveau marin et les interventions humaines à la côte. L'analyse historique de la ligne de rivage pour quantifier les fluctuations est souvent basée sur l'étude des photographies aériennes, des images satellitaires, des levés et des cartes. La position de la ligne de rivage réfère à des éléments naturels visibles, tels que le bord d'une falaise, la ligne de végétation, le pied d'une dune, plutôt qu'à des niveaux marégraphiques. Différents modèles existent aussi pour déterminer cette ligne de référence (Ramsay et al., 2012).

Pour estimer la vulnérabilité des infrastructures face à la hausse du niveau marin relatif, les conseils régionaux peuvent utiliser des données d'élévation LiDAR, là où elles sont disponibles. Les données d'élévation sont standardisées sur une ligne de base commune qui est la ligne des hautes eaux moyennes de printemps (définie comme étant la moyenne des 10% plus hautes marées). Trois bandes d'élévation sont tracées et cartographiées : moins de 50 cm, 50 à 100 cm et 100 à 150 cm. Pour chaque bande, les bâtiments et infrastructures sont comptés. Il s'agit là d'une première étape puisque l'évaluation de la vulnérabilité d'un secteur doit être basée sur les caractéristiques côtières locales, telles que la taille et la probabilité des événements de tempêtes à un endroit donné (Parliamentary Commissioner for the Environment, 2015).

Dans leur index de sensibilité des côtes de la Nouvelle-Zélande, Gibb et al. (1992) ont classifié la susceptibilité des diverses portions de côte basée sur huit variables : l'élévation de la première ligne de défense, le jet de rive des vagues

de tempête, le gradient de pente de l'arrière-plage (derrière la première ligne de défense), la hauteur des vagues de tsunamis (maximum enregistré au-dessus de l'altitude marégraphique de référence), la lithologie de la côte, la géomorphologie de la côte, le taux d'érosion à long terme et les fluctuations à court terme. L'élévation de la première ligne de défense (ligne de côte) est relative à la LHEMP et permet d'estimer la sensibilité de la zone adjacente à la submersion. La LHEMP sert également de ligne de référence pour la classification de la sensibilité face au jet de rive des vagues de tempête. Cette élévation peut être calculée ou estimée sur le terrain à l'aide des débris de tempête, de bermes de tempête, de la ligne végétation inférieure (sur les côtes rocheuses). Le taux d'érosion à long terme cherche à déterminer la tendance horizontale de la ligne de rivage sur 30 à 50 ans, voire au-delà de 100 ans si possible. La ligne de référence peut notamment référer à la LHEM, au pied d'une dune ou d'une falaise. La classification pour l'ensemble des variables est la suivante présentée dans le tableau 1 (Gibb et al., 1992).

Tableau 1. Classification des variables dans l'index de sensibilité des côtes de la Nouvelle-Zélande

Classes	1	2	3	4	5
Élévation au-dessus de la LHEMP (m) de la première ligne de défense	>20,0	20,0-10,1	10,0-5,1	5,0-2,0	<2,0
Élévation au-dessus de la LHEMP (m) du jet de rive maximal des vagues de tempête	<1,0	1,0-1,5	1,6-2,5	2,6-5,0	>5,0
Gradient de pente de l'arrière-plage (°)	>20	20-11	10-6	5-2	<2
Hauteur de vague de tsunami maximale (m)	<0,5	0,5-1,5	1,6-4,0	4,1-10,0	>10
Lithologie de la côte	Roche plutonique, intrusive,	Roche faiblement métamorphisée,	Roche métamorphique cisailée,	Ignimbrite non-soudée, cendre	Cendre volcanique ou sédiment

	fortement métamorphisée, lave volcanique, dyke	ignimbrite dense, brèche volcanique, roche sédimentaire densément indurée	ignimbrite partiellement soudée, roche sédimentaire modérément indurée	volcanique consolidée, roche sédimentaire faiblement indurée	non-consolidé, tourbe, bentonite (altération de cendre volcanique)
Géomorphologie de la côte	Plateforme et falaise rocheuse (roche très dure)	Plateforme et falaise rocheuse (roche dure)	Plateforme et falaise rocheuse (roche moyennement dure) et moraine	Plateforme et falaise rocheuse (roche tendre), delta alluviaux, marais, mangrove	Barrière de sable ou de gravier, dune, plage, embouchure de rivière.
Taux d'érosion à long terme (m/an)	>+0,50 (avancée)	+0,50 à -0,02	-0,03 à -0,49	-0,50 à -2,00	>-2,00 (érosion)
Fluctuation à court terme (m)	<2	2-5	6-10	11-30	>30

Source : Gibb et al. (1992)

2.5. En résumé

La revue de littérature a permis de ressortir les lignes de référence ainsi que les méthodes de détermination utilisées dans la gestion des zones côtières dans les provinces maritimes canadiennes ainsi qu'en France, au Royaume-Uni, en Australie (Nouvelle-Galles du Sud et Queensland) et en Nouvelle-Zélande. Les méthodes statistiques menant à l'établissement d'un niveau marégraphique sont majoritairement utilisées relativement à la délimitation entre le territoire public et le domaine privé. Les lignes de hautes eaux de référence utilisées pour déterminer les limites cadastrales en milieu côtier varie entre les pays et même entre les provinces ou les états d'un même pays (ex. LHE, LHEO, LHEM, LHEMP, etc.). Comme il a été souligné dans la littérature scientifique, la ligne des hautes eaux ne présente pas de définition unique (Shalowitz, 1964 ; Briscoe, 1983 ; Liu et al., 2014b-c). Les données utilisées dans le calcul diffèrent au niveau des données de marée prises en compte (ex. l'ensemble des marées hautes de l'année ou marées hautes du printemps) et de la période d'enregistrement utilisée (ex. période non déterminée ou période de 19 ans). Alors qu'au Québec, dans un contexte cadastral, la ligne des hautes eaux prend en compte la plus haute marée du mois de mars moyennée sur 19 ans (Bureau de l'arpenteur général du Québec, 2013), la ligne des hautes eaux au Nouveau-

Brunswick est le résultat de l'élévation moyenne des marées hautes normales, sans que la période d'enregistrement ne soit spécifiée (Ministère des Ressources naturelles, 2014). Certaines définitions spécifient également l'inclusion ou l'exclusion des événements à caractère exceptionnel, comme c'est le cas pour la Nouvelle-Écosse.

Les provinces de Terre-Neuve-et-Labrador et de la Colombie-Britannique, l'État de Washington (É.-U.) ainsi que la France utilisent d'autres types d'approche pour déterminer leurs limites cadastrales. La méthode de détermination utilisée par la Colombie-Britannique et Washington en est une botanique et se base sur les plantes tolérantes au sel (Olson et Stockdale, 2010 ; AunsencoSandwell, 2011). Comme c'est le cas pour la méthode botanique prévue à la PPRLPI, l'application de ce type de méthode implique l'établissement d'une liste exhaustive d'espèces de plantes indicatrices ainsi que des connaissances botaniques de la part des intervenants appelés à déterminer la LHE. La méthode multicritère de la France (CETMEF, 2013), basée à la fois sur les caractéristiques botaniques et morpho-sédimentaires des milieux côtiers, permet à l'utilisateur de se fier sur plusieurs indicateurs du milieu pour établir la ligne de référence. Finalement, la province de Terre-Neuve-et-Labrador présente une approche statistique différente (Water Resources Management, 2001), intégrant plusieurs variables hydrodynamiques pouvant influencer la localisation d'une ligne des hautes eaux en milieu côtier (vagues, tempêtes et niveaux d'eau), et ce, dans une optique de changements climatiques sur 100 ans. La méthode, qui n'est d'ailleurs que très peu définie dans les documents consultés, nécessite des données de vagues et de niveaux d'eau sur une période de temps suffisante à l'analyse des probabilités d'occurrence.

Il ressort une tendance marquée quant à la prévision des niveaux pouvant être atteint sur la côte par les agents hydrodynamiques marins (ex. Water Resources Management, 2001 ; Ministry for the Environment, 2008 ; AusencoSandwell, 2011 ; Environment Agency, 2011a-b ; Elemental Sustainability Consulting Ltd, 2012 ; Ramsay et al., 2012 ; State of Queensland, 2013b ; Direction générale de la prévention des risques, 2014). Ce type d'approche statistique intégrant les variables hydrodynamiques (approche hydrodynamique côtière) est davantage mis de l'avant lorsqu'il est question de définition et de gestion des zones côtières. Les objectifs ici sont de délimiter la limite supérieure de l'écosystème côtier ainsi que d'évaluer la portée des agents hydrodynamiques marins, des aléas et d'estimer la vulnérabilité des zones côtières à long terme. Un zonage ou un aménagement du territoire cohérent peut alors être envisagé. Non seulement les méthodes privilégiées par les gouvernements à l'international visent à définir les niveaux d'eau et les hauteurs de vagues pouvant être atteints, on cherche à décrire les événements exceptionnels pouvant intégrer l'ensemble des scénarios extrêmes, lesquels incluent les variables suivantes : niveaux d'eau et hauteurs de vagues extrêmes, plus hautes marées astronomiques, hausse du niveau marin relatif, mouvement vertical de la croûte terrestre, portée du setup et du jet de rive. Puisque l'ensemble de ces facteurs auront des impacts différents localement, étant fonction de la bathymétrie et de la morphologie de la côte, la modélisation devient un outil préconisé pour évaluer les impacts à la côte. L'approche hydrodynamique côtière nécessite donc une certaine quantité

et qualité de données enregistrées (niveaux d'eau, hauteur de vagues, données météorologiques, données bathymétriques) pour prévoir les niveaux extrêmes pouvant être atteints par les agents hydrodynamiques marins à long terme.

La gestion des risques côtiers se divise en deux objectifs : déterminer les zones sujettes à la submersion et celles sujettes à l'érosion. La limite supérieure des zones sujettes à la submersion réfère souvent à une élévation ou à une largeur déterminée, établie à partir d'une ligne de base (Ministry for the Environment, 2008 ; Department of Environment, Climate Change and Water NSW, 2010 ; AusencoSandwell, 2011 ; Environment Agency, 2011a-b ; State of Queensland, 2013b). Les lignes de base recensées dans la présente revue de littérature sont le niveau marin moyen (actuel ou de 1990), le niveau des plus hautes marées astronomiques, qui réfèrent à la méthode statistique, et la limite naturelle (utilisée en Colombie-Britannique). L'élévation ou la largeur sont notamment définies en calculant des probabilités d'occurrence relatives aux divers facteurs. Dans certains cas, la hauteur fixée rapporte aux scénarios de hausse du niveau marin sur l'horizon 2100 (entre 0,6 et 0,9 m, selon l'endroit).

La ligne de rivage (ou le trait de côte en France) et le front dunaire sont les indicateurs morphologiques de référence pour déterminer les zones sujettes à l'érosion (Gibb et al., 1992 ; DEFRA, 2006a-b ; Ramsay et al., 2012 ; State of Queensland, 2013b ; Direction générale de la prévention des risques, 2014 ; CEREMA, 2015). Les taux de recul à long terme et le recul lié à un événement de tempête ponctuel de ces indicateurs servent à délimiter les zones. La Nouvelle-Zélande et le Queensland intègrent également l'érosion pouvant être engendrée par la hausse du niveau marin (Department of Environment, Climate Change and Water NSW, 2010 ; State of Queensland, 2013b). Notons que le Queensland ajoute un facteur de sécurité de 40% à la zone sujette à l'érosion déterminée (State of Queensland, 2013b).

Les indicateurs morphologiques sont davantage utilisés dans l'identification de lignes de référence relatives à la zone côtière dans une optique de gestion et de protection de l'environnement côtier (Baker et Watkins, 1991 ; Gibb et al., 1992 ; AusencoSandwell, 2011 ; Ramsay et al., 2012 ; CETMEF, 2013 ; State of Queensland, 2013b ; *Survey and Mapping Infrastructure Act 2003*). Le Queensland, par exemple, priorise l'utilisation d'indicateurs naturels dans la localisation des limites maritimes, tout en soulignant l'importance que ceux-ci soient stables et durables à long terme et qu'ils ne soient pas sujets à la submersion en cas de conditions météo-marines moyennes (State of Queensland, 2003b). La Nouvelle-Zélande, dans la délimitation du territoire privé, préconise également l'utilisation d'indicateurs significatifs et reconnaissables attribués à des éléments morphologiques (pied de falaise ou de dune, limite de végétation, ligne de débris, etc. ; Baker et Watkins, 1991).

Le choix d'une méthode de détermination d'une ligne de référence réfère donc aux objectifs visés et aux avantages recherchés. Peu importe la méthode utilisée, les lignes de référence utilisées sont appelées à varier dans le temps et l'espace en raison du caractère dynamique des milieux côtiers. Dans les études recensées, la comparaison des lignes de référence associées aux différentes méthodes de détermination (morphologique ou statistique) suggérerait que les

indicateurs morphologiques localisés le plus vers les terres (dune ou pied de falaise ou limite de la végétation) étaient davantage stables et moins sujets aux variations des niveaux d'eau et de la morphologie de l'estran à court terme. Ces indicateurs témoignent de la portée des inondations associées aux plus hauts niveaux d'eau. Bien que la position verticale des limites marégraphiques puisse être stable, la position horizontale ou planimétrique est sujette à plus de variations. Ces constatations réfèrent particulièrement aux milieux exposés dont la plage est composée de matériel érodable. Pour les sites moins exposés aux vagues, comme les marais abrités, les limites marégraphiques constituaient des limites acceptables (Morton et Speed, 1998 ; Liu et al., 2014b-c).

Dans le cadre du projet actuel, la ligne de référence recherchée doit représenter un état d'équilibre dans le temps. Alors que les lignes associées à des niveaux marégraphiques sont stables au niveau de leur altitude, leur position sur l'estran est hautement variable. Les indicateurs morphologiques localisés au sommet de l'estran présentent davantage de stabilité au niveau de leur position à court et moyen termes. Ceux-ci sont d'ailleurs plus faciles à reconnaître sur le terrain qu'un niveau marégraphique précis, qui nécessite des instruments de précision. Quant à la méthode hydrodynamique, elle présente l'avantage de pouvoir couvrir de grands territoires et de générer des prévisions à long terme, notamment en lien avec les changements climatiques et la hausse du niveau marin.

3. ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

3.1. Retour sur l'atelier 1

Pour répondre aux objectifs spécifiques 1 et 2 relatifs au développement d'une méthode éco-géomorphologique, des rencontres avec les différents intervenants utilisant la LHE de la PPRLPI (Atelier 1) ont été tenues sur le territoire du Québec maritime à l'automne 2016. Les lacunes et les besoins associés à l'identification de cette limite et à l'application des règles et normes y étant associées ont été exprimés.

Préalablement aux ateliers, il a été demandé aux participants de remplir un questionnaire (annexe A). Ce dernier avait premièrement pour objectif de démarrer une réflexion sur les problématiques liées à la détermination de la LHE en milieu côtier avant la tenue de l'atelier et deuxièmement de recueillir de l'information sur la détermination de la LHE selon le cadre d'application.

Un total de 62 questionnaires a été comptabilisé. La provenance des intervenants est indiquée dans le tableau 2. Le cadre d'application de la LHE, et donc de la PPRLI, est variable selon la profession des répondants. Les principaux éléments évoqués sont les suivants :

- Application, rédaction, avis, validation de la Politique ou de règlements municipaux y étant associés ;
- Caractérisation écologique d'un milieu (délimitation de milieux humides ou de l'habitat du poisson) ;
- Cartographie ;
- Certificat d'autorisation environnementale ;
- Certificat de localisation et d'implantation ;
- Émission de permis de construction, de travaux, d'aménagement ou d'installation de fosses septiques ;
- Implantation d'un ouvrage de protection des rives en vue notamment de prévoir les mesures de compensation en lien avec l'empiètement sur le littoral et dans l'habitat du poisson ;
- Projet de lotissement ou de développement (évaluer la faisabilité) ;
- Projet de restauration des dunes (Îles-de-la-Madeleine) ;
- Sensibilisation des citoyens.

Des 62 répondants, 22 ont évalué que la méthode botanique (experte ou simplifiée) ou la méthode hydrologique était adéquate ; 19 répondants ont estimé que ces méthodes n'étaient pas adéquates ; 15 répondants ont indiqué qu'elles étaient plus ou moins adéquates ou que ça dépendait des cas. On remarque également que des indicateurs autres que botaniques sont parfois

utilisés : marnage, dépôt de sédiment, laisses de débris, encoche d'érosion, ligne de rivage, lichen sur les arbres ou les enrochements, indicateurs géomorphologiques (non-spécifiés), la plus haute limite entre la ligne de débris et la ligne de végétation dense.

Tableau 2. Intervenants ayant répondu au questionnaire envoyé avant l'Atelier 1

Organisme/service	Nombre de répondant
Arpenteurs-géomètres	11
Ministère du Développement durable, de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques	10
Ministère de la Sécurité publique	2
Ministère du Transport, de la mobilité durable et de l'électrification des transports	7
Municipalité régionale de comté	11
Organismes autres (Comités ZIP, Attention Fragiles)	4
Villes et municipalités	17
Total	62

Les problèmes soulevés dans le questionnaire par rapport aux méthodes actuellement prévues à la PPRLP sont regroupés dans le tableau 3. Dans le questionnaire, il était demandé aux intervenants de localiser, sur des profils de plage, la limite qu'ils jugeaient la plus adéquate entre une limite A (LHE botanique située au milieu de l'arrière-plage), une limite B (limite établie à partir des critères éco-géomorphologiques et située au front de l'arrière-plage) ou une limite de leur choix. Une douzaine d'intervenants ont choisi la limite éco-géomorphologique (LG) pour les deux profils. Un peu moins que le tiers des répondants (respectivement 27 et 23 des 62 répondants) ont choisi la limite botanique, plus éloignée de la mer que la LG dans les deux cas. Près du quart des répondants (respectivement 14 et 19 des 62 répondants) ont choisi une autre limite. Pour le premier profil, cette autre limite était souvent la limite de la végétation ligneuse, plus éloignée encore que la limite botanique. Pour le second profil, la ligne de débris de tempête, située à mi-chemin entre la LHE botanique et la LG, était davantage choisie ; la ligne de végétation ligneuse venait au second choix. Neuf répondants n'ont pas indiqué de limite. Il ressort donc qu'en majorité, les répondants avaient tendance à opter pour une limite plus éloignée de la mer.

**Tableau 3. Problématiques soulevées dans le questionnaire
envoyé avant l'Atelier 1**

Problématiques : méthode botanique	Problématiques : niveau de récurrence 2 ans
Cas avec peu ou pas de végétation ; anthropisation	Nécessite des outils précis (DGPS) ; coûteux
Présence d'un remblai et/ou de gazon	Données des niveaux de récurrence 2 ans pas disponibles partout
Manque de connaissances en botanique ou de ressources pour engager un professionnel	Données des niveaux de récurrence 2 ans ne sont pas à jour
Fluctuation saisonnière et annuelle de la LHE (des plantes) ; milieu dynamique	Niveau de récurrence 2 ans en milieu maritime ne prend pas en compte les vagues
Accrétion récente de terrasse végétalisée	Niveau de récurrence 2 ans ne concorde pas avec la LHE botanique
Période limitée pour identifier la LHE (été)	Les vagues ne montent pas à la même hauteur, même localement
Difficile de localiser précisément la LHE	
LHE pas uniforme le long de la côte	
Difficulté plus élevée dans les marais maritimes ou saumâtres et dans les cas de côtes rocheuses (pas/peu de végétation/falaise)	
La LHE botanique ne concorde pas avec les autres indicateurs physiques	
Difficile de repérer les quelques indicateurs permettant d'appliquer la méthode botanique simplifiée en milieu côtier	
Présence d'ouvrages de protection qui détruisent les indicateurs et changent la dynamique côtière	
Exagération de la largeur de la bande riveraine	
Subjectivité	
Confusion entre la LHE de la PPRLPI, la limite cadastrale et le trait de côte (cadre normatif)	
Difficile à comprendre pour le citoyen	

Les solutions proposées pour pallier aux problématiques soulevées peuvent être regroupées de la façon suivante :

- Cartographie d'un niveau de récurrence 2 ans officiel pour l'ensemble du territoire, intégrant le jet de rive et révisé périodiquement ;

- Ajouter, dans la PPRLPI, d'autres critères physiques ou géomorphologiques et tenir compte, dans la description de la méthode, des saisons et des événements météorologiques récents ;
- Intégrer une zone tampon plus large en prévision des événements de tempête ;
- Vulgarisation, sensibilisation et formation relativement à la PPRLPI et aux méthodes de détermination de la LHE (avoir un vocabulaire commun, notamment au niveau des subdivisions de la côte) ;
- Restreindre le nombre d'intervenants pouvant déterminer la LHE et obliger le rapport d'un professionnel ;
- Développer une méthode adaptée aux Îles-de-la-Madeleine.

Les cinq ateliers se sont tenus dans chacune des régions touchées par le projet : Côte-Nord, Québec (Chaudières-Appalaches et Capitale-Nationale-Charlevoix), Bas-Saint-Laurent, Gaspésie et Îles-de-la-Madeleine. Ces ateliers ont permis de rejoindre les différents intervenants qui utilisent ou qui doivent déterminer la LHE sur les littoraux du Québec maritime. Ces rencontres ont donc rassemblé des arpenteurs-géomètres, des employés des municipalités et des MRC (directeurs généraux, aménagistes, urbanistes, et inspecteurs) ainsi que des professionnels des différents ministères provinciaux concernés (MTMDET, MDDELCC et MSP).

Les ateliers visaient dans un premier temps à présenter un état des connaissances sur les différentes approches utilisées pour déterminer la LHE ainsi que les résultats préliminaires sur les deux approches développées par l'équipe de recherche. Dans un deuxième temps, sous la forme d'un atelier en petits groupes, les participants devaient identifier la LHE sur des profils types de leur région, et échanger sur les lacunes, les contraintes, les avantages et les inconvénients liés à l'application des différentes méthodes de détermination de la LHE en milieu côtier. Nous souhaitons aussi identifier les besoins des intervenants ainsi que des pistes de solutions afin de nous aider à déterminer la méthode la plus appropriée à être appliquée sur le terrain.

Nous avons aussi relevé certaines différences selon la profession exercée par les participants qui déterminent la LHE. Par exemple, les arpenteurs-géomètres fonctionnent davantage avec des cotes altitudinales, même si la méthode botanique prévaut selon la PPRLPI. Lorsqu'ils utilisent la méthode botanique, ils utilisent la limite de végétation côtière dense (ammophile à ligule courte, élyme des sables) alors que ces plantes sont exclues depuis 2015 des plantes indicatrices pour la LHE. Les employés du ministère de la Sécurité Publique (MSP) vont généralement se baser sur le trait de côte comme stipulé dans le cadre normatif pour la gestion des zones d'érosion côtière. Les aménagistes et les urbanistes ont aussi tendance à utiliser le trait de côte ou encore la végétation ligneuse. Aussi, dépendamment du but cherché dans l'identification de la LHE (ex. aménagement, environnement, sécurité civile), la technique utilisée diffère.

3.1.1. Lacunes et problématiques

Plusieurs problématiques sont ressorties lors des ateliers. Le tableau 4 résume les lacunes et problématiques relevées lors des ateliers de décembre 2016, en lien avec la détermination de la LHE en milieu maritime. Aux Îles-de-la-Madeleine, les lacunes et les problématiques soulevées durant l'atelier sont différentes de celles notées dans les autres régions, étant donné la dynamique côtière propre à cette région. C'est pourquoi une colonne est consacrée à cette région dans le tableau.

Tableau 4. Lacunes et problématiques relevées par les participants lors des cinq ateliers de décembre 2016

Lacunes et problématiques	
Communes à toutes les régions	Particulières aux Îles-de-la-Madeleine
Manque de connaissances en botanique	Le territoire est restreint, les infrastructures ou encore la LHE ne peuvent être déplacées de plusieurs mètres
Manque de ressources pour engager des botanistes	Les arpenteurs-géomètres n'utilisent pas de cotes mais plutôt les laisses de marées, la limite de végétation dense ou encore le «gros bon sens»
Difficulté à déterminer une LHE dans les milieux anthropisés	Si on exclut la végétation côtière du calcul des plantes humides/terrestres (depuis la révision de la PPRLPI en 2015), on ne peut pas délimiter de LHE botanique car il ne pousse pas autre chose sur la côte
Subjectivité selon la personne et la profession qu'elle exerce	Milieu extrêmement dynamique
Manque de communication entre les ministères et ceux qui déterminent la LHE sur le terrain (ex. les gens en région ne savaient pas que la PPRLPI avait été révisée en 2015)	La méthode de détermination de la LHE ne tient pas compte de la mobilité des dunes
Confusion entre la LHE du Code civil du Québec et la LHE de la PPRLPI	
Confusion entre la LHE et le trait de côte du cadre normatif (MSP)	
Accès aux données difficile (ex. mise à jour cote hydrologique)	
La dernière mise à jour des cotes 0-2 ans date de 1986 au Bas-Saint-Laurent	
Cote 0-2 ans ne tient pas compte des vagues	
La LHE actuelle ne tient pas compte des milieux en transition	
Effets de bout causés par des enrochements ou autres structures rigides	
Les côtes sont en évolution constante dans le temps et dans l'espace	

3.1.2. Solutions

Des pistes de solutions ont aussi été évoquées lors des cinq ateliers. Celles-ci concernent parfois directement la détermination de la LHE alors qu'à d'autres reprises, elles concernent plus l'aménagement du territoire et la protection de milieux sensibles.

Les pistes de solutions concernant la détermination de la LHE sont :

- Cartographier une ligne géoréférencée qu'il faudrait réviser périodiquement car ça demeure une limite mobile (surtout préconisée par les arpenteurs-géomètres et aménagistes) ;
- Utiliser des polygones plutôt qu'une ligne (zone tampon) ;
- Utiliser directement une cote extrême, comme le niveau d'eau atteint par la tempête de 2010 ;
- Intégrer l'altitude (Z) ;
- Réintégrer les plantes exclues en 2015 du calcul de la LHE et avoir une plus grande bande riveraine.

Les pistes de solutions concernant l'aménagement du territoire et la protection de milieux sensibles sont les suivantes :

- La LHE doit être modulable selon le type de côte et selon l'historique de recul de la côte ;
- Intégrer la notion de sensibilité du milieu ;
- Introduire la notion d'espace de liberté comme en milieu fluvial (surtout dans des espaces peu développés) ;
- Faire varier la largeur ou la position de la bande riveraine plutôt que de déplacer la LHE (modulable selon le type de côte) ;
- La LHE ne devrait pas être déterminée sur les flèches littorales car ce sont des milieux trop dynamiques ;
- Avoir deux LHE avec des terminologies et des définitions distinctes, soit une LHE destinée à la protection de l'environnement et une LHE destinée à la sécurité des populations et des infrastructures et à l'aménagement du territoire.

3.2. Détermination d'une ligne des hautes eaux à partir de critères géomorphologiques

Une typologie des critères éco-géomorphologiques a d'abord été développée pour répondre aux objectifs 1 et 2 du projet. Ces critères peuvent être identifiés sur les cas géomorphologiques types se trouvant dans l'estuaire et le golfe du

Saint-Laurent. Ils ont été mesurés sur 166 profils de côtes attribuables à ces cas géomorphologiques. Sur ces profils de côtes, la méthode botanique experte a été appliquée afin de déterminer la position et l'altitude de la limite botanique de la façon actuellement prévue à la PPRLPI. Pour l'ensemble des profils réalisés, une limite géomorphologique (LG) et la ligne des hautes eaux botaniques (LHEB) ont été déterminées. Une analyse comparative de ces deux limites a ainsi pu être complétée. La section suivante présente les résultats relatifs à ce cheminement. Nous en arriverons ainsi à proposer une méthode éco-géomorphologique adaptée au milieu côtier et respectant la perspective des objectifs poursuivis par la PPRLPI.

3.2.1. Typologie des critères éco-géomorphologiques

Pour se référer à certains critères éco-géomorphologiques côtiers, il importe d'abord de définir les différentes portions de la côte (figure 6) qui seront visées dans la détermination d'une ligne des hautes eaux. La classification de la zone côtière utilisée au Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières est basée sur un gradient d'inondation et sur des limites géomorphologiques. L'accent sera mis sur les parties suivantes : le haut estran, la haute-plage et l'arrière-plage.

Les terrasses de plage, les flèches littorales, les tombolos et les côtes dunaires présentent des profils similaires pouvant entrer dans la catégorie des côtes basses sableuses (ou côtes d'accumulation granulaire ; voir section 3.2.2). La zone intertidale, composée du bas estran et du haut estran, est la zone de battement des marées. Le haut estran et le bas estran se distinguent notamment par leur pente, laquelle est plus abrupte au niveau du haut estran ; la flexure (ou le point d'inflexion) constitue la rupture de pente entre le haut estran et le bas estran. Le haut estran est approximativement compris entre le niveau moyen des eaux et le niveau supérieur des hautes eaux. C'est surtout sur le haut estran qu'on observe le jet de rive des vagues.

La haute-plage est une frange bordant le haut estran où les tempêtes créent des bourrelets de débordement (Fraser et Bernatchez, 2006; figures 6 et 7). La haute-plage présente une altitude légèrement supérieure à celle du haut estran. Elle est comprise entre le niveau supérieur des hautes eaux et le niveau atteint par les houles de tempêtes normales. Le régime de submersion sur cette portion de la plage est donc moins fréquent que sur le haut estran, permettant l'établissement plus ou moins permanent de végétation. La végétation éparses et les laisses de tempête sont des indicateurs permettant de localiser la haute-plage, qui n'est pas toujours présente sur le profil de côte. Elle peut se faire éroder lors des événements de tempête (figure 7).

L'arrière-plage, plus rarement submergée, correspond à la zone pouvant être atteinte par les houles lors d'événements de tempêtes exceptionnelles. Elle est généralement caractérisée par de la végétation dense et pérenne ; c'est aussi sur l'arrière-plage que les dunes stabilisées se trouvent.

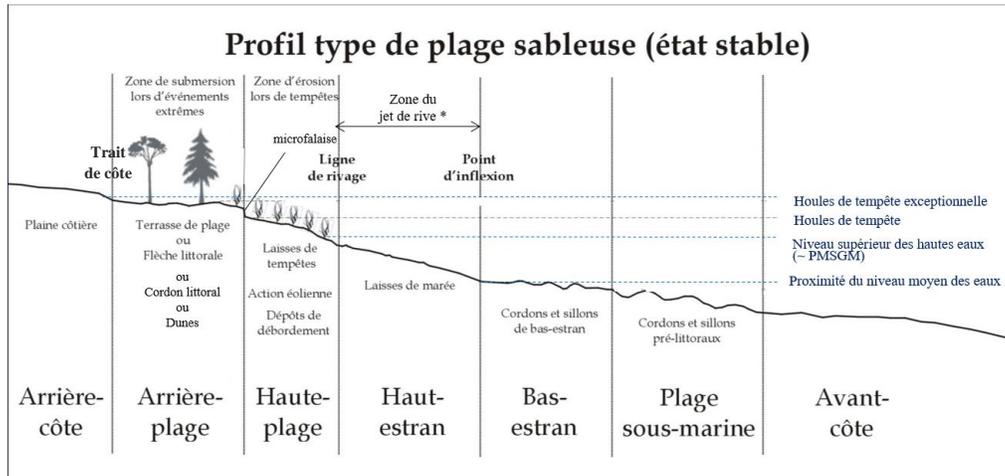


Figure 6. Profil type de plage sableuse à l'état stable (modifiée de Fraser et Bernatchez, 2006)

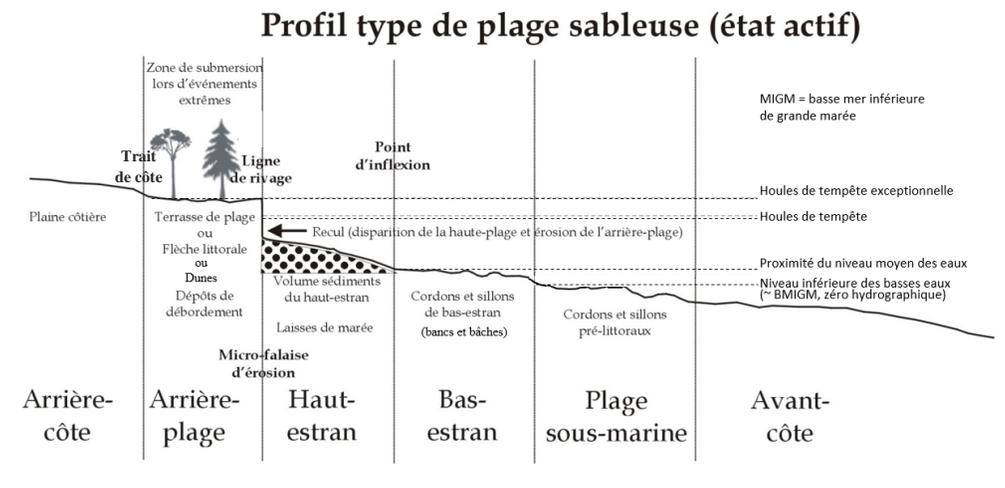


Figure 7. Profil type de plage sableuse à l'état actif (modifiée de Fraser et Bernatchez, 2006)

Le haut estran et la haute-plage peuvent aussi être présents sur le profil de côte à falaise. Lorsqu'il n'y a pas de terrasse de plage devant la falaise (voir section 3.2.2), les houles de tempêtes normales et exceptionnelles vont atteindre différents niveaux sur la face de la falaise (figure 8) plutôt que de s'étendre sur une arrière-plage comme dans le cas des côtes basses d'accumulation.

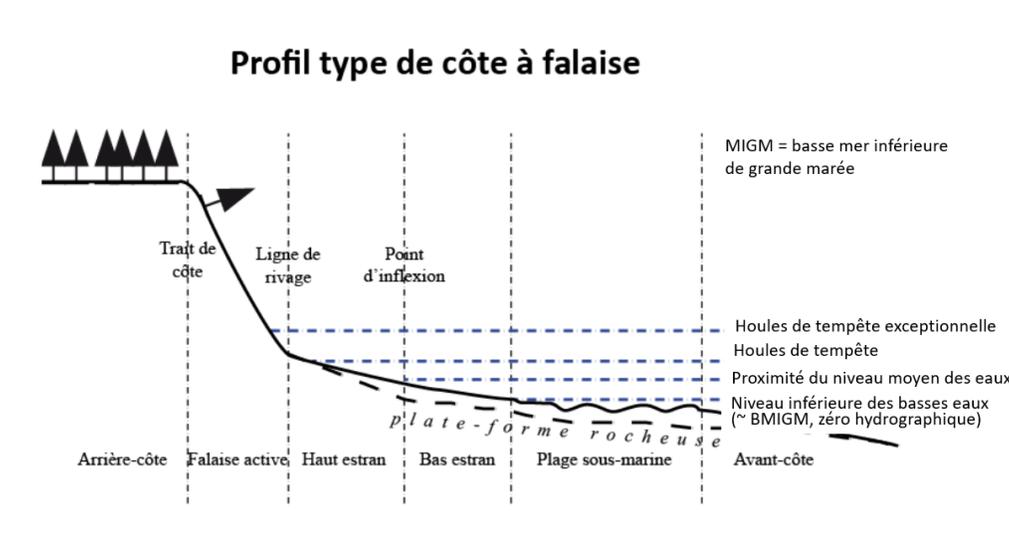


Figure 8. Profil type d'une côte à falaise (modifiée de Fraser et Bernatchez, 2006)

Les côtes à marais maritime comptent parmi les côtes d'accumulation meuble, étant caractérisées par la sédimentation fine. Les marais maritimes comportent également un étagement en lien avec les niveaux d'eau. La slikke, vasière sans végétation, se trouve entre le niveau des basses marées et le niveau marin moyen, où débute le schorre inférieur. Ce dernier s'étend jusqu'au niveau moyen des hautes mers ; le schorre supérieur s'étend du niveau moyen des hautes mers au niveau des plus hautes mers (Dionne, 1986). Une microfalaise d'érosion peut se trouver au front du schorre supérieur, délimitant le schorre inférieur du schorre supérieur.

Cette description des parties des profils de côtes permet de cibler davantage la localisation probable d'une ligne des hautes eaux pour le domaine maritime en fonction des types de côtes. Les critères éco-géomorphologiques se trouvant dans ces espaces côtiers ont donc été utilisés pour développer une méthode de détermination de la LHE pour le domaine maritime.

Sommet d'un escarpement

Un escarpement est décrit comme une paroi verticale ou près de la verticale (entre 15° et la verticale ou surplomb ; CETMEF, 2013). Une rupture de pente entre le haut estran ou la haute-plage marque le pied de l'escarpement (Morton et Speed, 1998). Un second bris de pente en haut de la face abrupte constitue le sommet de l'escarpement : la face de l'escarpement et son sommet forment généralement un angle se rapprochant de 90°. Lorsqu'un escarpement est actif et composé de sédiments meubles (ex. sable, argile), ceux-ci peuvent déborder ou couler devant la paroi et former un talus pouvant atteindre une pente d'équilibre autour de 25°-30° (figure 9). L'angle formé entre le talus et le replat au sommet de l'escarpement sera alors plus grand (obtus) mais formera tout de même une rupture de pente. Le sommet de l'angle, c'est-à-dire la jonction entre la face de la paroi et le replat au sommet, constitue le sommet de l'escarpement utilisé comme critère géomorphologique. Le terme escarpement inclut les microfalaises (moins de 1,5 m de hauteur) et les falaises (1,5 m de hauteur et plus).

Une microfalaise présente à la limite supérieure de l'estran représente généralement la morphologie de la plage à long terme. Le sommet de l'escarpement correspond souvent à la ligne de végétation à partir de laquelle s'étend l'arrière-plage. Un escarpement éphémère peut aussi se former sur l'estran lors d'un événement hydrodynamique particulier qui modifiera la morphologie de la plage (Morton et Speed, 1998). C'est l'escarpement au front de l'arrière-plage qui sera utilisé comme critère géomorphologique. Les falaises ne sont pas des formes d'accumulation et le système, si instable, ne pourra que reculer.

Pied et crête de dune

La dune est une forme géomorphologique s'apparentant à un bourrelet de sable. Lorsqu'une dune est présente au front de l'arrière-plage, deux critères pourront être utilisés : le pied et la crête de la dune. La face de la dune côté mer est utilisée pour localiser ces critères. Le pied de la dune se situe à la rupture de pente entre l'estran ou la haute-plage et la face de la dune (figure 10). La crête est le point le plus élevé au sommet de la dune. Lorsque la dune est active, un escarpement se forme (abrupte ou avec un talus de sable) mais pas nécessairement jusqu'au sommet de la dune. Il importe donc de différencier le haut de l'escarpement et la crête de la dune (figure 10).

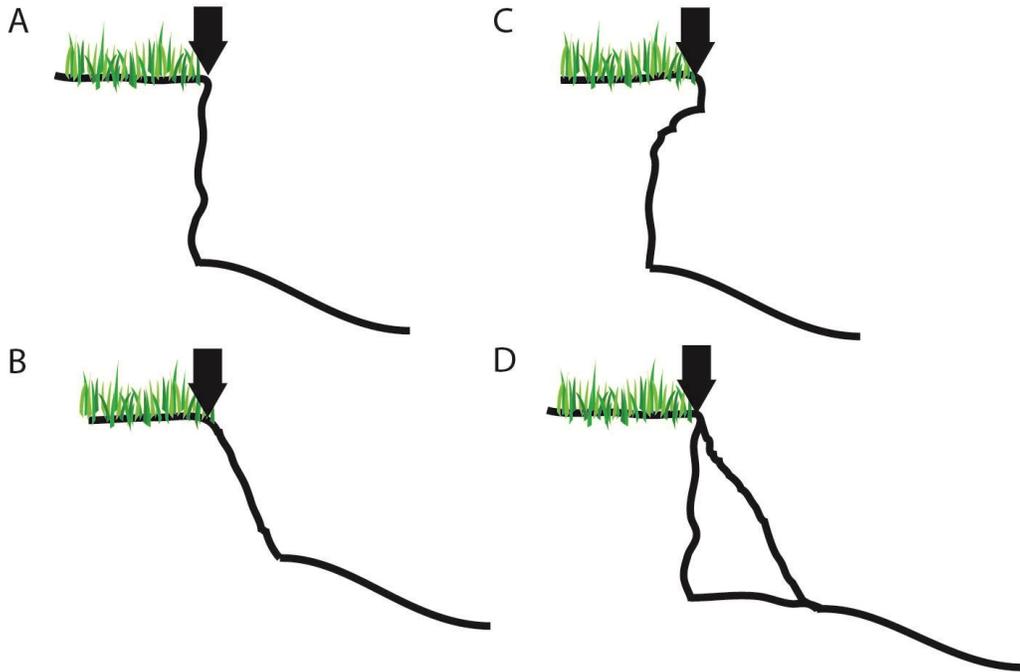


Figure 9. Sommet d'un escarpement utilisé comme critère géomorphologique ; (A) Escarpement vertical ; (B) près de la verticale ; (C) en surplomb ; (D) avec un talus.

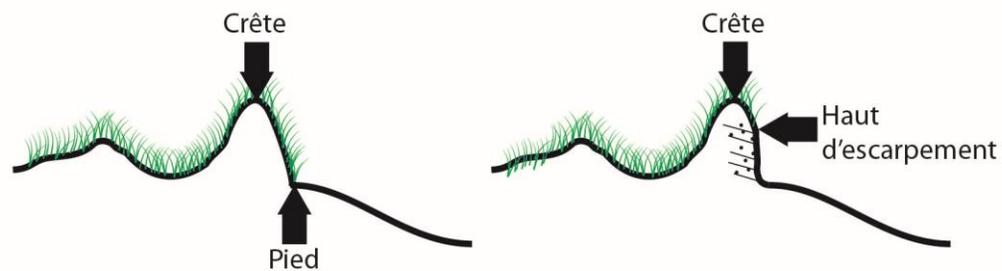


Figure 10. Critères relatifs à une dune

Végétation éparses et dense sur les côtes sableuses

La végétation s'implante le long des plages sableuses en fonction de leur tolérance à la submersion et au sel. Bien que les plantes colonisant les côtes sableuses puissent tolérer les embruns marins, elles ne survivent pas à une submersion marine prolongée (Morton et Speed, 1998). Sur plusieurs de ces côtes, on remarque deux lignes de végétation : celle de la végétation éparses, plus jeune, qui s'implante au sommet de l'estran sur de bas monticules de sable accumulés depuis la dernière tempête majeure, et celle de la végétation dense, plus ancienne, qui s'étend vers les terres (Morton et Speed, 1998). La végétation éparses est présente à partir de la haute-plage, en lien avec un certain niveau de stabilité et la présence de laisses de marée, constituant un sol saisonnier, qui engendrent des conditions écologiques favorables. La végétation qui réussit à s'implanter au niveau de ces laisses reflète donc les niveaux atteints par les plus hautes mers de l'année précédente ; elle peut être éphémère et changer de position ou encore être arrachée lors des tempêtes (CETMEF 2013). Les espèces telles que *Cakile edentula ssp. edentula var. edentula* (caquillier édentulé), *Honckenya peploides ssp. robusta* (honckénye robuste) et *Mertensia maritima ssp. maritima* (mertensie maritime) colonisent la haute-plage et peuvent servir d'indicateurs quant à la détermination de la zone de végétation éparses. La zone de végétation dense est, quant à elle, dominée par des plantes davantage pérennes, implantées dans un habitat plus stable qui n'est pas affecté par la plupart des vagues de tempête (CETMEF, 2013). Le seuil utilisé pour distinguer la végétation éparses de la végétation dense est un recouvrement de la végétation de 75%. Une surface de 1 m² peut servir de référence au besoin.

Aux Îles-de-la-Madeleine, il a été porté à notre attention lors de l'Atelier 2 (voir section 3.3.4) que la couverture du substrat est inférieure à 75% sur les côtes dunaires colonisées que par *Ammophila breviligulata*, bien que le milieu soit stable. Giles (1990) a réalisé des transects sur des dunes aux Îles-de-la-Madeleine sur lesquels les espèces végétales ont été identifiées et le pourcentage de recouvrement de la végétation évalué. Les pourcentages de recouvrement des sections colonisées que par *Ammophila breviligulata* se situent généralement entre 30 et 50% et ce, tant au niveau des dunes bordières que des dunes paraboliques. Un recouvrement de la végétation de 40% est donc recommandé comme seuil de végétation dense dans le cas des côtes dunaires (ou dunifiées) colonisées par *Ammophila breviligulata* aux Îles-de-la-Madeleine.

Terrasse de plage (côte mixte)

Une terrasse de plage confinée se développe parfois devant une falaise, une dune ou un ouvrage de protection, formant une côte mixte. La présence de deux types de côtes au même endroit implique que l'utilisation de l'une ou l'autre, dans le cadre d'une méthode éco-géomorphologique, doit être déterminée sur la base de critères définis.

La pertinence de prendre en considération la terrasse de plage se trouvant devant un autre élément géomorphologique (falaise, dune ou ouvrage de protection), dans l'application de la méthode éco-géomorphologique, repose sur la sensibilité de cette terrasse face à l'érosion. Les données compilées en lien avec le réseau de bornes mis en place par le LDGIZC permettent d'évaluer le déplacement de la ligne de rivage selon le type de côte. Le graphique de la figure 11 montre la fréquence des reculs de la ligne de rivage par rapport à l'ensemble des déplacements mesurés annuellement (avancées et reculs) sur les terrasses de plage et les cordons littoraux suivis par le réseau de bornes entre 2000 et 2017. Sur cette période, près de 50 % des déplacements mesurés correspondaient à des reculs de la ligne de rivage de moins de 5 m. Les reculs de la ligne de rivage de 5 m et plus correspondent quant à eux à 3,2% des déplacements mesurés. Les déplacements nuls ou les avancées correspondent à 47,7 % des mesures effectuées pour cette même période.

Les terrasses de plage présentes sur les côtes mixtes sont d'autant plus sensibles à l'érosion considérant qu'un obstacle (falaise, dune, ouvrage) fait office de mur derrière celles-ci. Si le jet de rive est en mesure d'atteindre cet obstacle, l'énergie des vagues lors de la réflexion est d'autant plus propice à éroder la terrasse de plage. Ainsi, pour réduire la mobilité de la LG dans le temps, la largeur de la terrasse de plage présente sur les côtes mixtes devrait atteindre un minimum de 5 m. Pour éviter que la LG soit tracée en dent de scie le long de la côte, une longueur minimale de 50 m est proposée.

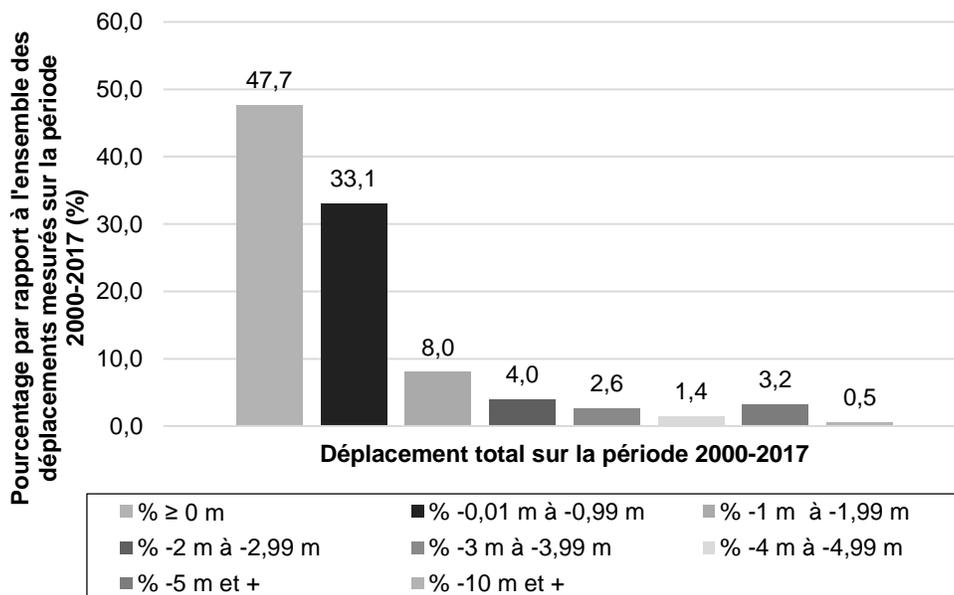


Figure 11. Déplacements de la ligne de rivage mesurés annuellement sur les terrasses de plage et les cordons littoraux du réseau de suivi de bornes du LDGIZC entre 2000 et 2017

Ainsi, pour être considérée dans cette méthode, l'arrière-plage de la terrasse de plage doit répondre à trois critères : 1) être caractérisée par une végétation dense et bien établie ; 2) avoir un minimum de 5 m de largeur ; 3) avoir une longueur d'au moins 50 m. La largeur se mesure du front de la végétation dense ou du sommet de l'escarpement au front de l'arrière-plage jusqu'à la rupture de pente entre l'arrière-plage et la face de la falaise, de la dune ou de l'infrastructure. La longueur de la terrasse de plage est également relative à l'arrière-plage de la côte. Celle-ci doit être complètement végétalisée (végétation dense) et avoir une bande de 5 m de largeur parallèle à la côte sur au moins 50 m (figure 12). La haute-plage n'est en aucun cas prise en compte dans le calcul de la largeur ou de la longueur de la terrasse de plage.

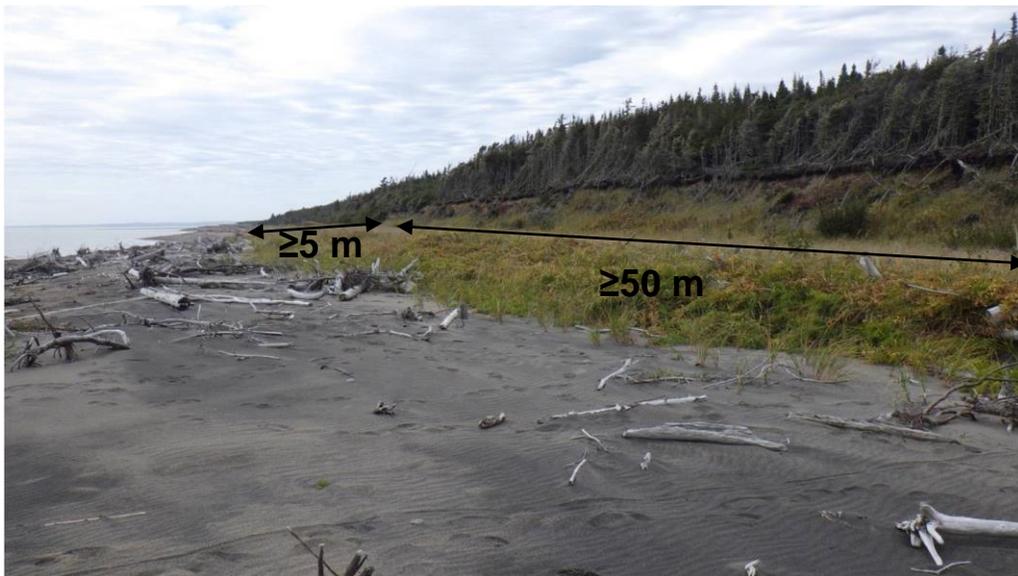


Figure 12. Critères pour déterminer l'inclusion ou l'exclusion d'une terrasse de plage dans les cas de côtes mixtes

Fin du milieu humide côtier

Les milieux humides visés par le présent critère éco-géomorphologique sont les marais maritimes frangeants et abrités (schorre supérieur) ainsi que les milieux humides d'eau douce directement adjacents à un marais maritime. La limite supérieure de ces écosystèmes côtiers, parfois moins évidente au niveau géomorphologique, la pente étant faible et la végétation abondante, est recherchée pour déterminer la LHE. Pour déterminer la méthode à utiliser, on distinguera d'abord les marais maritimes et les milieux humides d'eau douce. Il est à noter que la limite supérieure des milieux humides étudiés dans le cadre

de ce projet a été localisée à l'aide d'imageries aériennes dans le logiciel ArcGIS.

En présence d'un marais maritime, la fin du milieu humide côtier est déterminée par la nature du substrat. La limite supérieure du substrat de schorre supérieur est utilisée (figure 13). Il est chargé en matière organique (restes d'herbacés du schorre) et les sédiments sont vaseux ; ils tachent les doigts et collent lorsqu'ils sont roulés entre le pouce et l'index. La présence d'eau dans le substrat est également un indicateur confirmant qu'on se trouve dans un milieu humide maritime.

Les plus hautes laisses de la marée peuvent aider à déterminer la limite supérieure du milieu humide maritime. Toutefois, cet indicateur physique n'est pas toujours présent et sa localisation n'est pas nécessairement cohérente avec une limite des hautes eaux « normales ». Les laisses de marées peuvent correspondre à des niveaux atteints lors d'événements de tempêtes exceptionnelles. Cet indicateur peut néanmoins servir de repère pour valider la localisation du critère utilisé.

En complément au critère sédimentaire proposé pour déterminer la limite supérieure d'un marais maritime, il serait pertinent d'établir une liste d'espèces de plantes indicatrices. En France, les critères proposés pour délimiter le schorre réfèrent à des caractéristiques hydrographiques, botaniques et pédologiques : le schorre est une zone submergée, que ce soit durant les marées de vives eaux ou les tempêtes ; le sol est composé de sédiments fins vaseux et cohésifs ; la végétation colonisant le schorre est halophile (CETMEF, 2013). Au Québec, le guide *Identification et délimitation des milieux humides du Québec méridional* (Bazoge et al., 2014), qui s'applique à des milieux humides d'eau douce, propose une méthode basée sur des critères botaniques, pédologiques et hydrologiques : l'identification des plantes humides (facultatifs et obligés), la délimitation des sols hydromorphes et l'identification d'indicateurs hydrologiques (saturation du sol en eau, débris ou sédiments apportés par l'eau, etc.).

Les milieux humides d'eau douce directement adjacents aux marais maritimes compliquent l'application d'une méthode éco-géomorphologique pour le domaine maritime. En effet, les caractéristiques biophysiques de ces milieux humides ne sont pas liées aux conditions maritimes côtières (vagues, submersion plus ou moins fréquente par la mer). L'application des méthodes prévues à la PPRLPI pour les milieux d'eau douce est alors justifiée. Leur intégration dans la méthode pour le domaine maritime doit être prévue puisque ces milieux se situent sous la ligne des hautes eaux au même titre que le schorre supérieur adjacent selon la politique. Ce n'est donc pas la limite atteinte par la mer qui est recherchée, mais la limite de l'ensemble des milieux humides.



Figure 13. Microfalaise d'érosion au front du schorre supérieur montrant la nature du substrat et les sédiments vaseux. Le schorre repose sur une unité de slikke et d'argile marine postglaciaire (unité gris-bleu à la base).

Sommet d'infrastructure

La PPRLPI prévoit une méthode de détermination de la ligne des hautes eaux lorsqu'un mur de soutènement est érigé le long de la rive. Dans les cas où ce mur est légalement érigé, la ligne des hautes eaux se situe au haut de l'ouvrage de protection. Il est proposé d'appliquer cette formule à l'ensemble des ouvrages de protection érigés de façon légale le long de la côte. Un ouvrage de protection légalement implanté doit avoir été autorisé en vertu d'un permis délivré par une municipalité, d'un certificat d'autorisation délivré par le MDDELCC ou faire l'objet de droits acquis si la construction est antérieure à l'adoption de la réglementation municipale (MDDELCC, 2015a).

Les infrastructures sont associées aux côtes artificialisées telles que décrites dans la section 3.2.2 qui suit. Ces infrastructures constituent différents ouvrages de protection érigés parallèlement à la côte : enrochement, muret, mur, caisson, gabion, aboiteau, remblai de route, etc. Le critère utilisé est le sommet de l'infrastructure, c'est-à-dire son point le plus élevé. Nous privilégions le maintien de ce critère puisque des phénomènes de franchissement sont régulièrement observés en bordure de côtes artificielles (Chini et Stansby, Didier et al., 2015).

3.2.2. Cas géomorphologiques types

Les cas géomorphologiques types attribuables aux côtes de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent peuvent être regroupés en huit grands types de côtes,

qui sont décrits dans cette section. Des illustrations de profils transversaux faits sur le terrain entre 2015 et 2017 permettent d'illustrer chacun de ces types de côtes. Mentionnons que le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) de l'UQAR identifie 13 types de côte dans le Québec maritime (tableau 5).

On distingue d'abord les côtes basses d'accumulation granulaire. Le terme « granulaire » inclut les sédiments de la taille des sables, des graviers et des galets. Parmi ces côtes basses se trouvent les terrasses de plage, les flèches littorales et les tombolos. Parmi les autres côtes d'accumulation meuble, on retrouve les côtes dunaires (ou dunifiées) et les marais maritimes. L'ensemble des falaises sont regroupées dans le type de côte à falaise, qu'elles soient rocheuses, meubles ou mixtes (portion meuble et portion rocheuse). Les côtes rocheuses dont la pente est douce correspondent aux côtes rocheuses sans falaise. Les côtes présentant un ouvrage de protection ont été regroupées dans le type de côte artificialisé dans le cadre de ce projet.

Terrasse de plage

Une terrasse de plage est attribuable à une accumulation de sable ou de gravier littoral présentant un replat généralement végétalisé et rarement submergé (arrière-plage) derrière la haute-plage (pas toujours présente) ou le haut estran. Un profil transversal typique d'une terrasse de plage est présenté à la figure 14. Un marais maritime se trouve parfois devant la terrasse ; une falaise peut aussi border la terrasse côté terre (côte mixte).

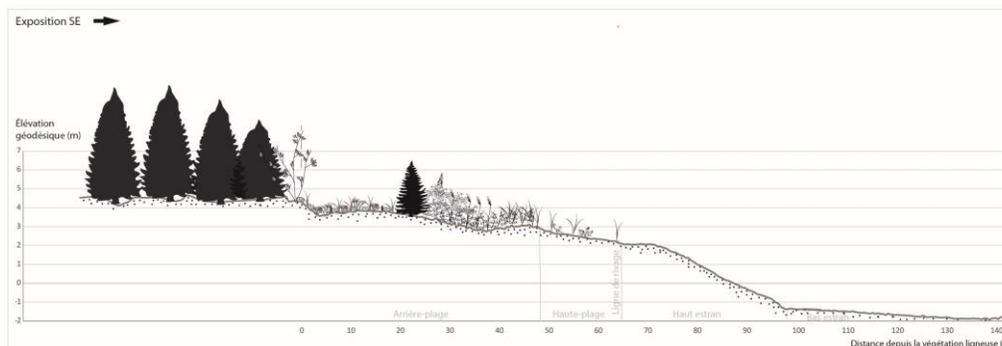


Figure 14. Côte à terrasse de plage (Longue-Pointe-de-Mingan, Côte-Nord)

Dans certains secteurs, notamment sur la côte nord de la Gaspésie, nous avons observé des terrasses de plage dont le haut estran et l'arrière-plage sont composés de sédiments de la taille des galets (figure 15). Les falaises rocheuses à proximité de la plage fournissent des sédiments de grande taille et

l'énergie des vagues, qui peut être très forte à ces endroits, permet de les transporter pour former une côte d'accumulation de galets.



Figure 15. Terrasse de plage composée de sédiments de la taille des galets (Anse-au-Griffon, Gaspésie)

Sur la Côte-Nord, l'action combinée du vent et des vagues permet, par endroit, la formation d'une dune bordière. Celle-ci forme un bourrelet surélevé et parallèle à la côte au front de l'arrière-plage de la terrasse ; quelques formes dunaires reliques peuvent se succéder parallèlement sur l'arrière-plage (figure 16). La dune bordière aura une élévation supérieure au replat de l'arrière-plage.

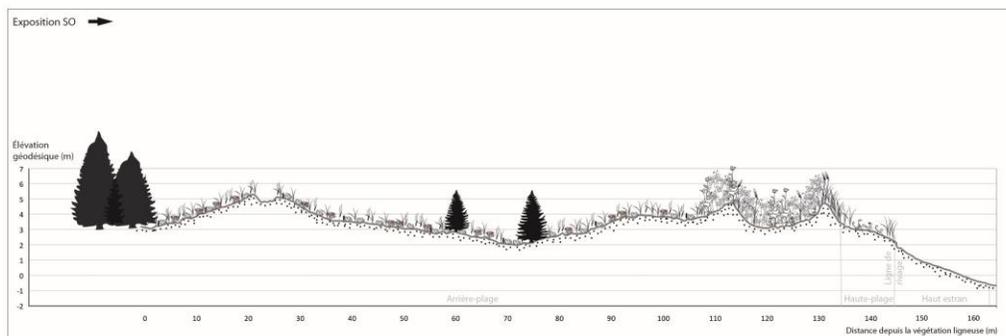


Figure 16. Terrasse de plage présentant une dune bordière (Longue-Pointe-de-Mingan, Côte-Nord)

Flèche littorale

La flèche littorale présente une accumulation de sable ou de gravier qui s'attache à la côte par une extrémité et qui s'étire généralement parallèlement à la côte. L'une des extrémités est libre. On distingue le côté extérieur de la flèche, soit la face la plus exposée aux vagues, et le côté intérieur, qui correspond à la face abritée de la flèche (figure 17). La flèche littorale est souvent bordée d'un marais maritime ou d'une lagune du côté de sa face abritée (côte mixte). Plusieurs flèches littorales se trouvent aussi à l'embouchure de rivières, notamment sur la Côte-Nord. Le profil transversal de chacune des faces de la flèche s'apparente au profil d'une terrasse de plage ; l'arrière-plage est commune aux deux faces. Nous avons également observé des portions de flèche littorale sans arrière-plage ; seule une haute-plage colonisée par de la végétation éparsé sépareit les estrans des deux côtés de la flèche.

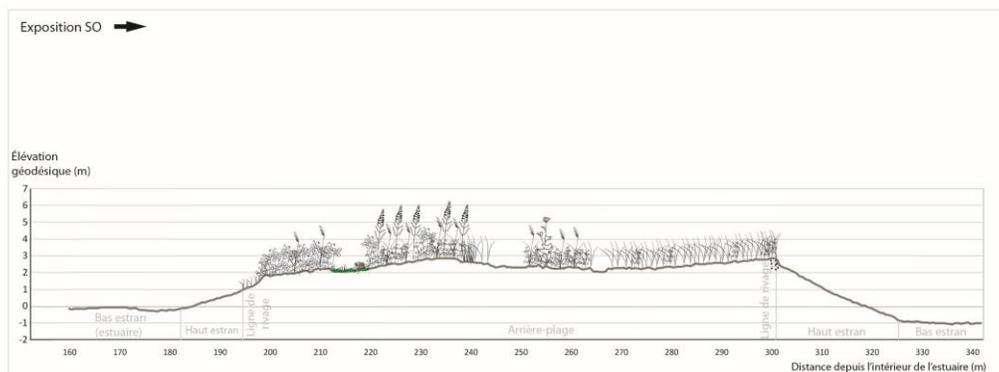


Figure 17. Côte à flèche littorale (Rivière-Saint-Jean, Côte-Nord) ; la face exposée (ou extérieure) se trouve à droite et la face abritée (ou intérieure) se trouve à gauche.

Tombolo

Le tombolo est une côte d'accumulation basse de sable ou de gravier qui relie la côte à un îlot (souvent rocheux) ou deux îlots entre eux. Ce type de côte présente des caractéristiques similaires à une flèche littorale, à l'exception que les deux extrémités sont attachées. Comme pour la flèche littorale, certains tombolos présentent une face extérieure exposée et une face intérieure abritée. Lorsque le tombolo est double, il abrite souvent une lagune côtière. Aux Îles-de-la-Madeleine, ces types de côtes sont la plupart du temps dunifiés.

Côte dunaire ou dunifiée

La côte dunaire est une zone d'accumulation de sable par transport éolien, où la quantité de sable disponible est importante. Le profil de ce type de côte (figure 18) ressemble à celui de la terrasse de plage, à l'exception que la morphologie de l'arrière-plage est caractérisée par un bourrelet ou une succession de bourrelets parallèles à la côte : les dunes. En bordure de la partie supérieure de la plage, il peut se former une dune bordière, de forme allongée et parallèle à la ligne de rivage, qui est formée par l'action combinée des processus éoliens et des vagues. Lorsque la dune bordière, qui fait face à la mer, est en érosion, elle s'apparente à une falaise sableuse. Elle peut également être végétalisée. Particulièrement aux Îles-de-la-Madeleine, il se forme aussi des dunes paraboliques avec des cuvettes de déflation nommées caoudeyre.

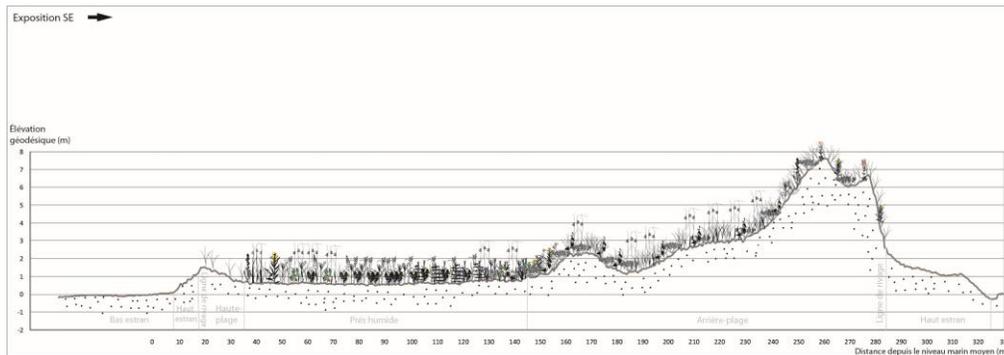


Figure 18. Côte dunaire (Sandy Hook, Îles-de-la-Madeleine)

Marais maritime

Les marais maritimes sont des côtes basses, à faible pente, périodiquement submergées. Ce sont des côtes d'accumulation de sédiments fins colonisées par de la végétation herbacée de milieu humide présentant différent niveau de tolérance au sel (plantes halophiles) et à la submersion. Les parties du marais maritime sont, de la mer vers les terres, la slikke (vasière sans végétation), le schorre inférieur, souvent colonisé par *Spartina alterniflora* ou *Schoenoplectus pungens* (scirpe américain), et le schorre supérieur, qui présente une plus grande diversité d'espèces (figures 19 et 20). Ces trois parties ne sont pas nécessairement toujours présentes (ex. le schorre inférieur peut être érodé, ne laissant qu'un schorre supérieur). Lorsque le marais maritime est en érosion, on distingue souvent une microfalaise d'érosion (ou talard) au front du schorre supérieur.

Sur le territoire étudié, on retrouve des marais maritimes frangeants ou abrités. Les marais maritimes frangeants forment une bande le long de la côte

directement exposée aux vagues. Lorsqu'abrité, le marais maritime se retrouve plutôt derrière une flèche littorale, un tombolo (côté intérieur) ou un îlot rocheux.

La géomorphologie côtière des Îles-de-la-Madeleine est caractérisée par des tombolos doubles reliant des îlots rocheux. Ces tombolos abritent des lagunes côtières. Celles-ci peuvent être définies comme des milieux humides d'eau saumâtre séparés de la mer par un cordon littoral à travers duquel les échanges avec la mer sont possibles soit par percolation, soit par l'intermédiaire d'une brèche (Pinot, 1998). Ces milieux sont inclus dans les côtes à marais maritime abrité dans l'application de la méthode éco-géomorphologique.

Les marais maritimes peuvent être bordés par un milieu humide d'eau douce (marécage arbustif ou arborescent, marais d'eau douce, tourbière). Ces milieux d'eau douce constituent des milieux humides au même titre que les marais maritimes et il importe de considérer les deux écosystèmes dans l'application de la PPRLPI. Cette situation sera traitée dans la proposition de la méthode éco-géomorphologique.

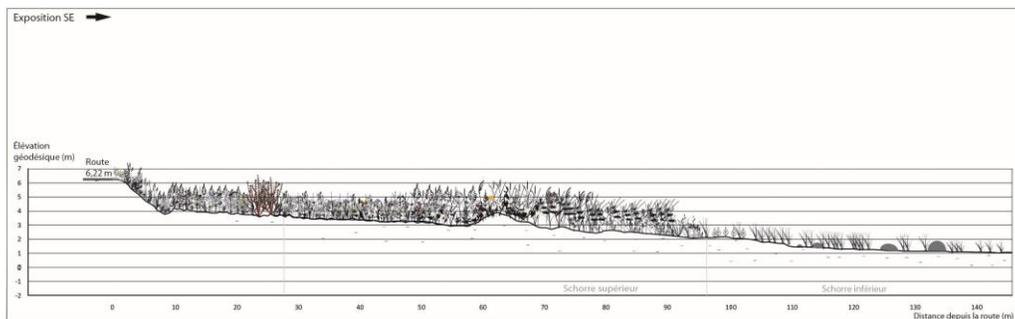


Figure 19. Côte à marais maritime frangeant (Baie des Bacon, Côte-Nord)

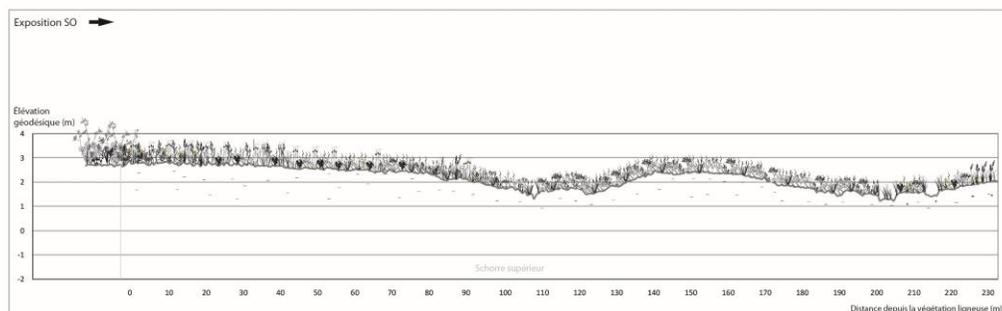


Figure 20. Côte à marais maritime abrité (Cap-Marteau, Bas-Saint-Laurent)

Falaise

Les côtes à falaise présentent un escarpement dont la composition peut être meuble, rocheuse ou mixte (base rocheuse, sommet meuble). Ce type de côte se distingue par une face (ou talus) de pente forte se situant entre environ 15° et la verticale ; elle peut aussi être en surplomb (Guilcher, 1954). La hauteur des falaises est variable à l'échelle du Québec maritime. Elle est d'un minimum de 1,5 m pour être considérée comme une falaise (microfalaise en-deçà de 1,5 m de hauteur). Les falaises sont parfois précédées d'une haute-plage, d'une terrasse de plage (avec un arrière-plage) ou d'un marais maritime (côte mixte).

Les falaises côtières actives ou vives, fréquemment soumises à l'action des vagues et des marées, peuvent avoir des faces plus abruptes, voire en surplomb, et la végétation peut difficilement s'y implanter. On peut aussi remarquer une encoche d'érosion au pied de la falaise. Les falaises stables, dont la face est végétalisée et moins souvent atteinte par les vagues, peuvent avoir une pente moins forte. L'évolution du sommet de la falaise, ou trait de côte, est donc généralement fonction des agents hydrodynamiques. La face de la falaise est régulièrement affectée par les embruns, mais aussi par des jets verticaux particulièrement dans le cas de falaise rocheuse et d'argile. Le trait de côte délimite ainsi le domaine terrestre du domaine maritime et constitue donc le critère géomorphologique pour identifier la limite éco-géomorphologique.

Il importe de distinguer les falaises côtières (figure 21) des versants continentaux (figures 22 et 23). Contrairement aux falaises, l'ensemble du système d'un versant continental ne recule pas en réponse à l'attaque des agents hydrodynamiques côtiers (Pinot, 1998) ; ils ne réagissent pas de façon globale à l'action de la mer. Ces versants ont un profil convexe, généralement végétalisé jusqu'à la base (CETMEF, 2013).

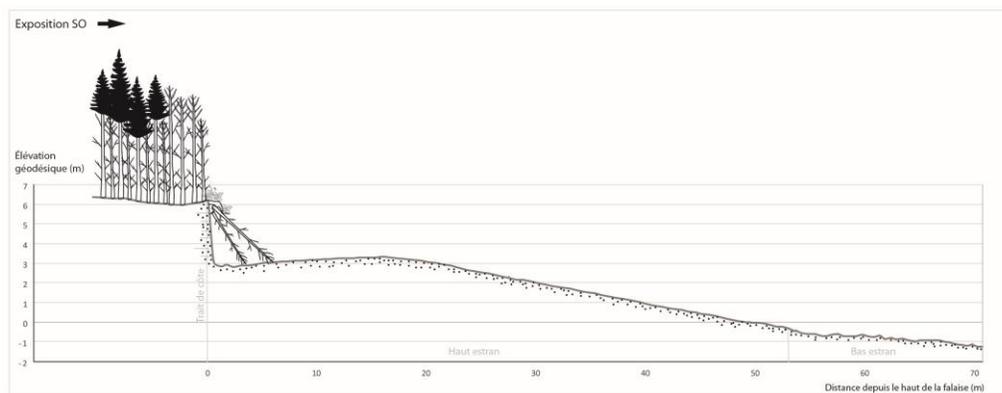


Figure 21. Côte à falaise meuble (Longue-Pointe-de-Mingan, Côte-Nord)



Figure 22. Versant continental en Haute-Gaspésie (vue de profil)

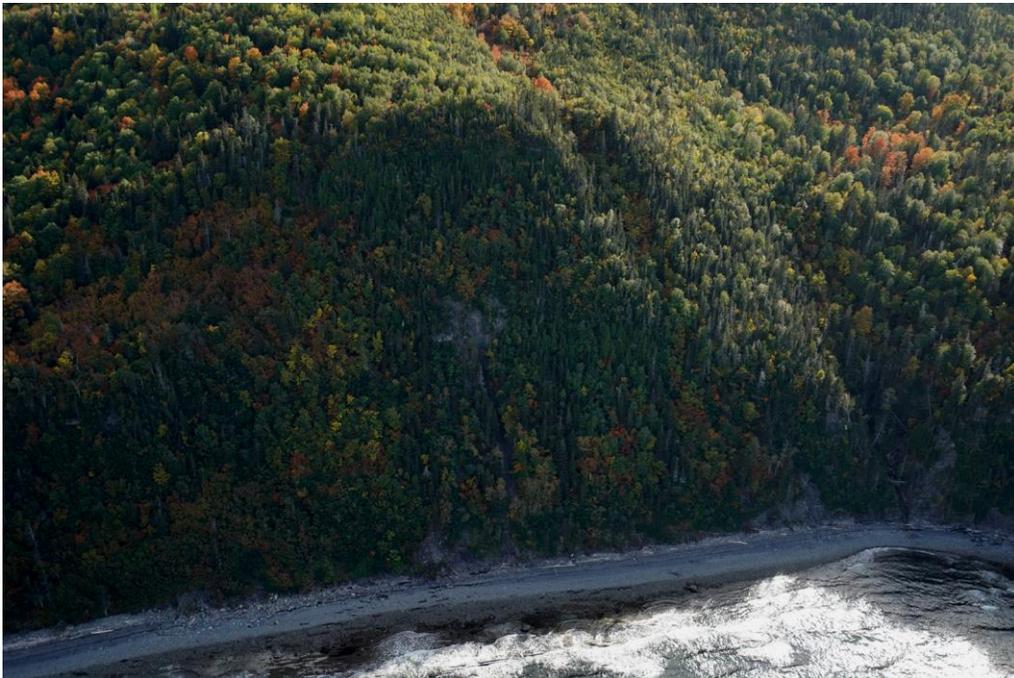


Figure 23. Versant continental en Haute-Gaspésie (vue frontale)

Côte rocheuse sans falaise

Les côtes rocheuses sans falaise présentent un profil arrondi à pente douce, sans face abrupte (figure 24). Le roc composant la côte peut être de nature sédimentaire, principalement sur la rive sud du Saint-Laurent, ou de nature métamorphique ou ignée (ex. Côte-Nord). L'état de la côte peut être stable à moyen terme (roches sédimentaires résistantes) ou à long terme (roches ignées et métamorphiques). Un estran composé de sédiments meubles peut précéder la côte rocheuse sans falaise (figure 25). Le roc peut également être en contact direct avec la mer et constituer un estran rocheux (figure 26).

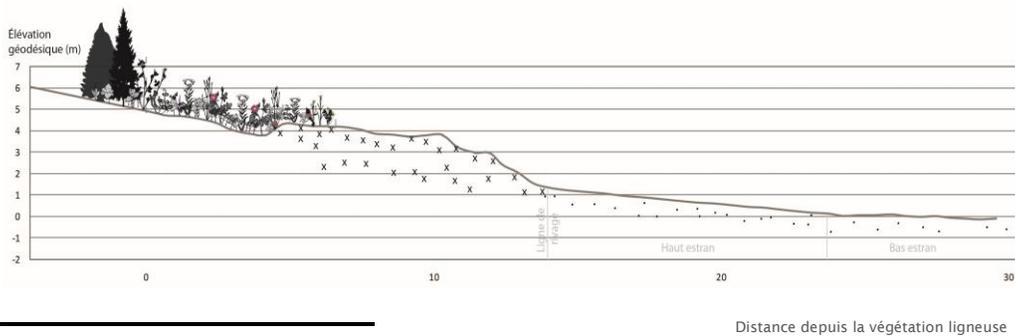


Figure 24. Côte rocheuse sans falaise (Cap-Marteau, Bas-Saint-Laurent)



Figure 25. Côte rocheuse sans falaise dont l'estran est meuble (Saint-Simon, Bas-Saint-Laurent)



Figure 26. Côte rocheuse sans falaise dont l'estran est rocheux (Kegaska, Côte-Nord)

Côte artificialisée

Le type de côte artificialisée englobe tous les cas présentant un ouvrage de protection (figure 27). L'infrastructure peut être un enrochement, un mur/muret, des caissons, un aboiteau, des gabions, un remblai de route, etc. Pour les côtes d'accumulation granulaire (terrasse de plage, flèche littorale, tombolo) et les côtes dunaires, l'infrastructure doit se trouver adossé au front de l'arrière-plage (ou à la dune bordière). Pour les marais maritimes, l'infrastructure se trouve normalement sur le schorre supérieur (aboiteau, remblai de route). Dans les cas de falaises ou de versants, l'infrastructure se trouve au pied de l'escarpement.

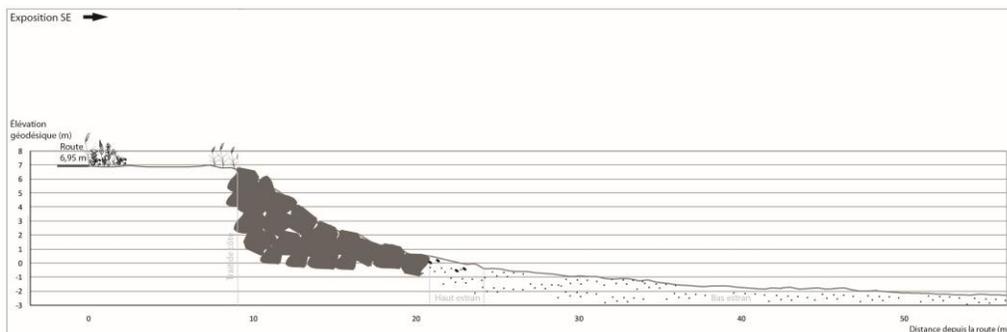


Figure 27. Côte artificialisée par un enrochement (Godbout, Côte-Nord)

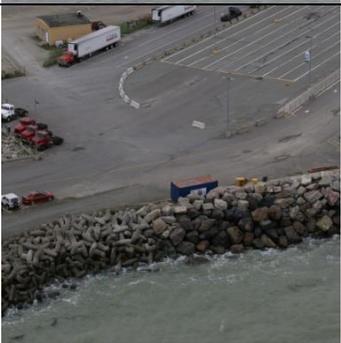
Dans l'Est du Québec, la répartition des types de côtes se déclinent ainsi : côte rocheuse (28,4%), falaise (tous types confondus) (23,2%), terrasse de plage (20,5%), marais maritime (8,2%), flèche littorale (5,9%), tombolo (3,2%), artificielle (0,5%) et dunaire (0,1%) (Drejza et al., 2014). Les côtes échantillonnées dans le présent projet ont été choisies en regard de leur complexité quant à la détermination de la LHE. Ainsi, sur les 164 côtes analysées, les plus fréquemment échantillonnées sont les terrasses de plages (51), les flèches littorales avec marais maritimes (39), les côtes artificialisées (23) et les flèches littorales (16).

Dans le présent projet, il est à noter qu'en présence d'un ouvrage de protection côtière au front de l'arrière-plage, le type de côte est attribué à une côte artificialisée. Nous distinguons donc les côtes artificielles telles que définies dans le tableau suivant (tableau 5), des côtes artificialisées.

Tableau 5. Définition des principaux types de côte du Québec maritime selon le LDGIZC

Type de côte	Exemple photographique	Définition
Marais maritime		Les marais maritimes sont des zones d'accumulation de sédiments fins colonisées par de la végétation herbacée.
Terrasse de plage		Accumulation de sable ou de gravier littoral formée d'un replat généralement végétalisé qui est très rarement submergé par les marées. Le replat est parfois bordé sur sa partie inférieure par un talus d'érosion (microfalaise) de moins de 2 m de hauteur et sa surface est parfois affectée par l'activité éolienne. La terrasse de plage peut être suivie à l'arrière-plage ou l'arrière-côte d'une falaise morte ou d'une surface plane.
Tombolo et cordon littoral		Accumulation basse de sable ou de gravier qui relie la côte à un îlot souvent rocheux ou deux îlots rocheux entre eux. Ce type de côte est souvent bordé d'une lagune. Le cordon littoral peut ne pas être attaché à la côte et est souvent parallèle à celle-ci. Dans la région des Îles-de-la-Madeleine, ces systèmes sont dunifiés.
Flèche littorale		Accumulation de sable ou de gravier qui s'attache d'un côté à la côte et qui s'étire généralement parallèlement à celle-ci ; l'extrémité est libre.
Côte dunaire		Une côte dunaire est une côte qui se forme où une importante quantité de sable est disponible. Elle est principalement formée de sable qui s'est accumulé au fil du temps par des processus éoliens. Elle forme des falaises sableuses lorsqu'elle est en érosion et peut aussi être végétalisée.

Côte morainique		<p>Une côte morainique est composée de dépôts glaciaires laissés par le passage de l'inlandis Laurentidien ou d'une calotte glaciaire qui a érodé le socle rocheux. Les dépôts peuvent aussi être fluvioglaciaires. Les dépôts de blocs et de galets sont maintenant soumis à l'action des vagues qui a souvent lessivé les sédiments plus fins.</p>
Falaise meuble		<p>Escarpement de dépôts non consolidés (argiles, limons, sables, graviers, galets, blocs). Les escarpements de moins de 5 m de hauteur sont classifiés comme basse falaise meuble.</p>
Falaise meuble à base rocheuse		<p>Escarpement de dépôts non consolidés (argiles, limons, sables, graviers, galets, blocs) dont la base est constituée de roche consolidée. Les escarpements de moins de 5 mètres sont classifiés comme des basses falaises meubles à base rocheuse.</p>
Falaise rocheuse		<p>Escarpement de roche consolidée. On retrouve des roches sédimentaires, métamorphiques et ignées. Les escarpements de moins de 5 m de hauteur sont classifiés comme basse falaise rocheuse.</p>
Falaise rocheuse à sommet meuble		<p>Escarpement rocheux surmonté d'un dépôt meuble sur moins de la moitié de la hauteur, mais qui influence le mode de recul de la falaise. Les escarpements de moins de 5 m de hauteur sont parfois classifiés comme basses falaises rocheuses à sommet meuble.</p>

<p>Côte rocheuse sans falaise</p>		<p>Côte rocheuse sans falaise, à pente douce possédant parfois des écueils rocheux. Elle peut être constituée de roches sédimentaires résistantes (Bas-Saint-Laurent et Gaspésie), métamorphiques ou ignées (Côte-Nord) et être stable à moyen terme (roches sédimentaires résistantes) ou à long terme (roches ignées).</p>
<p>Artificielle</p>		<p>Une côte est qualifiée comme artificielle seulement lorsqu'il n'est plus possible de déterminer quel est le type de côte qui était présent avant les modifications anthropiques.</p>
<p>Remblai</p>		<p>Lorsqu'un remblai important a été effectué en direction de la mer et que le type de côte original n'est plus discernable. Ces côtes sont toujours artificialisées pour maintenir le remblai en place.</p>

Source : Bernatchez et Drejza, 2015

3.3. Analyse comparative entre la méthode botanique experte et une approche basée sur les critères éco-géomorphologiques

Afin d'évaluer si une approche basée sur des critères éco-géomorphologiques est mieux adaptée que la méthode botanique en milieu côtier, 132 profils perpendiculaires à la côte ont été tracés sur 87 sites répartis à travers le Québec maritime (figure 28) durant les étés 2015 et 2016. Le tableau 6 présente les sites étudiés ainsi que les types de côtes des profils étudiés. Un total de 34 profils a également été réalisé aux Îles-de-la-Madeleine durant l'été 2017. L'analyse comparative relative à ces profils sera exposée dans la section 3.3.4.

Tableau 6. Localisation des profils et types de côtes associés

Sites	Nombre de profils	Types de côtes
Chaudière-Appalaches	4	
Berthier-sur-Mer	1	Artificialisé
Montmagny	2	Falaise et marais maritime
Cap-Saint-Ignace	1	Marais maritime
Bas-Saint-Laurent	23	
La Pocatière	1	Marais maritime
Saint-André-de-Kamouraska	1	Marais maritime
Rivière-du-Loup	1	Marais maritime
Cacouna	2	Marais maritime et terrasse de plage
Trois-Pistoles	8	Marais maritime, flèche littorale, terrasse de plage, rocheuse sans falaise et artificialisé
Anse-au-Lard (Pointe-au-Père-Sainte-Luce)	2	Terrasse de plage et artificialisé
Sainte-Luce	4	Terrasse de plage et artificialisé
Saint-Ulric	4	Terrasse de plage et côte artificialisée
Gaspésie	36	
Sainte-Anne-des-Monts	2	Terrasse de plage et artificialisé
Tourelle/Ruisseau-Castor	2	Terrasse de plage et falaise
Mont-Saint-Pierre	2	Terrasse de plage et artificialisé
Mont-Louis	1	Falaise et terrasse de plage
Sainte-Madeleine de la Rivière-Madeleine	1	Terrasse de plage
Petite-Vallée	3	Falaise et terrasse de plage
Gaspé (nord de la péninsule)	6	Falaise, terrasse de plage, artificialisé
Penouille	4	Flèche littorale, marais maritime et falaise
Gaspé (Sandy Beach)	1	Flèche littorale et marais maritime
Chandler	3	Flèche littorale, terrasse de plage et artificialisé

MÉTHODE DE DÉTERMINATION DE LA LIGNE DES HAUTES EAUX POUR LE DOMAINE MARITIME DANS UN
CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Paspébiac	3	Flèche littorale et marais maritime
Saint-Siméon	3	Terrasse de plage, flèche littorale et marais maritime
Maria	2	Terrasse de plage, flèche littorale et marais maritime
Saint-Omer	3	Flèche littorale et marais maritime
Côte-Nord	68	
Tadoussac	2	Falaise meuble et terrasse de plage
Les Escoumins	2	Tombolo et artificialisé
Longue-Rive	6	Terrasse de plage, flèche littorale, marais maritime et artificialisé
Portneuf-sur-mer	1	Flèche littorale à marais maritime
Pessamit	2	Marais maritime et terrasse de plage
Pointe-aux-Outardes	3	Falaise, terrasse de plage et artificialisé
Pointe-Lebel (Pointe-Paradis)	2	Terrasse de plage et artificialisé
Godbout	4	Terrasse de plage, terrasse de plage (dune bordière) et artificialisé
Baie-Trinité	3	Terrasse de plage et artificialisé
Pointes-aux-Anglais/Pentecôte	3	Falaise et terrasse de plage
Gallix à Moisie	11	Terrasse de plage, terrasse de plage (dune bordière), flèche littorale et marais maritime
Rivière-au-Tonnerre	2	Terrasse de plage
Magpie	2	Terrasse de plage
Rivière-Saint-Jean à Mingan	22	Terrasse de plage, terrasse de plage (dune bordière), flèche littorale, falaise et artificialisé
Havre-Saint-Pierre	1	Terrasse de plage
Aguanish	1	Terrasse de plage
Natashquan	2	Terrasse de plage et terrasse de plage (dune bordière)



Figure 28. Localisation des profils étudiés dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent

Pour les analyses, les profils étudiés ont été regroupés en fonction de leur localisation et des types de côtes. Pour l'analyse comparative des altitudes des limites, les terrasses de plage présentant une dune bordière au front de l'arrière-plage ont été regroupées dans une catégorie distincte des terrasses de plage, dont la morphologie est plutôt plane. Les dunes bordières forment un bourrelet dont l'altitude est considérablement plus élevée que les critères présents sur les terrasses de plage planes. Quant à la localisation, les divisions réfèrent aux divisions morphologiques et marégraphiques du Saint-Laurent. L'estuaire moyen est compris entre la pointe est de l'Île d'Orléans et Rivière-du-Loup, sur la côte sud, et Tadoussac, sur la côte nord. L'estuaire maritime s'étend de ces limites jusqu'à Les Méchins, sur la côte sud, et Pointe-des-Monts, sur la côte nord. Le golfe du Saint-Laurent, la portion la plus large du Saint-Laurent, a été divisé en deux aux fins d'analyses : la côte sud (Gaspésie) et la côte nord (Côte-Nord). Finalement, la baie des Chaleurs débute à Shigawake (limite est de la MRC de Bonaventure) et s'étend, vers l'ouest, jusqu'au fond de la baie. Le nombre de profils associé à chaque type de côte étudié dans chacune de ces divisions est présenté dans le tableau 7. Les côtes à flèche littorale présentent deux types de côtes par profil relatifs à leurs faces extérieures et intérieures. Le nombre de profils total s'élève à 173.

Tableau 7. Types de côtes étudiés selon la localisation

Types de côtes	Localisation le long du Saint-Laurent					Total général
	Estuaire moyen	Estuaire maritime	Golfe côte nord	Golfe côte sud	Baie des Chaleurs	
Terrasse de plage		14	32	11	2	59
Terrasse de plage (dune bordière)		1	4			5
Flèche littorale (extérieur)		6	5	6	7	24
Flèche littorale (intérieur)		5	5	3	8	21
Marais maritime	5	9	1	3	9	27
Falaise	1	3	4	4		12
Rocheux sans falaise		1				1
Artificialisé	1	12	5	5	1	24
Total général	7	51	56	32	27	173

Les côtes basses meubles ont été préconisées par rapport aux autres types de côtes dans le choix des sites. La diversité des éléments géomorphologiques et des successions végétales des côtes basses justifie de récolter davantage de données pour effectuer la comparaison des méthodes de détermination d'une LHE. De plus, ces types de côtes sont plus vulnérables face aux hauts niveaux d'eau et, conséquemment, face à l'érosion et à la submersion côtière. Il est d'autant plus important de trouver une méthodologie adéquate pour déterminer la LHE pour ces types de côtes.

Pour chacun des profils, une zone d'une largeur de 50 m représentative du milieu était sélectionnée pour y prendre les mesures. Un profil topographique perpendiculaire à la côte était mesuré à l'aide d'un DGPS au centre de la zone sélectionnée, du bas estran vers les terres et ce, jusqu'à la limite de la végétation ligneuse arborescente (figure 29). En l'absence d'une telle limite, le profil était interrompu à l'endroit où il était traversé par une route ou une infrastructure, le profil végétal étant ainsi discontinu. Cette limite a été définie en assumant que la végétation ligneuse arborescente ne tolère pas de submersion fréquente et d'exposition à l'eau salée. Le long du profil central, l'inventaire de la végétation était effectué sur des transects d'un mètre afin d'appliquer la méthode botanique experte telle que définie dans la PPRLPI.

Sur 25 m de part et d'autre du profil central (zone totale de 50 m), les niveaux marégraphiques ainsi que les éléments éco-géomorphologiques observables étaient localisés et leur altitude mesurée de façon parallèle à la côte à l'aide du DGPS. Les limites marégraphiques localisées sont les suivantes : niveau de pleine mer supérieure de grande marée (PMSGM), niveau de pleine mer supérieure de marée moyenne (PMSMM), niveau moyen des mers (NMM) et niveau de récurrence 2 ans (lorsque disponible). Les éléments éco-géomorphologiques mesurés sont : la ligne de végétation éparse, la ligne de végétation dense, la flexure, le pied et le sommet de la microfalaise, le pied et la crête de la dune, le pied et le sommet de la falaise, les lignes de débris de tempête, la limite de la végétation ligneuse, le pied et le sommet d'infrastructure. L'altitude géodésique des éléments recensés a été mesurée aux 0,50 m, donnant approximativement 100 mesures d'altitude par éléments sur la zone de 50 m.

Les altitudes mesurées sur les profils centraux ont été rapportées dans un fichier Excel afin de les illustrer de manière graphique. La moyenne des altitudes mesurées sur 50 m des éléments éco-géomorphologiques a été utilisée comme indicateur et positionnée sur chaque profil central. La végétation inventoriée a été illustrée à l'aide du logiciel Illustrator et positionnée sur le profil.

La méthode botanique telle que décrite dans la Note explicative sur la ligne des hautes eaux : la méthode botanique experte (MDDELCC, 2015b) a été utilisée pour déterminer la localisation ainsi que l'altitude de la LHE sur les profils lorsque possible. La LHE se situe à l'endroit où l'on passe d'une prédominance de plantes aquatiques à une prédominance de plantes terrestres en direction de la rive. S'il n'y a pas de plantes aquatiques la LHE se situe à l'endroit où les plantes terrestres s'arrêtent en direction du cours d'eau. Une fois l'inventaire de la végétation réalisé sur les profils, le statut de chaque espèce (aquatique,

terrestre ou non indicateur) a été validé afin d'effectuer le calcul de prédominance de plantes terrestres vs aquatiques. Tel que stipulé dans la note explicative (MDDELCC, 2015b), les espèces de milieu côtier suivantes ont été exclues du calcul de prédominance des plantes terrestres par rapport aux plantes aquatiques : *Ammophila breviligulata* (ammophile à ligule courte), *Anticlea elegans* (zigadène glauque), *Festuca rubra* (fétuque rouge), *Lathyrus japonicus* (gesse maritime), *Leymus mollis* (élyme des sables), *Ligusticum scoticum* (livèche écossaise) et *Melilotus spp.* (mélilot sp.) La position et l'altitude de la LHE pouvaient ainsi être déterminées.

La PPRLPI stipule aussi que lorsqu'un mur de soutènement érigé de façon légale est présent, la LHE se situe au sommet du mur. Il n'y a pas d'indication particulière pour les autres types d'infrastructures. La méthode botanique a été appliquée systématiquement pour évaluer la localisation d'une limite botanique sur les côtes artificialisées. L'ouvrage de protection pouvait d'ailleurs ne pas avoir été légalement érigé (les vérifications n'ont pas été effectuées).

L'analyse comparative qui suit est basée sur la LHE déterminée à partir de la méthode botanique experte (LHEB) sur chacun des profils et sur les critères éco-géomorphologiques qui y ont été mesurés. La limite éco-géomorphologique ainsi déterminée est nommée LG.

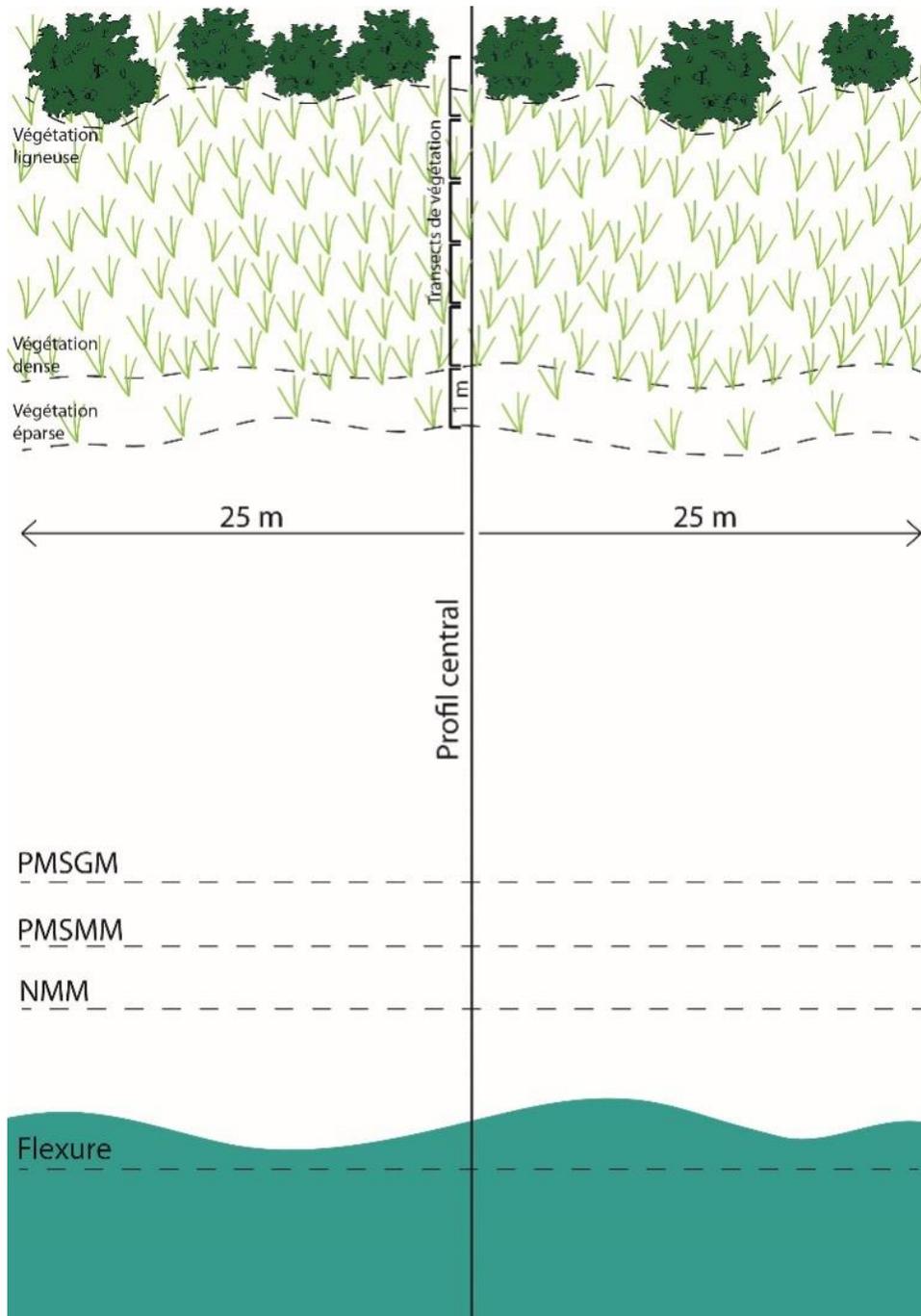


Figure 29. Méthodologie d'acquisition des données utilisée pour les profils ; le trait pointillé représente le trajet suivi avec le DGPS.

3.3.1. Analyse comparative de l'altitude des limites LG et LHEB

Des tests non-paramétriques de Kruskal-Wallis³ ont été effectués sur les distributions d'altitudes des LG et des LHEB pour l'ensemble des profils étudiés. Trois des variables indépendantes utilisées pour regrouper les données ont montré une différenciation des médianes intergroupe significative ($p < 0,05$) pour les deux limites : la localisation (LG $p = 1,43e-10$; LHEB $p = 6,38e-9$), le type de côte (LG $p = 7,62e-13$; LHEB $p = 9,14e-6$) et l'état de la côte (LG $p = 4,11e-9$; LHEB $p = 3,35e-4$). Les médianes ont donc été utilisées pour l'analyse comparative entre la LG et la LHEB. Les informations quant aux distributions des deux limites pour chacune des trois variables sont présentées à la suite de chaque graphique de comparaison des médianes afin d'évaluer la dispersion des données (tableaux 8, 9 et 11).

Le graphique suivant montre la médiane des altitudes de l'ensemble des LG et des LHEB selon la localisation (figure 30). On remarque d'abord que l'altitude des LG tend à être supérieure à celle des LHEB et ce, dans toutes les divisions le long du Saint-Laurent. La différence entre médianes la plus marquée est dans l'estuaire moyen, où la médiane des LG est de 4,93 m et celle des LHEB est de 3,09 m (différence de 1,84 m). Sinon, la différence entre les médianes des deux limites se situe entre 0,10 m et 0,52 m.

Les médianes des altitudes de LHEB sont rapprochées dans l'estuaire et le golfe (entre 2,82 m et 3,09 m). L'altitude diminue considérablement pour les LHEB déterminées dans la baie des Chaleurs (médiane de 1,74 m). Les médianes des altitudes de LG sont rapprochées pour l'estuaire maritime et le golfe (entre 3,17 m et 3,64 m) ; la différence est plus marquée pour l'estuaire moyen (4,39 m), où la médiane est plus élevée d'au moins 1 m par rapport aux autres secteurs, et la baie des Chaleurs (1,84 m), où la médiane est la plus basse. L'altitude des LG présente aussi une décroissance de l'amont vers l'aval du Saint-Laurent, soit de l'estuaire moyen au golfe puis à la baie des Chaleurs. Cette décroissance est observée pour l'altitude des LHEB à partir de l'estuaire maritime. Cette décroissance de l'amont vers l'aval concorde avec les données de marnage, dont l'altitude diminue également de l'amont vers l'aval.

³ Les distributions d'altitude ne suivent pas la loi normale, tant pour la LG que pour la LHEB et ce, pour les données dans leur ensemble et pour au moins un des regroupements déterminés.

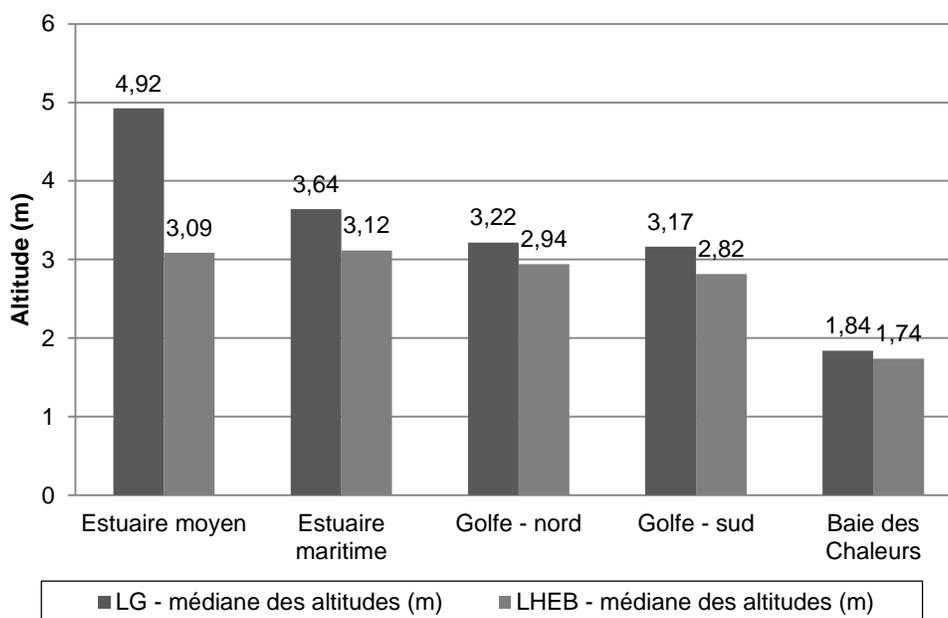


Figure 30. Médianes des altitudes de LG et de LHEB selon la localisation

Tableau 8. Distribution des altitudes pour la LG et la LHEB selon la localisation

Localisation	Min.	25e	Médiane	75e	Max.	n	NaN
Estuaire moyen							
LG	4,05	4,44	4,92	6,87	10,02	6	1
LHEB	2,27	2,30	3,09	3,30	6,88	5	2
Estuaire maritime							
LG	2,30	3,06	3,64	4,32	12,54	49	2
LHEB	1,98	2,86	3,12	4,03	6,90	47	4
Golfe côte nord							
LG	1,49	2,71	3,22	3,94	6,36	55	1
LHEB	1,65	2,42	2,94	3,52	5,78	49	7
Golfe côte sud							
LG	1	1,88	3,17	3,70	5,43	32	0
LHEB	1,02	2,13	2,82	3,41	5,17	24	8
Baie des Chaleurs							
LG	0,91	1,28	1,84	2,13	3,17	19	8
LHEB	0,91	1,21	1,74	2,05	2,65	19	8

L'altitude des LG tend à être plus élevée que celle des LHEB pour l'ensemble des types de côtes étudiés (figure 31)⁴. La différence entre l'altitude des deux limites est davantage marquée au niveau des terrasses de plage avec dune bordière (différence de 2,23 m) et des falaises (différence de 2,53 m). Cela s'explique par les critères utilisés pour fixer une LG : les formes géomorphologiques attribuables à ces types de côtes (dune bordière et falaise) présentent une altitude élevée par rapport au reste du profil de plage et aussi par rapport aux autres types de côtes. Autrement, les différences entre les médianes des deux limites se situent entre 0,11 m et 0,40 m pour les côtes naturelles (non artificialisées).

L'altitude des LG et des LHEB tend à être inférieure lorsqu'il s'agit des côtes à flèche littorale, particulièrement du côté intérieur de la flèche, et à marais maritime. L'altitude des LHEB sur les côtes à terrasse de plage avec dune bordière est également relativement basse. Il faut toutefois noter que les cinq terrasses de plage avec dune bordière sont situées sur la Côte-Nord, dont quatre dans le golfe du Saint-Laurent, où l'altitude des limites tend à être plus basse.

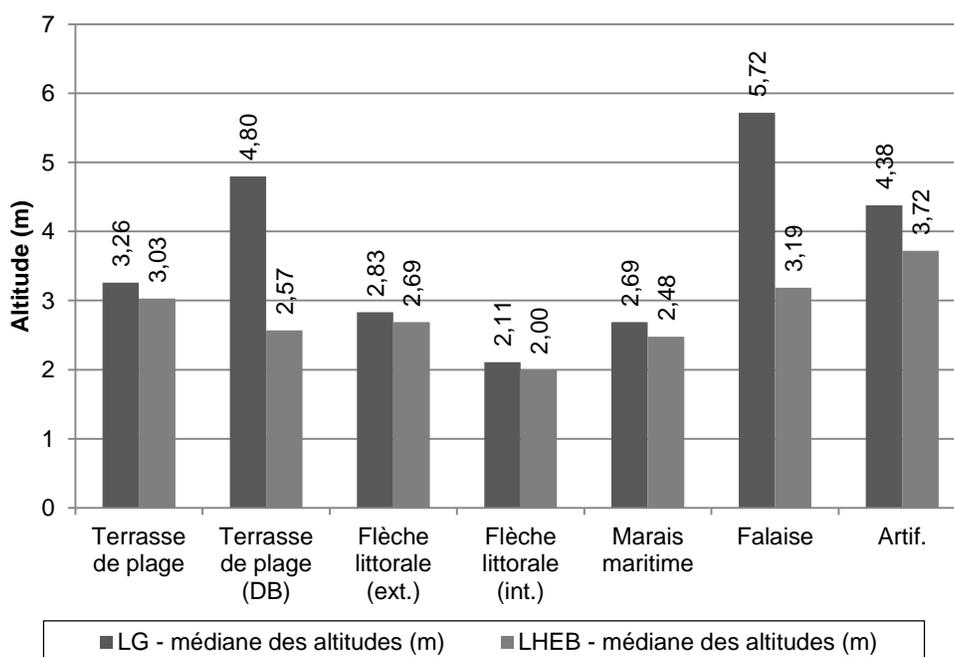


Figure 31. Médianes des altitudes de LG et de LHEB selon le type de côte. Terrasse de plage (DB) : terrasse de plage avec dune bordière ; ext. : face extérieure ; int. : face intérieure ; Artif. : côte artificialisée.

⁴ Un seul profil de côte rocheuse sans falaise a été réalisé. La médiane n'est donc pas un indicateur pertinent à présenter dans cette analyse.

Tableau 9. Distribution des altitudes pour la LG et la LHEB selon le type de côte

Localisation	Min.	25e	Médiane	75e	Max.	n	NaN
Terrasse de plage							
LG	1,21	2,78	3,26	3,56	4,87	59	0
LHEB	1,65	2,44	3,03	3,54	4,77	56	3
Terrasse de plage (dune bordière)							
LG	2,98	3,48	4,80	5,09	5,43	5	0
LHEB	2,38	2,56	2,57	5,17	5,53	5	0
Flèche littorale (extérieur)							
LG	1,37	2,04	2,83	3,19	4,42	19	5
LHEB	1,90	2,18	2,69	3,08	5,78	18	6
Flèche littorale (intérieur)							
LG	0,91	1,56	2,11	2,42	3,02	17	4
LHEB	0,91	1,52	2,00	2,54	3,16	17	4
Marais maritime							
LG	0,99	1,46	2,69	3,70	7,40	26	1
LHEB	0,98	1,88	2,48	3,10	6,88	20	7
Falaise							
LG	2,59	4,79	5,72	6,31	12,54	10	2
LHEB	2,20	2,86	3,19	3,54	4,80	9	3
Rocheux sans falaise							
LG	4,20	-	-	-	-	1	0
LHEB	4,20	-	-	-	-	1	0
Artificialisé							
LG	2,35	3,79	4,38	4,89	6,69	24	0
LHEB	2,09	2,85	3,72	4,79	6,90	18	6

L'état de la côte permet également de voir une différenciation des médianes des altitudes des limites. Le tableau 10 montre le nombre de profils associé à l'état de chaque type de côte étudié. Si le profil présentait un ouvrage de protection, la côte était classée comme artificialisée (à l'exception des marais maritimes) afin de bien les distinguer des côtes naturelles. Davantage de côtes d'accumulation granulaire et de falaises avait des profils actifs. Les côtés intérieurs des flèches littorales sont, quant à eux, plus souvent végétalisés. Pour les marais maritimes, la ligne de rivage se situe entre le schorre inférieur et le schorre supérieur. L'état des côtes à marais maritime n'est donc pas directement lié au critère géomorphologique utilisé dans ces cas, soit la limite

supérieure du milieu humide qui se trouve souvent bien au-delà de la limite entre les deux schorres.

La figure 32 montre les médianes d'altitude pour chaque état de côte. Encore une fois, l'altitude de la LG tend à être plus élevée que celle de la LHEB dans les trois cas. L'altitude des LG et des LHEB est plus élevée lorsque la côte est active. Néanmoins, la différence de médianes entre les côtes actives et les côtes végétalisées est moindre au niveau des LHEB. Les côtes artificialisées ont les altitudes les plus élevées pour les deux limites.

Tableau 10. État de la côte pour chaque type de côte étudié

Nombre de profils	État de la côte (ligne de rivage)			Total général
	Actif	Végétalisé	Artificialisé	
Types de côtes				
Terrasse de plage	32	27	0	59
Terrasse de plage (dune bordière)	2	3	0	5
Flèche littorale (extérieur)	14	10	0	24
Flèche littorale (intérieur)	7	14	0	21
Marais maritime	5	22	0	27
Falaise	7	5	0	12
Rocheux sans falaise	0	1	0	1
Artificialisé	0	0	24	24
Total général	67	82	24	173

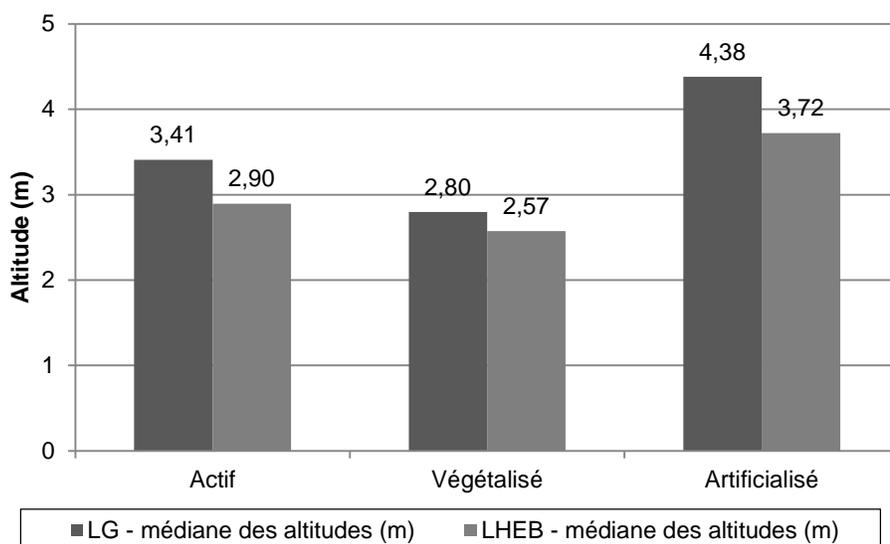


Figure 32. Médiane des altitudes des limites en fonction de l'état de la côte

Tableau 11. Distribution des altitudes en mètre pour la LG et la LHEB selon l'état de la côte

Localisation	Min.	25e	Médiane	75e	Max.	n	NaN
Actif							
LG	1,83	2,88	3,41	3,88	12,54	55	12
LHEB	1,74	2,38	2,90	3,54	6,88	54	13
Végétalisé							
LG	0,91	1,91	2,80	3,33	6,36	82	0
LHEB	0,91	2,09	2,57	3,18	5,78	72	10
Artificialisé							
LG	2,35	3,79	4,38	4,89	6,69	24	0
LHEB	2,09	2,85	3,72	4,79	6,90	18	6

Globalement, l'altitude de la LHEB pour un même type de côte est plus variable que l'altitude de la LG et ce, pour l'ensemble des côtes d'accumulation granulaire (figure 33). Pour les côtes à terrasse de plage et les faces intérieures des flèches littorales, l'écart des altitudes par rapport à la moyenne reste assez similaire. L'intérieur des flèches littorales étant moins exposé aux vagues, ce sont davantage les niveaux d'eau qui feront varier la LG. Les côtes à falaise font exception, c'est-à-dire que l'altitude de la LG est plus variable pour ces côtes.

Cela s'explique par la variabilité des hauteurs de falaise à l'échelle du Québec maritime. En utilisant le sommet de l'escarpement comme critère géomorphologique pour définir la LG, l'altitude de cette dernière sera nécessairement très variable le long du Saint-Laurent.

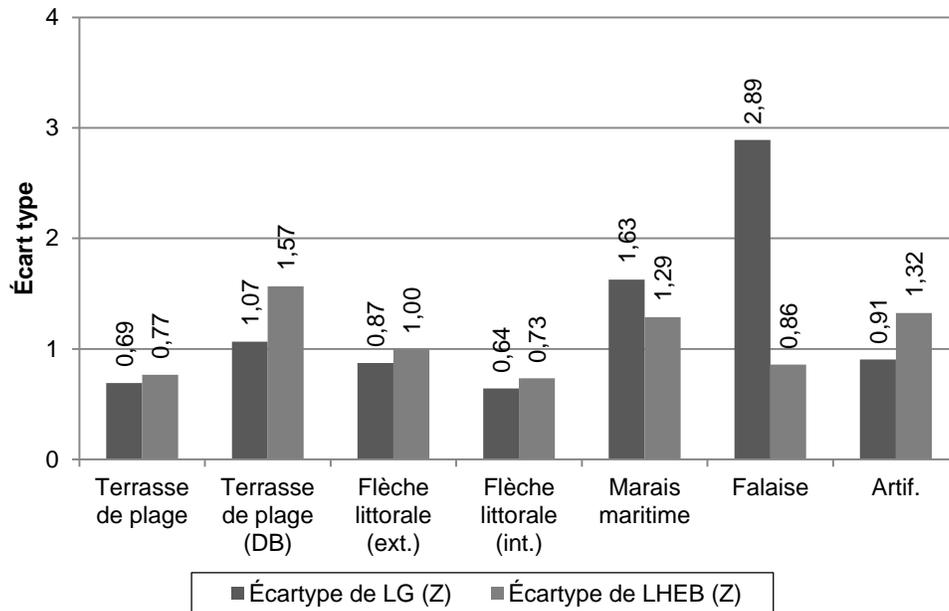


Figure 33. Écart type des altitudes de LG et de LHEB selon le type de côte

Il est pertinent de regarder cas par cas l'occurrence des trois scénarios suivants quant à la position verticale relative entre les deux limites : les profils où l'altitude de LG est plus élevée que celle de la LHEB ; les profils où l'altitude de la LHEB est plus élevée que la LG ; et les profils où les deux limites sont à la même altitude (tableau 12). Dans 40% des cas étudiés (70 profils), l'altitude de la LG est supérieure à l'altitude de la LHEB. Le scénario inverse a été observé dans 22% des cas étudiés (39 profils) ; l'altitude des deux limites était la même dans près de 19% des cas observés (32 profils). Il est à noter que pour 32 profils, au moins une des deux limites n'a pas pu être déterminée (tableau 13). Douze de ces cas concernent la LG. De ces douze cas, deux sont associés à des côtes à falaise : le sommet était inaccessible avec nos instruments. Pour les huit profils situés dans la baie des Chaleurs relatifs aux côtes à flèche littorale, les critères pour déterminer une LG étaient absents (pas de végétation dense). Le marais maritime situé dans l'estuaire moyen présente un marécage arborescent et un marais dulcicole situés au-delà du schorre supérieur. Le profil ne se rend pas au-delà du marais dulcicole où aurait dû se situer la LG. Sur les 32 profils, la LHEB n'a pas pu être déterminée dans 29 cas, c'est-à-dire qu'aucune plante

terrestre non exclue du calcul de prédominance des plantes terrestres sur les plantes aquatiques n'a été répertoriée entre la ligne de rivage et la limite de la végétation ligneuse ou une route. La LHEB n'a pas pu être déterminée principalement dans la baie des Chaleurs (8 cas sur 32) et le golfe du Saint-Laurent (15 cas sur 32). Cette situation s'est principalement présentée sur les flèches littorales, dans les marais maritimes et sur les côtes artificialisées.

Tableau 12. Position verticale relative entre les deux limites

Position verticale relative entre la LG et la LHEB	Nombre de profils étudiés	Pourcentage par rapport au total des profils étudiés (%)
LG (Z) plus élevée que la LHEB (Z)	70	40,5
LHEB (Z) plus élevée que la LG (Z)	39	22,5
LG (Z) et LHEB (Z) à la même altitude	32	18,5
Limite non déterminée	32	18,5
Total	173	100

Tableau 13. Profils où une limite n'a pas pu être déterminée

Localisation et type de côte	Nombre de profil	LG (Z) non déterminée	LHEB (Z) non déterminée
Estuaire moyen	2	1	2
Marais maritime	1	1	1
Artificialisé	1	-	1
Estuaire maritime	5	2	4
Marais maritime	1	-	1
Falaise	2	2	1
Artificialisé	2	-	2
Golfe côte nord	7	1	7
Terrasse de plage	2	-	2
Flèche littorale (extérieur)	1	1	1
Flèche littorale (intérieur)	1	-	1
Falaise	2	-	2
Artificialisé	1	-	1
Golfe côte sud	8	0	8
Terrasse de plage	1	-	1
Flèche littorale (extérieur)	2	-	2
Marais maritime	3	-	3
Artificialisé	2	-	2
Baie des Chaleurs	10	8	8
Flèche littorale (extérieur)	4	4	3
Flèche littorale (intérieur)	4	4	3
Marais maritime	2	-	2
Total général	32	12	29

La section qui suit présente l'occurrence des trois scénarios en fonction des trois facteurs déterminés : la localisation, le type et l'état de la côte. Le tableau de l'annexe B fait la synthèse des scénarios relatifs à l'altitude relative entre les deux limites déterminées sur les profils étudiés en fonction de ces trois facteurs. Le test exact de Fisher⁵ ($p > 0,05$) appliqué sur l'ensemble des combinaisons montre une indépendance de l'occurrence de l'un ou l'autre des scénarios par rapport à la localisation ($p = 0,76$) et à l'état ($p = 0,97$). Cela indique que statistiquement, l'occurrence de l'un ou l'autre des trois scénarios n'est pas privilégiée par rapport à la localisation (division le long du Saint-Laurent) ou à

⁵ L'utilisation du test χ^2 de Pearson n'a pas pu être utilisé puisque l'occurrence des trois scénarios pour chacun des facteurs n'était pas assez élevée pour chaque combinaison et la valeur de plusieurs effectifs théoriques était inférieure à 5. Les conditions de base n'étant pas remplies, le test exact de Fisher a été utilisé.

l'état de la côte. Le test exact de Fisher montre que l'occurrence des scénarios est différente pour au moins un type de côte meuble ($p = 0,003$)⁶.

Bien que l'occurrence des trois scénarios ne soit pas fonction de la localisation dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (comparaison intergroupe), il reste intéressant de faire la comparaison intragroupe pour chaque division (figure 34). Pour les cinq divisions, l'altitude de la LG est plus souvent supérieure à l'altitude de la LHEB. Dans l'estuaire maritime et la baie des Chaleurs, la différence est moins marquée quant au nombre de profils associé à chaque scénario.

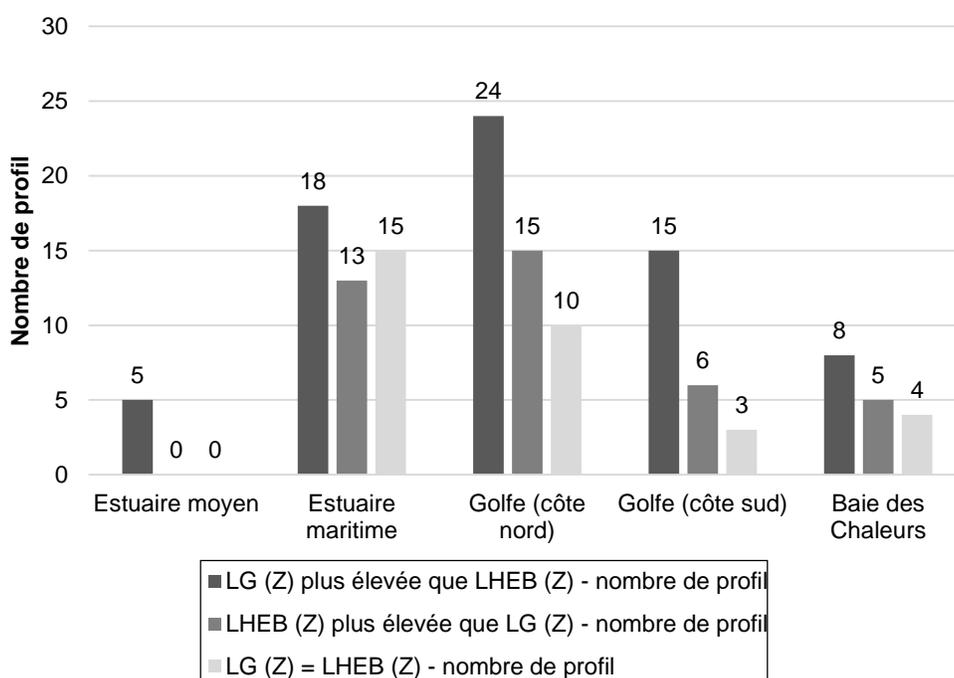


Figure 34. Position verticale relative entre les deux limites selon la localisation

Le test exact de Fisher ne permet pas de cibler spécifiquement quel type de côte ressort quant à l'occurrence d'un scénario plutôt qu'un autre. Certaines caractéristiques morphologiques des côtes peuvent toutefois expliquer la position verticale relative entre les deux limites (tableau 14). L'altitude de la LG est plus élevée pour les côtes à terrasse de plage (sans et avec dune bordière),

⁶ L'occurrence des trois scénarios par rapport aux types de côtes n'étant pas assez élevée pour effectuer le test exact de Fisher, le test a été effectué sur les données relatives aux côtes basses meubles seulement : terrasses de plage, flèche littorale (intérieur et extérieur) et marais maritime. Les côtes suivantes ont été exclues : à falaise, rocheuse sans falaise et artificialisée. Pour les variables localisation et état de la côte, la valeur de p était supérieure à 0,05 avec et sans les valeurs supprimées relatives à ces types de côtes.

les côtes à marais maritime et les côtes à falaise. Pour les profils où il y a une dune bordière ou une falaise, l'altitude de la LG est plus élevée dans presque la totalité des cas. C'est dû à la géomorphologie de ces côtes, qui présente une forme surélevée, laquelle est utilisée comme critère pour déterminer la LG. Il n'y a pas de différenciation marquée au niveau du nombre de cas observé pour un ou l'autre des scénarios au niveau des flèches littorales (extérieur et intérieur) et des côtes artificialisées.

Bien que l'état ne soit pas un facteur déterminant dans l'occurrence des scénarios, il semble y avoir une différenciation en regroupant le type de côte et son état dans le cas des flèches littorales (côté extérieur). La LG a tendance à être plus élevée lorsque la côte est active ; inversement, la LHEB a tendance à être plus élevée quand la côte est végétalisée. Les flèches littorales actives présentent un profil particulier au niveau de l'arrière-plage : la microfalaise, qui fait un front surélevé face à la mer, est suivie d'un profil à pente descendante (donc avec des altitudes moindres ; figure 35A). Même si la LHEB se trouve soit à la même position, soit derrière la LG (la végétation débute généralement au sommet de la microfalaise), celle-ci a une altitude moins élevée que la LG. Quant aux flèches littorales végétalisées, le profil de l'arrière-plage est davantage arrondi à partir d'un front de végétation dense s'avancant vers la mer, sans front abrupt. Si la LHEB se trouve derrière la LG, elle aura tendance à avoir une altitude plus élevée (figure 35B). Notons d'ailleurs que pour les faces intérieures des flèches littorales, il est plus fréquent que la LHEB soit plus élevée que la LG.

Les deux limites sont à la même altitude surtout dans certains cas de terrasses de plage actives et de flèches littorales (côté intérieur) végétalisées. Les côtes artificialisées présentent plus de cas où les deux limites sont à la même altitude comparativement aux deux autres scénarios. Ce constat implique que lorsque la côte est artificialisée, l'ouvrage de protection est assez élevé pour que de la végétation terrestre (et non littorale exclue du calcul) s'implante directement au sommet. Le sommet de l'infrastructure est le critère géomorphologique sélectionné pour ces types de côtes.

**Tableau 14. Position verticale relative entre les deux limites
selon le type et l'état de la côte**

Type et état de la côte	LG (Z) plus élevée que LHEB (Z) - nombre de profil	LHEB (Z) plus élevée que LG (Z) - nombre de profil	LG (Z) = LHEB (Z) - nombre de profil
Terrasse de plage	27	20	9
Actif	13	10	8
Végétalisé	14	10	1
Terrasse de plage (dune bordière)	4	1	0
Actif	2	0	0
Végétalisé	2	1	0
Flèche littorale (extérieur)	9	7	1
Actif	6	2	1
Végétalisé	3	5	0
Flèche littorale (intérieur)	3	3	10
Actif	0	2	1
Végétalisé	3	1	9
Marais maritime	13	4	3
Actif	3	0	0
Végétalisé	10	4	3
Falaise	8	0	0
Actif	3	0	0
Végétalisé	5	0	0
Rocheux sans falaise	0	0	1
Artificialisé	6	4	8
Total général	70	39	32

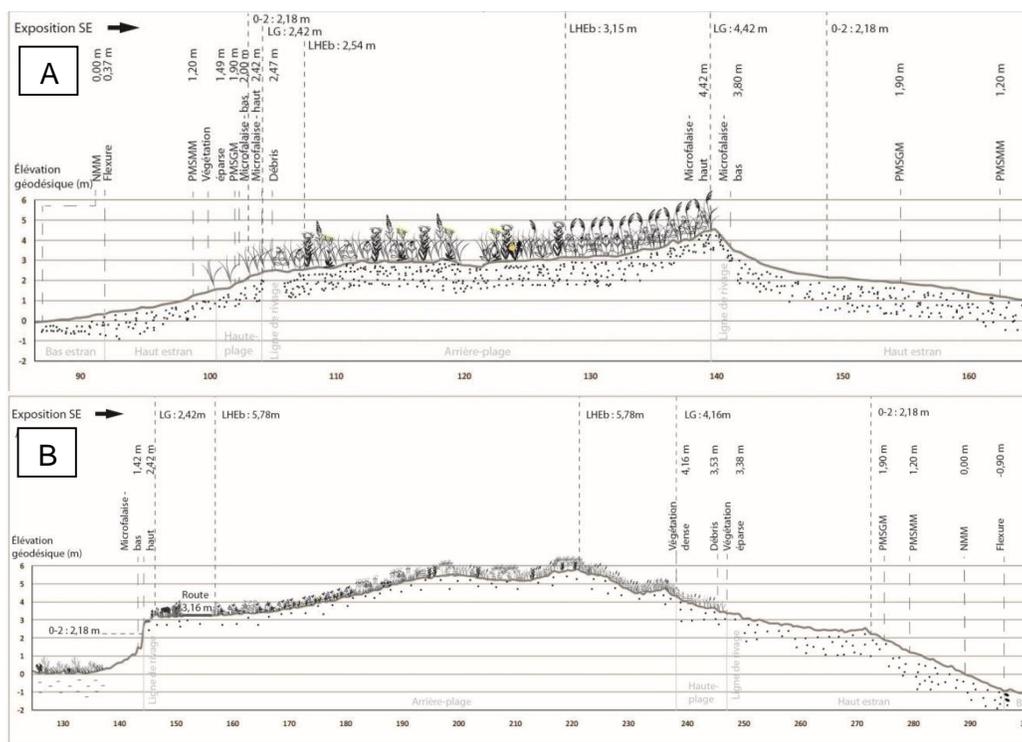


Figure 35. Exemple de profils de flèches littorales : A : face extérieure active ; B : face extérieure végétalisée.

3.3.2. Analyse comparative des distances entre les limites

Des tests non-paramétriques de Kruskal-Wallis⁷ ont été effectués sur les distributions de distance entre les LG et les LHEB pour l'ensemble des profils étudiés. Deux des variables indépendantes utilisées pour regrouper les données (valeurs absolues) ont montré une différenciation des médianes intergroupe significative ($p < 0,05$) : la localisation ($p = 0,04$) et le type de côte ($p = 0,002$). Il n'y a pas de différenciation des médianes au niveau de l'état de la côte ($p = 0,136$). Les tableaux 15 à 17 montrent les informations relatives aux distributions en fonction de ces trois variables.

Les figures 36 à 38 montrent les médianes des distances en fonction de la localisation, du type de côte et de l'état de la côte, respectivement. Les distances entre la LG et la LHEB sont plutôt similaires dans l'estuaire maritime, la côte sud du golfe et la baie des Chaleurs (respectivement 2,06 m, 2,46 m et 2,00 m). Les distances entre les limites sont marquées dans l'estuaire moyen (5,09 m) et sur la côte nord du golfe (6,48 m).

⁷ Les distributions des distances ne suivent pas la loi normale et ce, pour les données dans leur ensemble et pour au moins un des regroupements utilisés.

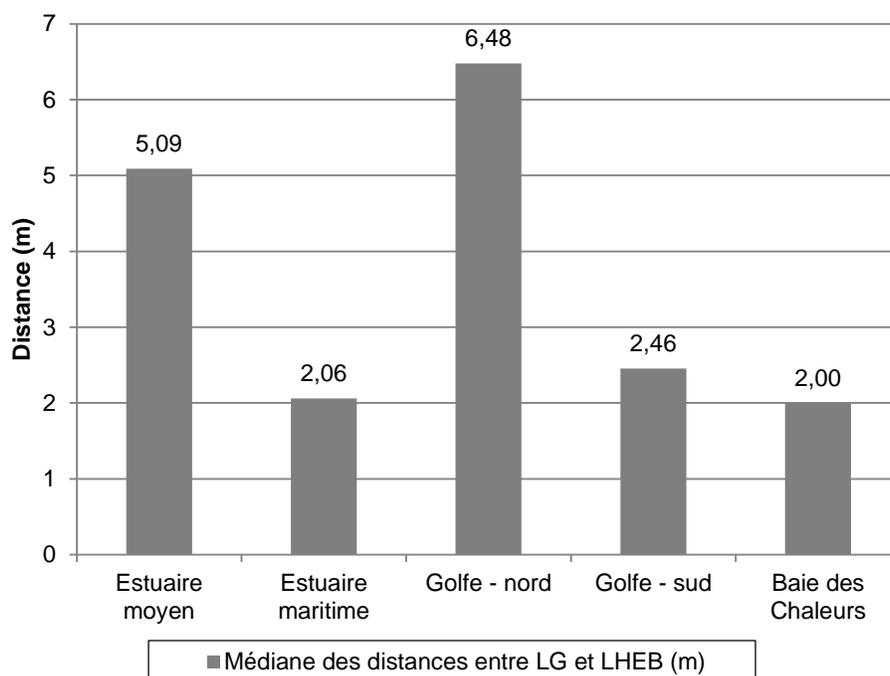


Figure 36. Médiane des distances entre les deux limites selon la localisation

Tableau 15. Distribution des distances entre la LG et la LHEB selon la localisation

Localisation	Min.	25e	Médiane	75e	Max.	n	NaN
Estuaire moyen	3,00	3,69	5,10	13,13	17,92	5	2
Estuaire maritime	0,00	0,00	2,06	8,06	83,55	46	5
Golfe - côte nord	0,00	2,71	6,48	14,68	63,49	49	7
Golfe - côte sud	0,00	0,84	2,46	3,51	13,92	24	8
Baie des Chaleurs	0,00	0,79	2,00	3,40	34,84	17	10

Les médianes des distances sont similaires pour les terrasses de plage, les flèches littorales (face extérieure) et les marais maritimes (entre 4,26 m et 4,39 m). Il importe de préciser que pour les marais maritimes, les informations relatives à la distribution des distances montrent que la moitié supérieure de la distribution présente des valeurs particulièrement élevées (tableau 16). Alors

que la médiane est de 4,39 m, le 75^e percentile et le maximum s'élèvent respectivement à 18,36 m et 83,55 m. Les distances entre les limites dans les marais maritimes sont donc très variables et peuvent être très élevées à l'échelle du Québec maritime. Les médianes des distances relatives aux flèches littorales (face intérieure) et aux côtes artificialisées montrent que les limites tendent à être rapprochées pour ces types de côtes. Plus élevée, la médiane des distances entre les limites au niveau des terrasses de plage avec dune bordière s'élève à 13,03 m. Cette médiane est basée sur cinq profils localisés sur la Côte-Nord.

Les médianes des distances relatives aux côtes actives (3,60 m) et aux côtes végétalisées (3,23 m) sont similaires, bien que les côtes actives semblent présenter de plus grandes distances entre les limites. La différenciation est plus marquée pour les côtes artificialisées (1,10 m), dont les distances semblent davantage rapprochées.

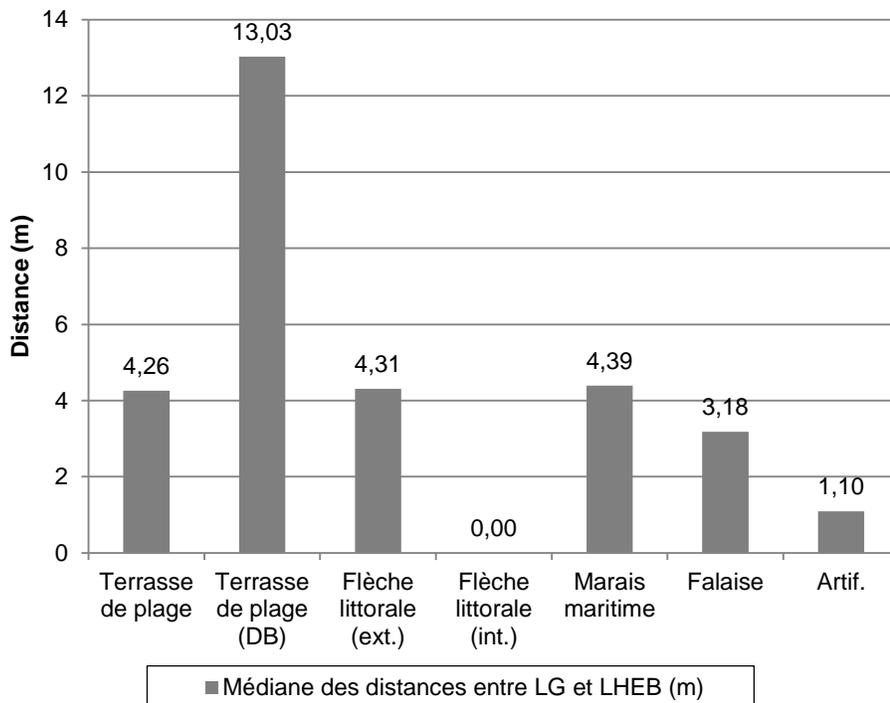


Figure 37. Médiane des distances entre les limites selon le type de côte

**Tableau 16. Distribution des distances entre la LG et la LHEB
selon le type de côte**

Types de côtes	Min.	25e	Médiane	75e	Max.	n	NaN
Terrasse de plage	0,00	1,51	4,27	9,59	46,88	56	3
Terrasse de plage (dune bordière)	5,86	8,23	13,04	13,29	19,57	5	0
Flèche littorale (extérieur)	0,00	2,54	4,31	11,33	63,49	17	7
Flèche littorale (intérieur)	0,00	0,00	0,00	1,91	53,36	16	5
Marais maritime	0,00	1,85	4,40	18,36	83,55	20	7
Falaise	0,66	1,61	3,19	9,79	18,70	8	4
Rocheux sans falaise	0,00	-	-	-	-	1	0
Artificialisé	0,00	0,00	1,09	7,68	12,43	18	6

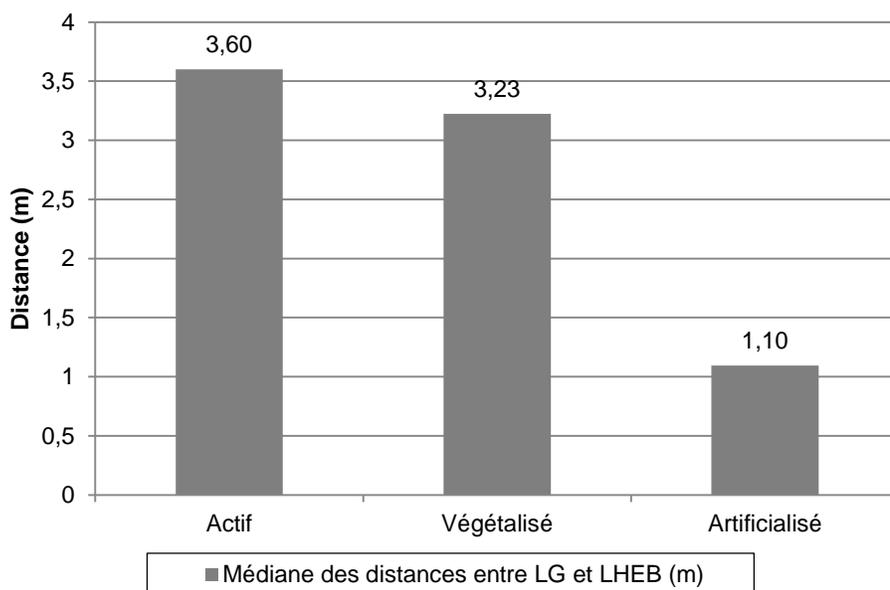


Figure 38. Médiane des distances entre les limites selon l'état de la côte

**Tableau 17. Distribution des distances entre la LG et la LHEB
selon l'état de la côte**

État de la côte	Min.	25e	Médiane	75e	Max.	n	NaN
Active	0,00	1,40	3,60	13,21	63,49	51	16
Végétalisée	0,00	0,93	3,22	8,96	83,55	72	10
Artificialisé	0,00	0,00	1,09	7,68	12,43	18	6

La position relative entre les deux limites est décrite en considérant que le profil débute du côté mer. Si une limite se trouve derrière l'autre, c'est qu'elle se trouve aussi plus éloignée de la mer. Pour l'ensemble des profils étudiés, le nombre de cas où la LG se situe derrière la LHEB (58 cas sur 173) versus le nombre de cas où la LHEB se situe derrière la LG (50 cas sur 173) sont comparables. Il convient de comparer le tableau 12, qui aborde la position verticale (altitude) entre les deux limites, et le tableau 18, relatif à la position horizontale entre les deux limites. Le nombre de profils étudiés se rapportant aux deux premiers scénarios de chacun des tableaux est différent. Cela implique qu'il n'y a pas de lien direct entre la position verticale et la position horizontale des LG et des LHEB. Bien qu'une limite soit plus élevée que l'autre, cela n'implique pas nécessairement qu'elle se situe devant ou derrière l'autre limite. Cela revient à dire que sur un profil, la limite la plus élevée n'est pas nécessairement la plus éloignée de la mer. En second lieu, le tableau 18 montre que sur 33 profils, la LG et la LHEB sont à la même position. Dans le tableau 9, 32 des profils réalisés présentaient les deux limites à la même altitude. Cela s'explique par le fait que pour un profil, les deux limites sont superposées sur la face d'une microfalaise ; elles sont une par-dessus l'autre, donc à la même position mais pas à la même altitude. Encore une fois, une ou l'autre des limites n'a pas pu être déterminée dans 18,5% des cas.

Tableau 18. Position horizontale relative entre les deux limites

Position horizontale relative entre la LG et la LHEB	Nombre de profils étudiés	Pourcentage par rapport au total des profils étudiés (%)
LG derrière LHEB	58	33,5
LHEB derrière LG	50	28,9
LG et LHEB à la même position	33	19,1
Limite non déterminée	32	18,5
Total	173	100

Il est pertinent d'analyser l'occurrence des trois scénarios en fonction des trois facteurs déterminés : la localisation, le type de côte et l'état de la côte. Le tableau de l'annexe C fait la synthèse des scénarios relatifs à la position relative entre les deux limites déterminées sur les profils étudiés en fonction de ces trois facteurs. Afin de répondre aux conditions préalables au test de χ^2 de Pearson ($p > 0,05$), qui nécessite un nombre d'occurrence assez élevé pour chacun des groupes, le test a été appliqué aux profils où les deux limites ne sont pas à la même position planimétrique. Les résultats montrent que l'occurrence de l'un ou l'autre des deux scénarios est liée à la localisation ($\chi^2 = 10,47$; dl = 4 ; $p = 0,03$) et au type de côte ($\chi^2 = 19,20$; dl = 5 ; $p = 1,76e-3$)⁸. L'occurrence de l'un ou l'autre des deux scénarios n'est pas privilégiée selon l'état de la côte ($\chi^2 = 3,99$; dl = 2 ; $p = 0,14$). Les tableaux 19 et 20 montrent les tables de fréquence ainsi que les écarts à l'indépendance du test de χ^2 de Pearson pour les variables localisation et types de côte.

Tableau 19. Table de fréquence et des résidus relatifs au test de χ^2 de Pearson pour la variable localisation

Localisation	Fréquence - LG derrière LHEB	Fréquence - LHEB derrière LG	Écart à l'indépendance - LG derrière LHEB	Écart à l'indépendance - LHEB derrière LG
Estuaire moyen	0	5	4	5,3361
Estuaire maritime	15	16	0,0009	0,0009
Golfe - côte nord	24	15	2,8561	3,8416
Golfe - côte sud	6	14	0,9801	1,3225
Baie des Chaleurs	5	8	0,0225	0,0289

Le test de χ^2 de Pearson indique une différenciation intergroupe de l'occurrence des deux scénarios, c'est-à-dire que le nombre relatif à un ou à l'autre variera significativement selon la localisation le long de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent. L'analyse des écarts à l'indépendance montre que la différenciation se situe principalement au niveau de la côte nord du golfe et, dans une moindre mesure, de la côte sud⁹. La figure 39 permet de visualiser l'occurrence des différents scénarios selon la localisation. Tout d'abord, le

⁸ L'occurrence de l'un ou l'autre des scénarios par rapport à certains types de côtes (flèche littorale intérieure et falaise) n'étant pas assez élevée pour remplir les conditions préalables au test de χ^2 de Pearson, le résultat du test exact de Fisher a également été regardé. La valeur de $p = 7,36e-4$ indique qu'il y a bien une différenciation de l'occurrence des scénarios selon le type de côte.

⁹ L'estuaire moyen n'ayant pas suffisamment de cas étudiés relatifs aux deux scénarios, il ne sera pas abordé dans cette analyse.

nombre de cas où la LG est derrière la LHEB est similaire dans l'estuaire et sur les deux berges du golfe. Dans l'estuaire maritime, on ne remarque pas de scénario privilégié : le nombre de profils relatif à chacun des trois scénarios est similaire. Sur la côte nord du golfe, près de 50% des profils montraient une LHEB plus éloignée de la mer que la LG. Sur la côte sud du golfe et dans la baie des Chaleurs, la proportion de cas relatifs à ce même scénario est considérablement plus bas. On remarque une prévalence du scénario où la LG est plus éloignée de la mer pour la côte sud du golfe.

Bien que l'analyse du scénario où les deux limites sont à la même position n'ait pas été incluse dans les tests statistiques, il reste pertinent d'en observer l'occurrence. C'est dans l'estuaire maritime qu'il y a plus de cas où les deux limites sont à la même position. Pour le golfe et la baie des Chaleurs, ce scénario se produit dans environ 20% des cas étudiés dans chaque région.

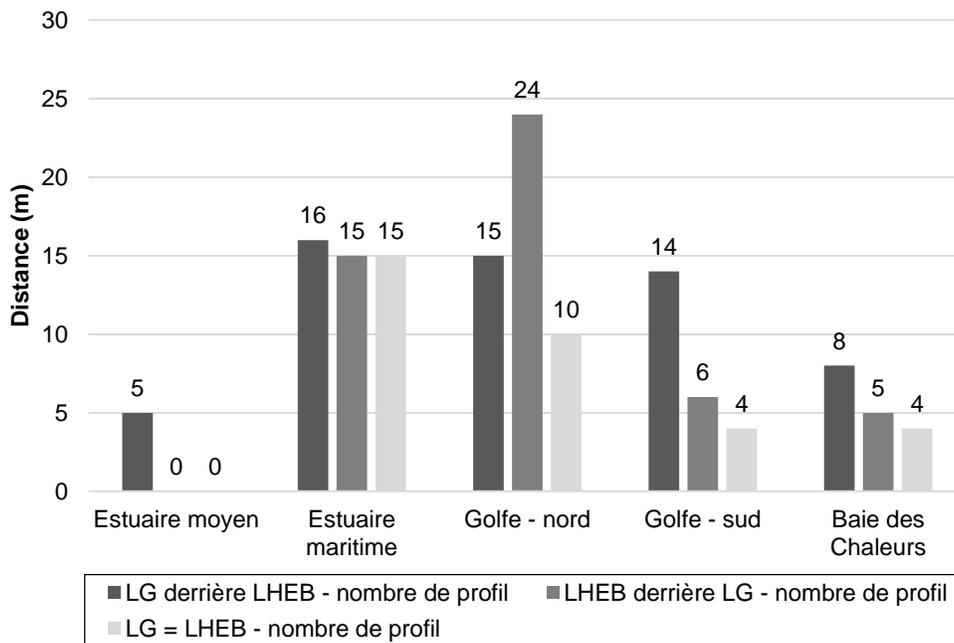


Figure 39. Occurrence des scénarios de position relative entre les deux limites selon la localisation

Les médianes et les moyennes des distances entre les deux limites selon la position horizontale relative et la localisation sont présentées sur le graphique de la figure 40. Cela permet de visualiser la différence entre les deux mesures de tendance centrale, indiquant que la moyenne est probablement influencée par des données élevées et ce, particulièrement dans l'estuaire maritime et la baie des Chaleurs. La différence entre les deux mesures semble assez uniforme

à l'échelle des divisions utilisées. C'est dans l'estuaire et la côte nord du golfe que les distances entre les limites sont les plus élevées et ce, pour les deux scénarios d'occurrence. Les distances sont plus petites en Gaspésie (côte sud du golfe et baie des Chaleurs). Dans l'estuaire maritime, la médiane des distances entre les limites est similaire qu'il s'agisse de l'un ou l'autre des scénarios (6,86 m et 6,39 m). Sur la côte nord du golfe, les distances entre les limites tendent à être plus élevées, particulièrement lorsque la LHEB se trouve derrière la LG. En Gaspésie, il y a moins d'un mètre de différence entre les médianes relatives aux deux scénarios.

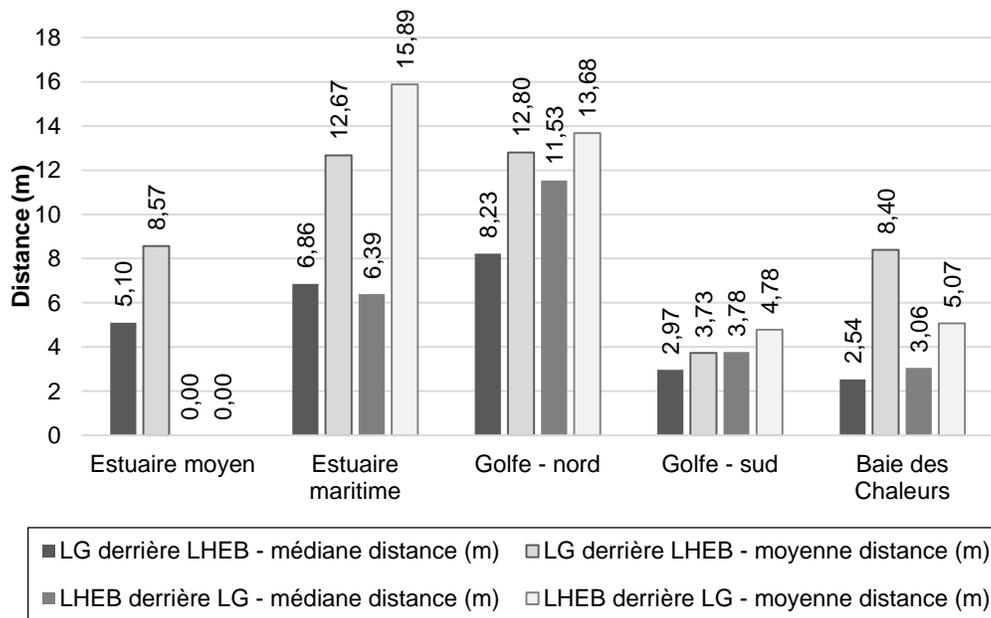


Figure 40. Distances entre les deux limites selon la position relative et la localisation

Le test de χ^2 de Pearson indique une différenciation intergroupe de l'occurrence des deux scénarios selon le type de côte, c'est-à-dire que le nombre relatif à un ou à l'autre des scénarios varie significativement selon le type de côte. Les écarts à l'indépendance montrent que la différenciation se situe principalement au niveau des flèches littorales (face extérieure), des côtes à falaise et des marais maritimes. Il est à noter que le nombre de cas relatif aux deux scénarios n'était pas suffisant pour les côtes à falaise et les flèches littorales (face intérieure) ; celles-ci ne seront pas abordées dans cette analyse.

La figure 41 permet de visualiser l'occurrence des différents scénarios selon le type de côte. Pour les terrasses de plage et les côtes artificialisées, le nombre de cas associé aux deux scénarios de position horizontale relative entre les deux limites est similaire. Tel que déterminé dans l'analyse du test de χ^2 , la différence entre le nombre de cas associé à chaque scénario est particulièrement marquée au niveau des flèches littorales (extérieur) et des marais maritimes. Dans la grande majorité des cas de flèche littorale (face extérieure), la LHEB se trouve derrière la LG (13 cas vs 3 cas). Le scénario inverse est observé pour les côtes à marais maritime, où la LG se trouve plus souvent derrière (13 cas vs 4 cas).

Bien que l'analyse du scénario où les deux limites sont à la même position n'ait pas été incluse dans les tests statistiques, il reste pertinent d'en observer l'occurrence. Les limites sont plus souvent à la même position lorsqu'il s'agit d'une terrasse de plage, de la face abritée d'une flèche littorale ou d'une côte artificialisée. Il est pertinent de souligner que dans les cas de flèches littorales (face abritée), le scénario le plus fréquent est celui où les deux limites sont à la même position.

Tableau 20. Table de fréquence et des résidus relatifs au test de χ^2 de Pearson pour la variable type de côte

Types de côtes	Fréquence - LG derrière LHEB	Fréquence - LHEB derrière LG	Écart à l'indépendance - LG derrière LHEB	Écart à l'indépendance - LHEB derrière LG
Terrasse de plage ¹⁰	25	27	0,0961	0,1296
Flèche littorale (extérieur)	3	13	13,2496	17,8084
Flèche littorale (intérieur)	3	2	0,0016	0,0016
Marais maritime	13	4	2,6896	3,61
Falaise	8	0	10,1761	13,69
Artificialisé	6	4	0,0049	0,0081

¹⁰ Les terrasses de plage avec et sans dune bordière ont été regroupées dans cette analyse puisque l'analyse concerne la distance entre les limites (et non l'altitude).

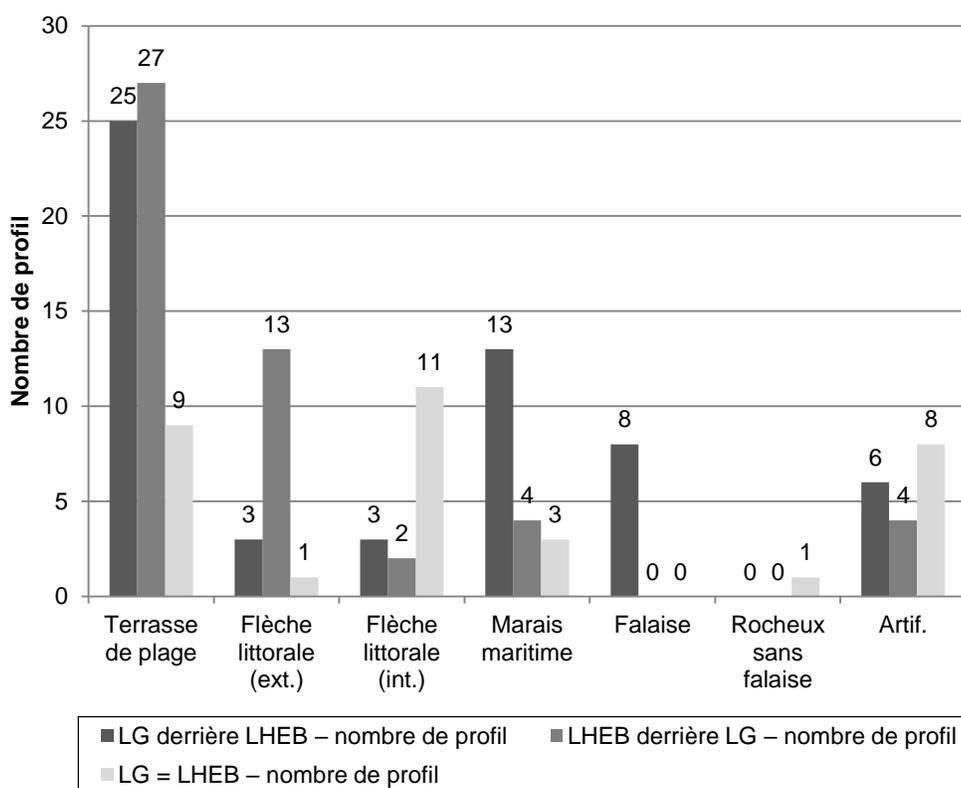


Figure 41. Occurrence des scénarios de position relative entre les deux limites selon le type de côte

Le graphique suivant (figure 42) reprend les données présentées dans le tableau 14 concernant le nombre de profils associé à chaque type de côte par rapport aux deux scénarios de position horizontale relative entre les deux limites. À cette information s'ajoute le recensement des cas où une frange de végétation éparses a été observée sur les profils, indiquant donc la présence d'une haute-plage. L'intérêt de l'intégration de cette variable concerne davantage les côtes basses d'accumulation granulaire, mais aussi les côtes à falaise et les côtes artificialisées. Le graphique permet de constater que dans tous les cas où la LG se trouve derrière la LHEB sur les côtes d'accumulation granulaire, il y a présence de végétation éparses. Les critères éco-géomorphologiques utilisés se trouvant au front de l'arrière-plage, cela implique que pour les 31 profils relatifs aux côtes d'accumulation granulaire où la LG est plus éloignée, la LHEB a été localisée sur la haute-plage. Les espèces ayant permis de localiser la LHEB sur la haute plage sont les suivantes : *Medicago lupulina* (luzerne lupuline), *Linaria vulgaris* (linaire vulgaire), *Cakile edentula* (caquillier édentulé), *Honckenya peploides ssp. Robusta* (honckénye robuste), *Chenopodium album* (chénopode blanc), *Artemisia vulgaris* (armoïse vulgaire).

La LHEB est ainsi située dans le segment de plage atteint par les houles de tempêtes normales.

De la végétation éparsa a également été observée sur certains profils où la LHEB était plus éloignée de la mer. Les espèces végétales inventoriées étaient donc exclues du calcul de prédominance des plantes terrestres sur les plantes aquatiques. Fait intéressant, aucune zone de végétation éparsa n'a été répertoriée sur les côtes artificialisées où la LHEB est plus éloignée que la LG, donc située derrière l'ouvrage de protection. Dans 5 cas sur 6 où la LG se trouvait derrière la LHEB, il y avait présence d'une haute-plage. Bien que la LG se trouve derrière la LHEB pour toutes les côtes à falaise étudiées, la LHEB n'est pas toujours définie à partir de la végétation éparsa.

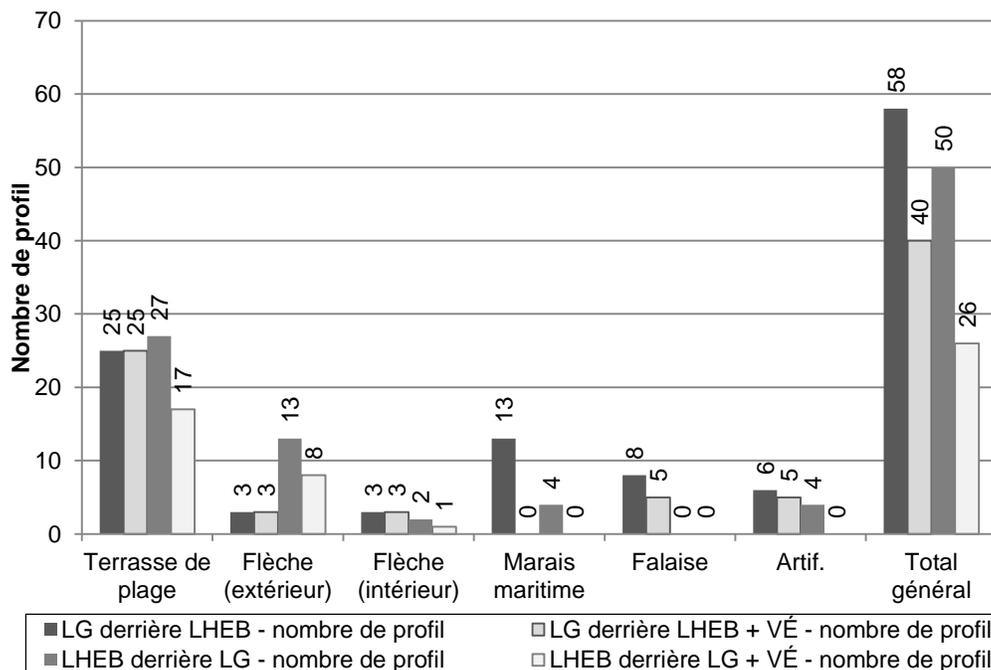


Figure 42. Position horizontale relative entre les deux limites selon le type de côte et la présence de végétation éparsa

Alors que l'état de la côte n'est pas considéré comme un facteur déterminant lorsque les deux limites ne sont pas à la même position, il est pertinent d'analyser les distances moyennes entre les deux limites en s'intéressant seulement aux types de côtes. Les médianes et les moyennes des distances entre les deux limites selon la position horizontale relative et le type de côte sont

présentées sur le graphique de la figure 43. Notons d'abord que pour certains types de côtes, les tendances de mesure centrale sont calculées sur 2 ou 3 mesures seulement ; ces mesures peuvent donc être moins représentatives de l'ensemble des côtes du Québec maritime.

La moyenne est plus élevée que la médiane dans presque tous les cas, indiquant que la moyenne est probablement influencée par des données élevées et ce, particulièrement pour les flèches littorales et les marais maritimes. La dispersion des valeurs de médiane (écart de 4,31 m pour le scénario où la LG est derrière la LHEB et de 12,90 m pour le scénario inverse) est également plus restreinte que celle des valeurs de moyenne (écart de 13,68 m pour le scénario où la LG est derrière la LHEB et de 22,24 m pour le scénario inverse). Il est pertinent d'utiliser les médianes dans l'analyse.

Règle générale, la distance entre les limites tend à être plus élevée lorsque la LHEB est derrière la LG. Les flèches littorales (extérieur) font exception. C'est au niveau des marais maritimes et des côtes artificialisées que les distances tendent à être plus grandes. Les distances tendent à être inférieures pour les faces intérieures des flèches littorales (2,64 m) et les côtes à falaise (3,19 m) lorsque la LG se situe derrière ; elles sont plus petites au niveau des faces extérieures des flèches (4,31 m) lorsque la LHEB se trouve derrière.

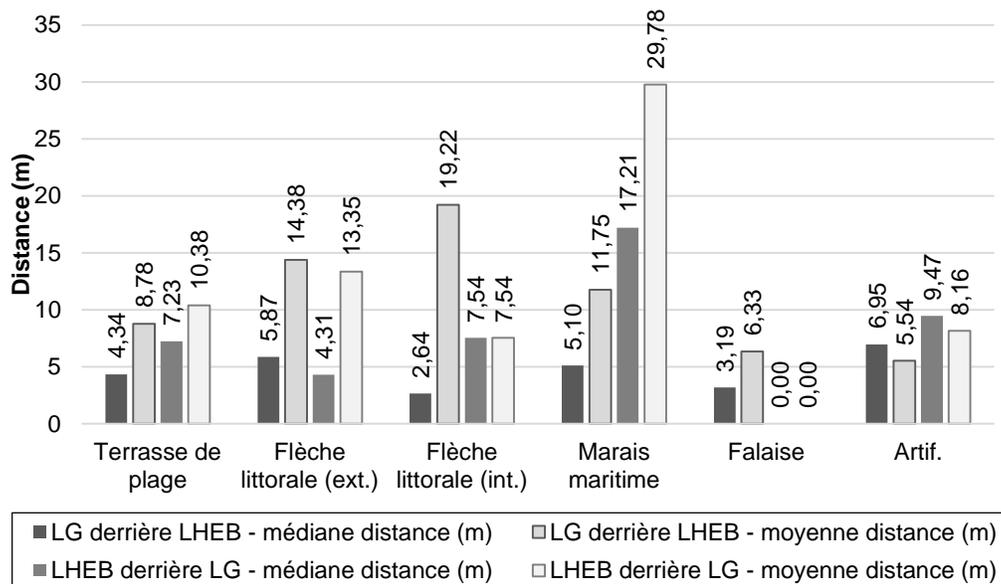


Figure 43. Distances entre les deux limites selon la position relative et le type de côte

3.3.3. Discussion sur l'analyse comparative entre les deux limites

L'analyse comparative entre la LHEB et une LG établie à partir de critères éco-géomorphologiques a permis de déceler certains patrons en fonction de la localisation, du type de côte et de l'état de la côte. L'altitude des LG déterminées dans le cadre de cette étude montre une décroissance amont-aval depuis l'estuaire moyen jusqu'au golfe et à la baie des Chaleurs, cohérente avec le patron de marnage le long du Saint-Laurent. Cette tendance s'observe à partir de l'estuaire maritime dans le cas des LHEB : les médianes des altitudes des LHEB sont similaires dans l'estuaire moyen et l'estuaire maritime. Les profils réalisés dans l'estuaire moyen ont été réalisés sur des côtes à falaise ou des côtes à marais maritime (ou côte mixte falaise à marais maritime). Pour les côtes à falaise, le critère utilisé pour déterminer la LG est le sommet de l'escarpement. Celui-ci constitue une altitude élevée par rapport au reste du profil et à l'altitude de la LHEB, qui a été positionnée devant la LG dans l'ensemble des profils réalisés dans l'estuaire moyen. Quant aux marais maritimes, des infrastructures (aboiteaux, remblai de route) ont été érigées à plusieurs endroits sur les schorres supérieurs dans cette division du Saint-Laurent. Le sommet de l'infrastructure, qui constitue souvent le point le plus élevé du profil, est alors utilisé comme critère pour déterminer la LG. La LHEB, qui se trouve devant, est nécessairement plus basse en altitude. Dans un marais maritime non anthropisé, celles-ci se seraient probablement trouvées à des altitudes supérieures. La configuration géomorphologique dans cette section du Saint-Laurent implique donc une surélévation de la LG par rapport à la LHEB.

Il est pertinent de s'intéresser à la cohérence de l'altitude de la LG dans l'estuaire moyen par rapport à l'intention derrière la ligne des hautes eaux telle que prévue dans la PPRLP. L'altitude des LG déterminées dans l'estuaire moyen s'étend entre 4,38 m et 10,02 m (médiane 4,92 m) alors que celle des LHEB va de 2,27 m à 6,88 m (médiane de 3,09 m). Le niveau des PMSGM établi à Saint-Jean-Port-Joli à partir de la station 3170 est de 3,50 m ; les niveaux de récurrence 2 ans et 100 ans sont respectivement de 3,91 m et 4,67 m (MDDEP, 1986). L'altitude des critères éco-géomorphologiques définis dans le cadre de ce projet est plus élevée que l'ensemble des mesures marégraphiques statistiques. La LG intègre donc la composante liée aux vagues et aux surcotes. L'altitude de la LHEB peut se trouver en-deçà de ces mesures. Il est à noter qu'en utilisant la méthode botanique simplifiée, la LHEB se trouverait même au-delà de la LG pour les côtes à marais maritimes de ce secteur (notamment en utilisant la limite supérieure de la distribution de l'espèce *Calamagrostis canadensis*). Il reste que les marais maritimes et les milieux humides étant des écosystèmes caractérisés de sensibles, une LHE davantage éloignée de la mer est certainement bénéfique dans une optique de protection environnementale.

Les LG et les LHEB déterminées dans le cadre de ce projet montrent toutes les deux des altitudes plus basses pour les côtes à flèche littorale (faces extérieure et intérieure) et à marais maritime par rapport aux autres types de côtes. À titre d'exemple, la LG et la LHEB déterminées sur un profil de terrasse de plage fait à Maria (baie des Chaleurs) ont respectivement des altitudes de 2,18 m et 2,05 m. Un kilomètre plus à l'est, la LG et la LHEB déterminées sur un profil de

flèche littorale ont des altitudes respectives de 1,88 m et 1,91 m (face extérieure). La différence d'altitude entre les deux profils pourtant situés à proximité va de 0,14 m (pour la LHEB) à 0,30 m (pour la LG). Le côté intérieur de cette même flèche et le fond du marais maritime abrité derrière présentent des altitudes de LG et de LHEB encore plus basses. Les LHEB ont respectivement des valeurs de 0,91 m (intérieur de la flèche littorale) et de 1,39 m (fond du marais maritime) ; les LG présentent respectivement des valeurs de 0,91 m (intérieur de la flèche littorale) et de 1,48 m (fond du marais maritime). Ces constats soulignent que la vulnérabilité des côtes face aux hauts niveaux d'eau varie en fonction du type de côte et ce, que la méthode utilisée soit botanique ou éco-géomorphologique. Cela justifie d'ailleurs la pertinence d'utiliser une méthode tendant à surélever la LHE pour les marais maritimes, tel que proposé dans le paragraphe précédent.

Il a été constaté que l'altitude des limites, particulièrement celle des LG, est plus élevée lorsque la côte est active plutôt que végétalisée. Le sommet des microfalaises formées au front de l'arrière-plage des côtes basses actives tend à être à une altitude supérieure par rapport au front de la végétation dense utilisé comme critère pour les côtes basses végétalisées. Les microfalaises présentent effectivement une rupture dans le profil topographique comparativement au front de la végétation dense. L'altitude le long des profils de côtes basses végétalisées augmente de façon graduelle et continue.

Bien que l'analyse de l'ensemble des données d'altitude pour les deux limites étudiées ait permis de ressortir certains facteurs déterminants, l'analyse de l'occurrence de scénarios quant à la position relative entre les deux limites est moins éloquent. Il ne semble pas y avoir de patron privilégié par rapport aux cas où une limite est d'altitude supérieure à l'autre en se référant à la localisation ou à l'état de la côte. Le type de côte semble toutefois permettre de privilégier un scénario plutôt qu'un autre et ce, au niveau des côtes à terrasse de plage avec dunes bordières, des côtes à falaise et des côtes à marais maritime. La géomorphologie des deux premiers types de côte explique aisément la propension de la LG à être d'altitude supérieure à la LHEB. Effectivement, les dunes bordières et les falaises présentent des discontinuités dans les profils topographiques et le sommet de ces formes géomorphologiques, utilisé comme critère pour déterminer la LG, implique une altitude élevée par rapport au reste du profil. Comme mentionné précédemment, les infrastructures érigées sur les schorres supérieurs de certains marais maritimes peuvent expliquer des altitudes de LG généralement plus élevées que celles des LHEB. La variabilité des altitudes des critères géomorphologiques à l'échelle du Québec maritime liée aux diverses formes géomorphologiques (dunes, falaise) ou anthropiques (ouvrage de protection, remblai) justifie l'utilisation de la LG comme limite planimétrique et non altitudinale.

Il a été constaté que la position verticale relative entre les deux limites n'est pas nécessairement liée à leur position planimétrique relative. Une limite dont l'altitude est plus élevée n'est pas nécessairement plus éloignée de la mer que l'autre limite, dont l'altitude est moindre. Bien que l'analyse relative à l'altitude des deux limites soit concluante, l'analyse comparative de leur position

planimétrique par rapport à la mer reste davantage pertinente en vue de déterminer une méthode cohérente avec le contexte maritime. La localisation et le type de côte sont les deux facteurs déterminants quant à la distance entre les deux limites et à leur position planimétrique relative.

Les plus grandes distances entre les deux limites sont observées sur les profils réalisés sur la côte nord du golfe du Saint-Laurent et dans l'estuaire moyen. Dans les autres divisions, les distances entre les limites sont similaires. Quant aux types de côtes, les terrasses de plage avec dune bordière, seulement recensées sur la Côte-Nord, montrent de grandes distances entre les limites. Ce constat est cohérent avec le fait que les profils de la côte nord du golfe ont montré une plus grande distance entre les limites. Il a également été remarqué que de grandes distances entre les limites avaient été observées sur plusieurs profils de côte à marais maritime. Ces écosystèmes peuvent s'étendre sur de vaste étendue puisque le profil topographique est quasi plat. La variation altitudinale des critères géomorphologiques ou botaniques, répondant aux niveaux d'eau, peut se faire sur de grandes distances. En couplant ces observations, il ressort que les distances entre les limites sont élevées pour les marais maritimes étudiés dans l'estuaire moyen, où cinq des sept profils réalisés ont été faits sur des côtes à marais maritime.

La prévalence de l'un ou l'autre des scénarios quant à la position horizontale relative entre la LG et la LHEB est observée au niveau du golfe du Saint-Laurent. Sur la côte nord du golfe, là où les distances entre les limites sont plus élevées, la LHEB a tendance à être plus éloignée de la mer par rapport à la LG. La majorité des profils réalisés dans cette division du Saint-Laurent rapporte à des côtes basses d'accumulation granulaire (46 profils sur 56). Il ressort de ces constats que sur la côte nord du golfe, les plantes terrestres **non exclues** du calcul de prédominance des plantes terrestres sur les plantes aquatiques permettant de positionner une LHEB se retrouvent loin sur l'arrière-plage. Les plantes identifiées au front de l'arrière-plage sont principalement *Ammophila breviligulata*, *Lathyrus japonicus*, *Leymus mollis* et *Ligusticum scoticum*, exclues dudit calcul. La position de la LHEB, dans ce contexte, ne répond pas directement à l'influence des hautes eaux et des vagues inhérentes au domaine maritime.

Sur la côte sud du golfe, la LG est généralement plus éloignée de la mer que la LHEB. Les distances entre les deux limites sont toutefois moindres. Dans cette portion du Saint-Laurent, la présence de végétation éparses sur la haute-plage permet de positionner la LHEB au niveau de la zone atteinte par les houles de tempêtes normales. Les espèces s'y trouvant ne sont pas toutes exclues du calcul de prédominance des plantes terrestres sur les plantes aquatiques.

Quant aux côtes basses d'accumulation, la LHEB se trouve préférentiellement derrière la LG lorsqu'il s'agit de la face exposée d'une flèche littorale. Ces milieux particulièrement dynamiques ne permettent pas l'implantation d'espèces végétales terrestres non exclues du calcul devant l'arrière-plage, au front de laquelle se situe la LG. Il est intéressant de constater que les limites tendent plus souvent à se trouver à la même position sur les faces intérieures des flèches littorales, particulièrement dans l'estuaire maritime. La géomorphologie

de ces faces abritées et les espèces de plantes les colonisant répondent davantage à l'influence des niveaux d'eau qu'à celle des vagues. Pour ces types de côtes, il appert que les deux méthodes, éco-géomorphologique et botanique, peuvent s'équivaloir.

Il a également été observé que la LG a tendance à se trouver derrière la LHEB pour les côtes à marais maritime. Rappelons que la LG pour ces types de côtes a été déterminée par cartographie et non en appliquant les critères mentionnés dans la méthode proposée pour trouver la limite supérieure du milieu humide. L'analyse comparative doit donc être relativisée. Néanmoins, la limite supérieure des milieux humides du domaine maritime sera tracée par cartographie pour l'ensemble du Québec maritime dans le cadre d'un autre projet piloté par le LDGIZC. Il a été proposé que cette limite tracée à l'aide des systèmes d'information géographique constitue la LG de référence pour les côtes à marais maritime puisque celle-ci, peu influencée par les vagues, est peu mobile. Cette limite serait alors rendue accessible pour les intervenants appliquant la PPRPLPI. Dans ce contexte, il est pertinent de comparer la position relative entre la LG et la LHEB dans le cas des marais maritimes.

Finalement, la position de la LG est moins variable dans l'espace que la LHEB. En appliquant la méthode botanique experte telle que décrite dans la PPRPLPI, la présence de certaines espèces de plantes colonisatrices (*Honckenia peploides* et *Cakile edentulata*) classées comme étant des espèces terrestres permet de placer la LHE au niveau de la haute-plage. Pour un segment voisin, d'une géomorphologie similaire, l'absence de ces espèces engendrera la localisation de la LHEB plus loin sur l'arrière-plage ou même l'impossibilité de déterminer une LHEB devant la limite des arbres. Il devient alors confondant de tracer une LHEB continue sur un segment de côte. Les critères éco-géomorphologiques sont plus intuitifs visuellement et élimine la difficulté liée à l'identification des plantes. La période de détermination de la LG est également prolongée puisqu'elle peut être appliquée à partir du retrait des glaces littorales, même en-dehors de la période de floraison.

3.3.4. Analyse comparative des limites aux Îles-de-la-Madeleine

Un total de 33 profils a été réalisé sur l'archipel des Îles-de-la-Madeleine (figure 44). Le tableau 21 recense les sites où ont été faits les profils. Le type et l'état de la côte de chaque profil sont recensés dans le tableau 22 en fonction de la localisation. Les côtes dunaires réfèrent en fait à des flèches littorales ou des tombolos dunifiés. Les dunes étant un élément géomorphologique prédominant dans la dynamique de ces côtes, celles-ci seront qualifiées de dunaires dans la présente analyse. L'archipel a été divisé en trois zones : la zone est (de Havre-Aubert à la Pointe de l'Est), la zone ouest (de Millerand à la Pointe de l'Est) et la zone sud (entre Millerand et Sandy Hook). Comme pour les profils réalisés sur le continent, les profils associés aux flèches littorales et aux tombolos présentent deux faces : une face exposée et une face abritée. Une LG et une LHEB sont localisées sur les deux côtés d'un profil associé à ces types de côtes,

portant le nombre total de profils à 51. La méthode utilisée pour localiser les critères éco-géomorphologiques et la LHEB ainsi que pour l'illustration des profils est celle présentée au début de la section 3.3.

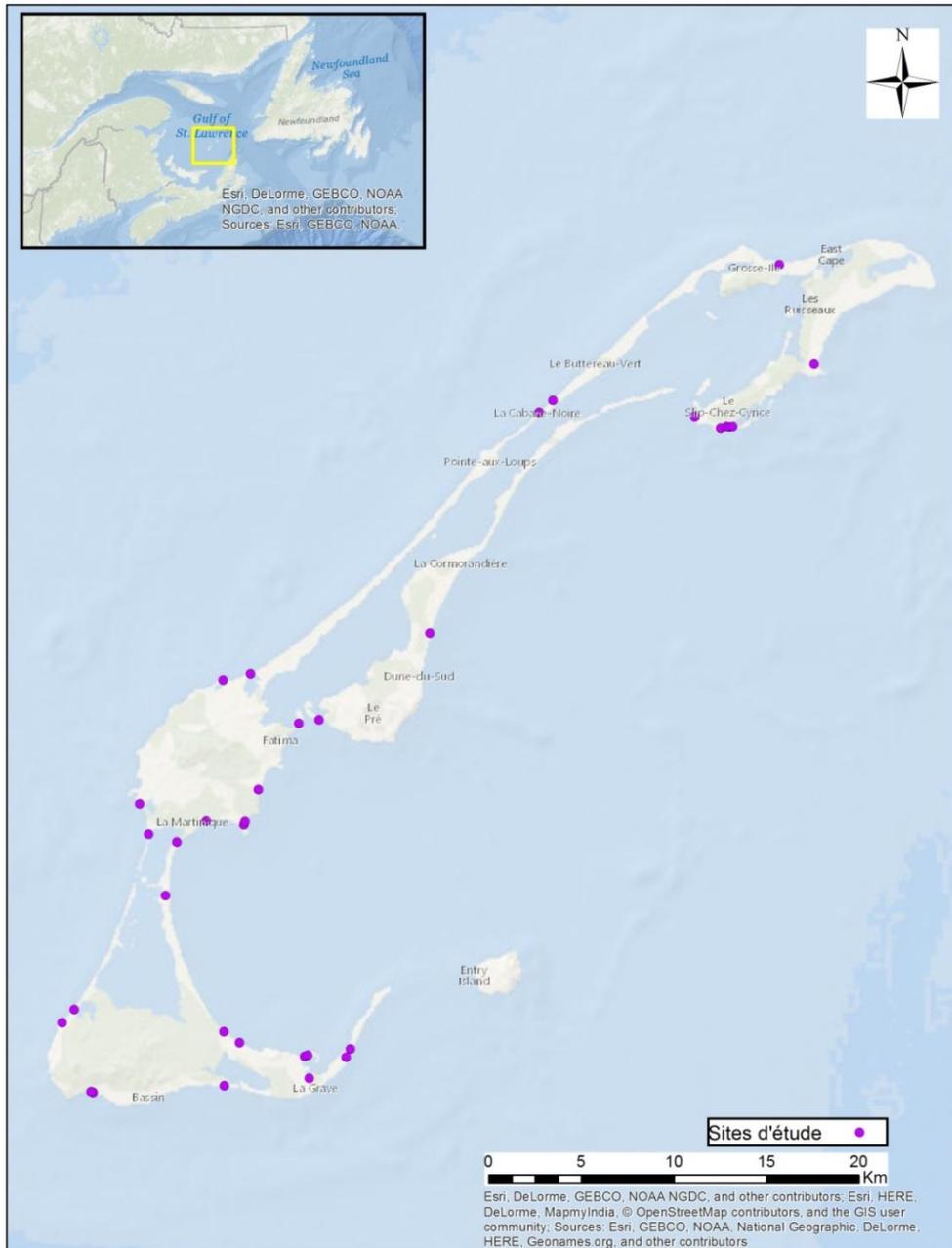


Figure 44. Carte de localisation des profils réalisés aux Îles-de-la-Madeleine

Tableau 21. Sites étudiés sur l'archipel des Îles-de-la-Madeleine

Localisation	Nombre de profils	Type de côte
Anse-à-la-Cabane	2	Falaise, terrasse de plage
Anse-aux-Baleiniers	2	Marais maritime, tombolo dunifié
Bassin Ouest	4	Falaise, marais maritime, tombolo dunifié
Cap-aux-Meules	1	Falaise
Chemin des Chalets	1	Marais maritime, tombolo dunifié
Dune de l'Ouest	2	Marais maritime, tombolo dunifié
Dune du Sud	1	Tombolo dunifié
Étang-du-Nord	2	Marais maritime, tombolo dunifié
Havre-Aubert	2	Marais maritime, tombolo dunifié
Havre-aux-Maisons	1	Artificialisé, terrasse de plage
Grande-Échouerie	1	Tombolo dunifié
Grande-Entrée	1	Terrasse de plage
Gros-Cap	2	Falaise, terrasse de plage
Grosse-Île	1	Marais maritime, tombolo dunifié
La Grave	1	Artificialisé, terrasse de plage
La Martinique	2	Artificialisé, marais maritime, terrasse de plage
Pédalo	1	Terrasse de plage, tombolo dunifié
Pointe-aux-Loups	2	Tombolo dunifié
Portage-du-Cap	2	Tombolo dunifié
Sandy Hook	2	Flèche littorale dunifiée, marais maritime

Tableau 22. Types de côtes et état des profils étudiés selon la localisation

Nombre de profil	Localisation			
	Est	Ouest	Sud	Total général
Terrasse de plage	8	0	1	9
Actif	4	0	0	4
Végétalisé	4	0	1	5
Dunaire	9	9	4	22
Actif	4	5	2	11
Végétalisé	5	4	2	11
Marais maritime	5	6	2	13
Actif	0	1	0	1
Végétalisé	5	5	2	12
Falaise	3	0	1	4
Actif	3	0	1	4
Artificialisé	3	0	0	3
Total général	28	15	8	51

3.3.4.1. Analyse comparative de l'altitude des limites LG et LHEB

Des tests non-paramétriques de Kruskal-Wallis¹¹ ont été effectués sur les distributions des altitudes des LG et des LHEB pour l'ensemble des profils étudiés aux Îles-de-la-Madeleine. Deux des variables utilisées pour regrouper les données ont montré une différenciation des médianes significative ($p > 0,05$) : le type de côte (LG $p = 0,01$; LHEB ; $p = 0,02$) et l'état de la côte (LG $p = 4,22e-5$; LHEB $p = 0,03$). La localisation des profils autour de l'archipel n'est pas un facteur faisant varier l'altitude des limites (LG $p = 0,58$; LHEB $p = 0,67$), du moins avec la division utilisée.

¹¹ Les distributions d'altitude ne suivent pas la loi normale, tant pour la LG que pour la LHEB et ce, pour les données dans leur ensemble et pour au moins un des regroupements effectués.

Le graphique suivant montre la médiane des altitudes des deux limites en fonction du type de côte ; la médiane de l'ensemble des données d'altitudes relatif à chacune des distributions est également exposée (figure 45). L'altitude de la LG tend à être plus élevée que la LHEB pour tous les types de côtes n'ayant pas d'ouvrage de protection. Cette tendance est aussi observée pour les données totales. La différence entre l'altitude des deux limites est davantage marquée pour les côtes à terrasse de plage et dunaires. Les falaises et les côtes artificialisées, dont les altitudes médianes sont plus élevées, présentent des médianes rapprochées (environ 0,15 m de différence). Les limites identifiées dans les marais maritimes ont les altitudes médianes les plus basses pour les deux limites. Notons que les médianes, pour les côtes à falaise et artificialisées, sont calculées sur respectivement 4 et 3 valeurs mesurées (voir tableau 22) ; le nombre de valeurs est faible.

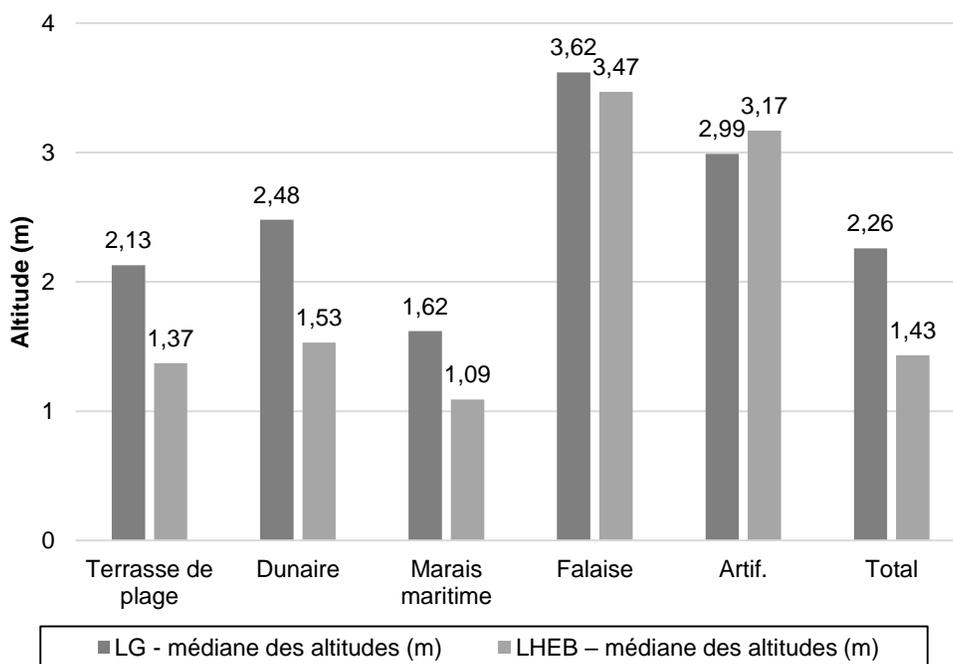


Figure 45. Médiane des altitudes des deux limites selon le type de côte

La différence d'altitude de la LG entre les côtes actives et les côtes végétalisées est particulièrement marquée (différence de 2,31 m) comparativement à celle de la LHEB (0,25 m ; figure 46). Les profils actifs dont il est question comptent notamment quatre côtes dunaires et trois falaises. Les critères utilisés pour localiser la LG réfèrent donc au sommet de ces formes géomorphologiques, expliquant des altitudes plus élevées.

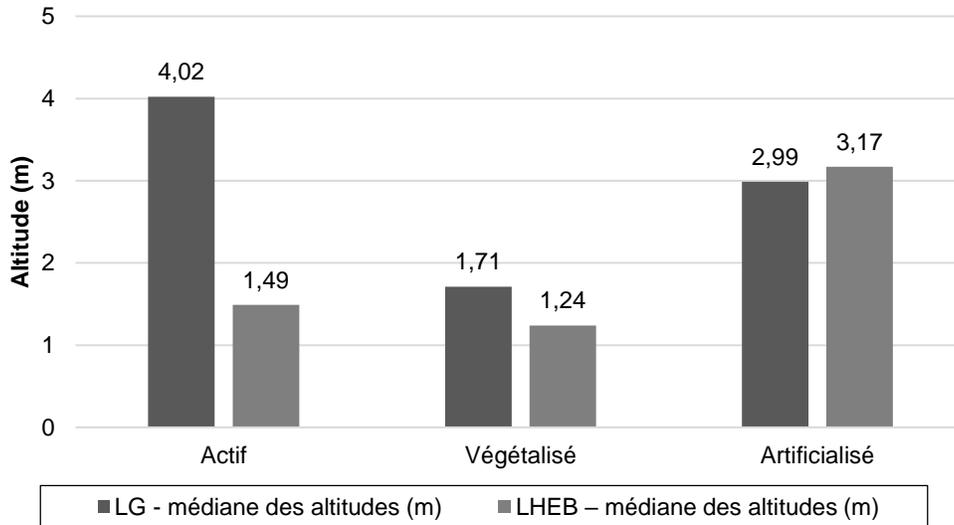


Figure 46. Médiane des altitudes des deux limites selon l'état de la côte

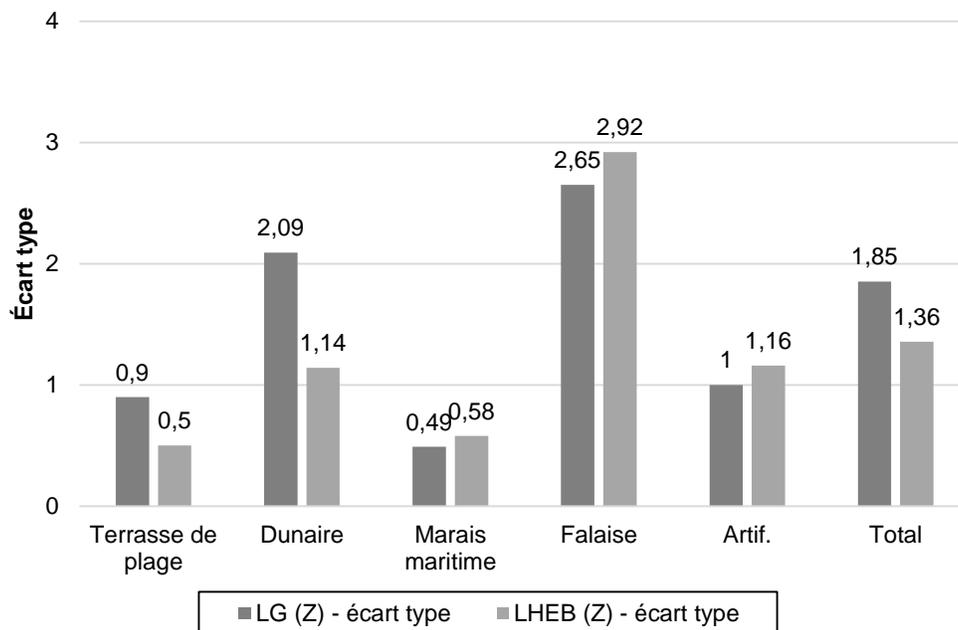


Figure 47. Écart type des altitudes des limites selon le type de côte

En analysant l'écart type relatif aux altitudes des deux limites en fonction du type de côte (figure 47), on observe que les données sont plus dispersées pour les côtes dunaires (LG) et les côtes à falaise. Les écarts types sont également assez similaires entre la LG et la LHEB pour l'ensemble des types de côtes, à l'exception des côtes dunaires. C'est donc dire que la dispersion des données comprises dans les distributions d'altitudes pour les deux limites se ressemblent ; les côtes dunaires font exception. Encore là, l'utilisation du sommet d'un élément géomorphologique dont l'altitude varie grandement autour de l'archipel explique cette variabilité. Un patron similaire se dessine au niveau des côtes à falaise et ce, tant pour la LG que pour la LHEB. Alors que les dunes se forment surtout par transport éolien et que les falaises ne sont pas des formes d'accumulation actuelles, l'altitude de ces éléments n'est pas directement liée aux vagues ou aux niveaux d'eau. Les altitudes sont alors plus variables. Les marais maritimes, dont l'altitude est davantage régie par les niveaux d'eau, et les terrasses de plage, où les vagues s'ajoutent en tant qu'agent morphogène de la plage, affichent les écarts types les plus faibles pour les deux limites.

Le tableau 23 montre le nombre de cas étudié par rapport aux trois scénarios de position verticale relative entre les deux limites. La LG était d'altitude supérieure à la LHEB dans près de 63% des cas (32 profils sur 51). L'altitude de la LHEB était plus élevée que celle de la LG dans près de 14% des cas (7 profils sur 51). Les deux limites avaient la même altitude dans près de 18% des cas, soit sur 9 profils. Il est à noter que la LG et/ou la LHEB n'a pas pu être déterminée sur 3 profils. Les critères éco-géomorphologiques définis ne se trouvaient pas sur deux profils de terrasse de plage (pas de végétation dense ou de microfalaise active : anthropisation) ; le sommet d'une falaise était inaccessible avec nos outils pour le troisième cas.

Tableau 23. Position verticale relative entre les deux limites

Position verticale relative entre la LG et la LHEB	Nombre de profils étudiés	Pourcentage par rapport au total des profils étudiés (%)
LG (Z) plus élevée que la LHEB (Z)	32	62,7
LHEB (Z) plus élevée que la LG (Z)	7	13,7
LG (Z) et LHEB (Z) à la même altitude	9	17,6
Limite non déterminée	3	5,9
Total	51	100,0

Pour la majorité des profils analysés, la LG avait une altitude supérieure à la LHEB. Ce scénario est observé particulièrement pour les côtes dunaires (15 cas sur 22) et les marais maritimes (10 cas sur 13 ; tableau 24). Pour deux des côtes artificialisées, les deux limites se situaient à la même altitude. L'état de la côte ne semble pas être un facteur déterminant par rapport à l'occurrence de l'un ou

l'autre des scénarios, du moins pour les côtes dunaires. Il y a trop peu de profils de terrasse de plage et de falaise dans cette étude pour tirer une telle conclusion. Il est à noter que l'occurrence de chaque scénario en fonction du type de côte et de l'état est trop faible pour pouvoir appliquer le test de χ^2 et le test exact de Fisher.

Tableau 24. Position verticale relative entre les deux limites en fonction du type et de l'état de la côte

Types de côtes et état	LG (Z) plus élevée que la LHEB (Z) - nombre de profils	LHEB (Z) plus élevée que la LG (Z) - nombre de profils	LHEB (Z) même altitude LG (Z) - nombre de profils
Terrasse de plage	4	1	2
Actif	1	0	1
Végétalisé	3	1	1
Dunaire	15	3	4
Actif	9	1	1
Végétalisé	6	2	3
Marais maritime	10	2	1
Falaise	3	0	0
Actif	3	0	0
Artificialisé	0	1	2
Total général	32	7	9

3.3.4.2. *Analyse comparative des distances entre les limites LG et LHEB*

Des tests non-paramétriques de Kruskal-Wallis¹² ont été effectués sur les distributions des distances entre la LG et la LHEB pour l'ensemble des profils étudiés aux Îles-de-la-Madeleine. Aucune des variables utilisées pour regrouper les données n'a montré de différenciation des médianes significative ($p > 0,05$), soit la localisation ($p = 0,31$), le type de côte ($p = 0,18$) et l'état de la côte ($p = 0,45$). La distance entre les limites est statistiquement indépendante de ces facteurs.

¹² Les distributions de distances ne suivent pas la loi normale tant pour les données dans leur ensemble et pour au moins un des regroupements effectués.

En regardant l'occurrence des scénarios relatifs à la position horizontale relative entre les deux limites, on remarque que la LG se trouve derrière la LHEB dans la majorité des cas (29 cas sur 51 ; tableau 25). La LHEB se trouve derrière la LG dans 10 cas sur 51. Il est à noter qu'aucun de ces 10 cas n'est situé à l'ouest de l'archipel où l'énergie des vagues est plus importante. Sur les 15 cas étudiés dans cette zone, la LHEB est plus proche de la mer que la LG.

Le nombre de profils attribuable aux trois scénarios de position horizontale relative entre les deux limites est similaire aux scénarios en lien avec la position verticale relative entre les deux limites¹³. Néanmoins, en comparant les tableaux 23 et 25, on déduit qu'on ne peut pas systématiquement associer un scénario de position verticale à un scénario de position horizontale. Autrement dit, bien qu'une limite soit d'altitude plus élevée, cela ne veut pas nécessairement dire qu'elle est plus éloignée de la mer.

Pour la grande majorité des côtes dunaires et pour la quasi-totalité des marais maritimes, la LG se trouve derrière la LHEB (tableau 26). Il est aussi intéressant de constater que sur les 7 profils de terrasse de plage réalisés, tous ceux dont la LG se trouvait derrière la LHEB étaient végétalisés. Pour les côtes dunaires, les deux limites se trouvaient plus souvent à la même place si la côte était végétalisée. Pour les autres types de côtes, l'état ne semble pas être un facteur déterminant quant à l'occurrence de l'un ou l'autre des scénarios. Pour les trois cas de côtes artificialisées, la LHEB est soit derrière la LG, soit à la même place.

Tableau 25. Position horizontale relative entre les deux limites

Position horizontale relative entre la LG et la LHEB	Nombre de profils étudiés	Pourcentage par rapport au total des profils étudiés (%)
LG derrière LHEB	29	56,9
LHEB derrière LG	10	19,6
LG et LHEB à la même position	9	17,6
Limite non déterminée	3	5,9
Total	51	100,0

¹³ L'occurrence des différents scénarios par rapport aux facteurs étudiés n'est pas assez élevée pour pouvoir effectuer des tests statistiques significatifs. Une interprétation visuelle est effectuée.

**Tableau 26. Position horizontale relative entre les deux limites
en fonction du type et de l'état de la côte**

Types de côtes	LG derrière la LHEB - nombre de profils	LHEB derrière la LG - nombre de profils	LG et LHEB à la même position - nombre de profils
Terrasse de plage	3	2	2
Actif	0	1	1
Végétalisé	3	1	1
Dunaire	13	5	4
Actif	7	3	1
Végétalisé	6	2	3
Marais maritime	11	1	1
Falaise	2	1	0
Actif	2	1	0
Artificialisé	0	1	2
Total général	29	10	9

La figure 48 reprend les données présentées dans le tableau 26 concernant le nombre de profils associé à chaque type de côte par rapport aux deux scénarios de position horizontale relative entre les deux limites. À cette information s'ajoute le recensement des cas où de la végétation éparsée a été observée sur les profils, indiquant donc la présence d'une haute-plage. L'intérêt de l'intégration de cette variable concerne davantage les côtes à terrasse de plage et dunaires, mais aussi les côtes à falaise. Le graphique permet de constater que dans tous les cas où la LG se trouve derrière la LHEB sur les côtes d'accumulation granulaire, il y a présence de végétation éparsée. Les critères éco-géomorphologiques utilisés se trouvant au front de l'arrière-plage (végétation dense, sommet d'escarpement, pied ou crête de dune), cela implique que pour les 16 profils relatifs aux côtes d'accumulation granulaire où la LG est plus éloignée, la LHEB a été localisée sur la haute-plage. L'espèce la plus fréquente incluse dans le calcul de prédominance des plantes terrestres par rapport aux plantes aquatiques aux Îles-de-la-Madeleine est *Cakile edentula* (caquillier édentulé). La LHEB est ainsi située dans le segment de plage atteint par les houles de tempêtes normales.

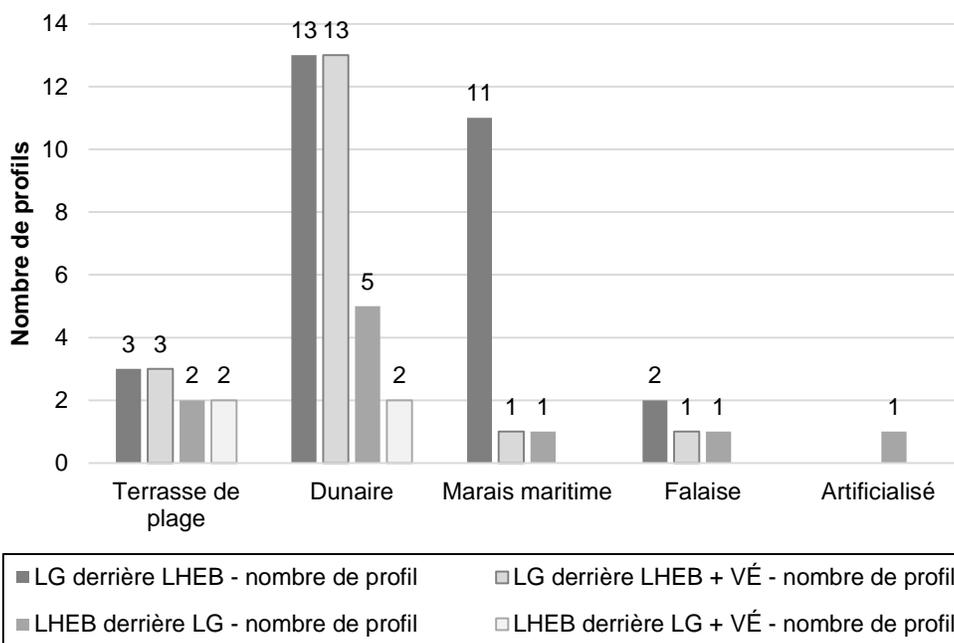


Figure 48. Position horizontale relative entre les deux limites selon le type de côte et la présence de végétation éparse

La figure 49 montre la distance entre les deux limites en fonction de leur position horizontale relative et du type de côte. On s'intéresse davantage aux côtes dunaires et aux marais maritimes dont les moyennes relatives aux deux scénarios présentés sont calculées à partir d'un plus grand nombre de données. Pour les côtes dunaires, la distance entre les deux limites est considérablement plus élevée lorsque la LHEB se trouve derrière la LG (15,5 m vs 9,53 m). Lorsque la LG est derrière la LHEB, la distance entre les deux limites est plus élevée lorsqu'il s'agit d'un marais maritime (médiane de 13,24 m). Il n'y a qu'un cas de marais maritime où la LHEB est derrière la LG alors aucune interprétation ne peut en découler.

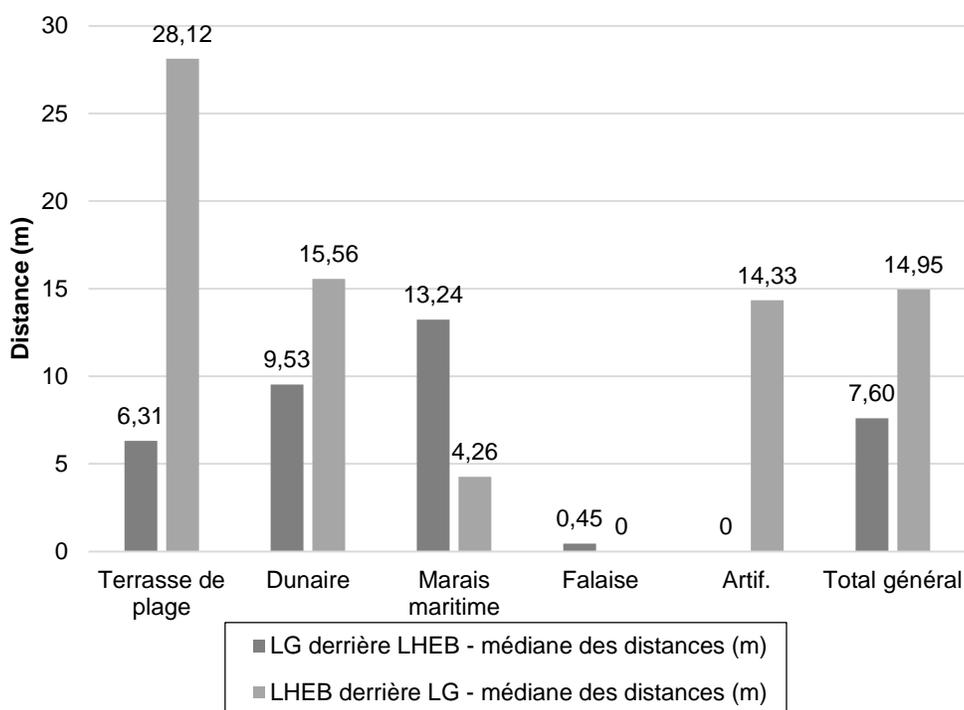


Figure 49. Médianes des distances entre les deux limites en fonction de leur position horizontale relative et du type de côte

3.3.4.3. Discussion par rapport à l'analyse comparative des deux limites aux Îles-de-la-Madeleine

Bien que le nombre de profils étudié limite certaines analyses statistiques, il ressort que les résultats de l'analyse comparative effectuée sur les profils réalisés aux Îles-de-la-Madeleine diffèrent de ceux obtenus sur le continent. D'abord, le type de côte et son état semblent être les seuls facteurs déterminants quant à l'altitude de la LG et de la LHEB. La localisation autour de l'archipel n'a pas d'influence significative sur l'altitude entre les limites. Cela s'explique certainement par le faible marnage caractérisant l'ensemble de la région insulaire. Les cas géomorphologiques types observés sur l'archipel expliquent la tendance marquée à ce que la LG soit plus élevée en altitude que la LHEB. Les côtes à tombolo dunifié et à flèche littorale dunifiée ainsi que les côtes à falaise répondent certes à des agents hydrodynamiques marins mais aussi à des facteurs extérieurs, tels que les processus éoliens et gravitaires. En ce sens, la position altitudinale et planimétrique d'une limite géomorphologique n'est pas exclusivement liée à la limite des hauts niveaux d'eau et des vagues. Les critères éco-géomorphologiques utilisés sont donc plus souvent élevés en altitude. L'état actif de ces types de côtes vient intensifier ce phénomène. Qui

plus est, les perturbations anthropiques qui caractérisent les côtes de l'archipel viennent modifier la position des critères éco-géomorphologiques utilisés. Le piétinement de la végétation dunaire tend à repousser vers les terres le critère applicable pour définir une LG, et donc à en élever l'altitude.

Quant à la distance entre les deux limites, aucun facteur ne s'est avéré significatif. La propension à ce que la LG soit plus éloignée de la mer que la LHEB est néanmoins notable. L'assemblage végétale des côtes sableuses dunifiées est caractérisé par les espèces *Ammophila breviligulata* et *Cakile edentula*. La première espèce étant exclue du calcul de prédominance des plantes terrestres sur les plantes aquatiques fait en sorte que les individus de *Cakile edentula*, une espèce colonisatrice qui s'installe souvent sur la haute-plage, définissent bien souvent la localisation de la LHEB. La densité souvent faible de *Ammophila breviligulata* tend également à repousser vers les terres le critère éco-géomorphologique utilisé pour définir la LG. Un seuil de densité spécifique de cette espèce a donc été établi dans la définition des critères afin de réduire la subjectivité liée à l'identification de la limite de végétation dense (voir section 3.2.1).

La configuration des écosystèmes côtiers des Îles-de-la-Madeleine requiert l'application d'une méthode propre à l'archipel. Celle-ci doit prendre en compte les types de côtes et les assemblages botaniques spécifiques à cette région insulaire du golfe du Saint-Laurent. Certains indicateurs particuliers ont pu être relevés lors de la campagne terrain et pourront bonifier l'application d'une méthode éco-géomorphologique pour les Îles-de-la-Madeleine, laquelle sera intégrée à la section suivante.

3.4. Proposition d'une méthode éco-géomorphologique adaptée au milieu côtier

La méthode proposée par le LDGIZC pour déterminer une limite correspondant aux objectifs visés par l'application de la PPRLPI est de type éco-géomorphologique. Elle permet de déterminer une limite géomorphologique (LG) qui répond à la dynamique des vagues et des niveaux d'eau pour le domaine maritime. Cette méthode est basée sur la morphologie des divers types de côtes recensés le long de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent. Elle implique une classification selon le type de côte ainsi que l'utilisation de critères géomorphologiques. De plus, l'utilisation de la limite de végétation dense, qui est fonction de la géomorphologie de la zone intertidale et du niveau d'eau total à la côte, permet d'intégrer la composante écologique. Elle est divisée en deux catégories : les côtes exposées et les côtes abritées.

D'abord, l'illustration des profils géomorphologiques types recensés le long de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent a été réalisée. Ces profils types montrent la localisation du critère éco-géomorphologique à utiliser pour déterminer la LG en fonction du type de côte et de son état. Ces illustrations référeront ensuite à la clé d'aide à la décision, qui progresse en fonction de la présence ou de l'absence des critères éco-géomorphologiques décrits.

3.4.1. Les côtes exposées

Côtes d'accumulation granulaire

Les côtes d'accumulation granulaire présentent des profils transversaux similaires dont la classification de la zone côtière comprend un bas estran, un haut estran, une haute-plage (le cas échéant) et une arrière-plage. Les critères éco-géomorphologiques applicables sont donc les mêmes pour l'ensemble des types de côtes inclus dans cette catégorie, soit les terrasses de plage (avec ou sans dune bordière), les flèches littorales, les tombolos et les cordons littoraux. Pour les flèches littorales, les tombolos et les cordons littoraux, le profil type peut représenter autant la face extérieure (exposée) que la face intérieure (abritée). Les côtes dunaires sont présentées dans une catégorie à part.

On distingue d'abord les côtes d'accumulation granulaire dont l'état est végétalisé (stable ou en accumulation) et ayant une haute-plage (figure 50). Cette haute-plage peut être composée de végétation éparses ou de végétation dense. Lorsque la végétation est dense, on retrouve généralement un escarpement stabilisé (microfalaise) derrière la haute-plage, soit au front de l'arrière-plage. Si la haute-plage végétalisée a une largeur de 5 m ou plus, c'est-à-dire entre le pied de l'escarpement et le front de la végétation dense, c'est le premier critère éco-géomorphologique rencontré qui constitue la LG (le front de la végétation dense située au début de la haute-plage). Si cette haute-plage fait moins de 5 m de large, c'est le sommet de l'escarpement stabilisé derrière la haute-plage qui constitue la LG. Si la haute-plage est caractérisée par de la

végétation éparses, celle-ci n'est pas considérée ; la LG se situe au front de la végétation dense derrière la haute-plage.

Les profils de côte d'accumulation granulaire dont l'état est végétalisé (stable ou en accumulation) et n'ayant pas de haute-plage (figure 50) présentent un front de végétation à la frontière entre le haut estran et l'arrière-plage. La LG se situe à la limite de ce front de végétation dense.

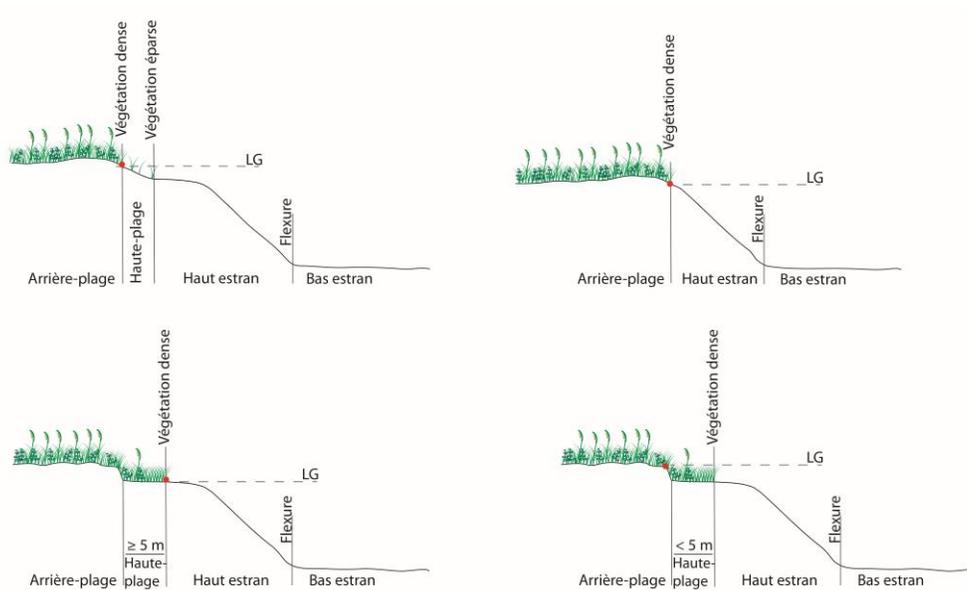


Figure 50. Méthode éco-géomorphologique pour les côtes d'accumulation granulaire végétalisées

Les côtes d'accumulation granulaire dont l'état est actif (figure 51) sont caractérisées par la présence d'un escarpement actif (microfalaise d'érosion). Une telle côte peut néanmoins être munie d'une haute-plage. On recense deux cas spécifiques dans cette catégorie. L'escarpement actif peut se trouver au front de la haute-plage ou au front de l'arrière-plage. Lorsque l'escarpement actif se situe au front de la haute-plage, on dénote la présence de végétation éparses directement au-dessus de l'escarpement puis un front de végétation dense derrière. La LG se situe au-delà de la végétation éparses, à la limite de la végétation dense. Si l'escarpement actif se trouve au front de l'arrière-plage et qu'une frange de haute-plage se trouve devant celle-ci (présence de végétation éparses), la LG est localisée au sommet de l'escarpement actif. Si la côte d'accumulation granulaire est active et n'a pas de haute-plage, la LG se situe directement au sommet de l'escarpement actif (microfalaise d'érosion). Les cas de flèches littorales (ou de tombolo) dont aucune arrière-plage n'est présente

entre aussi dans cette catégorie. Seule de la végétation éparses est observée. Il n'y a donc pas de LG à cet endroit : elle se trouve davantage vers les terres.

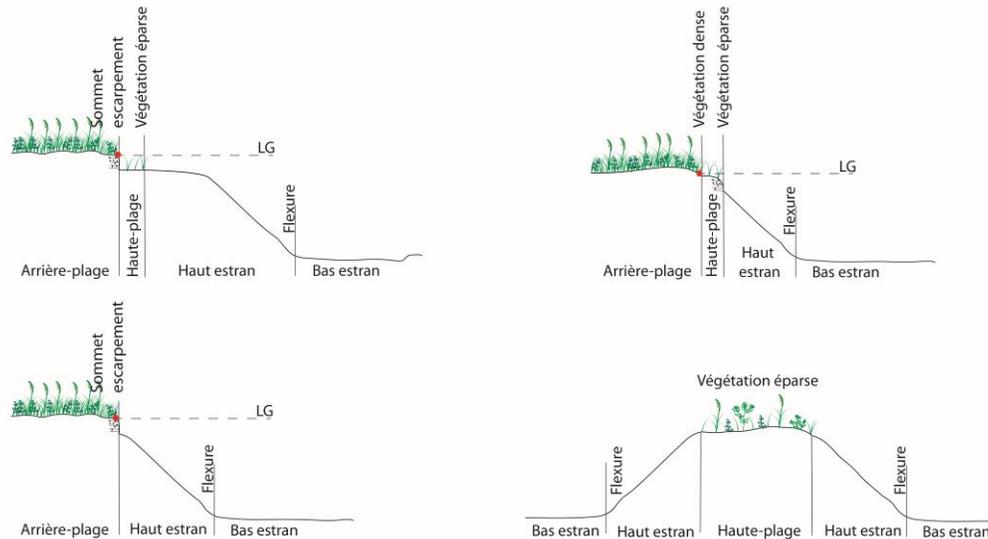


Figure 51. Méthode éco-géomorphologique pour les côtes d'accumulation granulaire actives

Côtes dunaires

La figure 52 expose les deux cas typiques de côtes dunaires végétalisées (stable ou en accumulation). La dune frontale est qualifiée de végétalisée si de la végétation dense est présente en continu de la crête au pied de la dune. Rappelons qu'aux Îles-de-la-Madeleine, en présence quasi-exclusive de *Ammophila breviligulata*, la végétation est considérée dense à partir d'un seuil de 40% de recouvrement de végétation. À gauche de l'illustration, le profil est caractérisé par la présence d'une haute-plage et à droite, la haute-plage est absente. Dans les deux cas, la LG se situe au pied de la dune. Même si un front de végétation dense s'avance sur la haute-plage tel qu'illustré à gauche de la figure, la LG sera localisée au pied de la dune.

Les cas relatifs aux côtes dunaires actives sont illustrés à la figure 53. Si la dune est couverte de végétation éparses entre le pied et la crête, ne serait-ce qu'en partie, elle sera considérée comme active dans la méthode éco-géomorphologique proposée ici. Si la dune est coupée par un escarpement, la côte sera considérée active, même si l'escarpement ne coupe pas la totalité de la face de la dune. À droite de l'illustration, le profil présente une haute-plage ; à gauche, celle-ci est absente. Dans l'un ou l'autre des cas, la LG est située sur la crête de la dune. Tel que spécifié dans la définition des critères éco-

géomorphologiques, il importe d'utiliser la crête de la dune et non le sommet de l'escarpement.

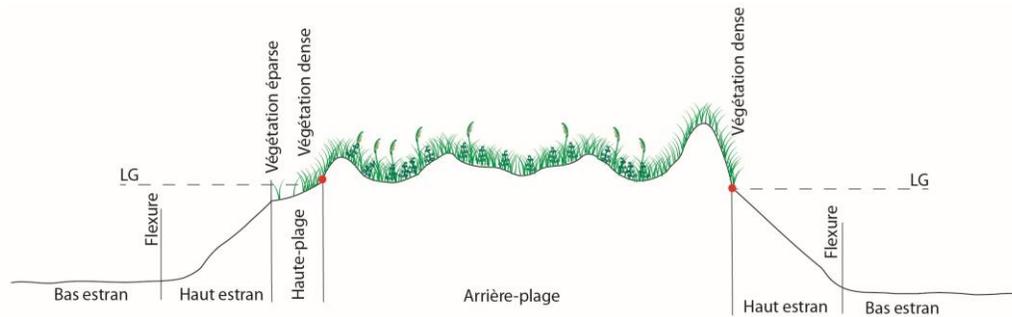


Figure 52. Méthode éco-géomorphologique pour les côtes dunaires végétalisées

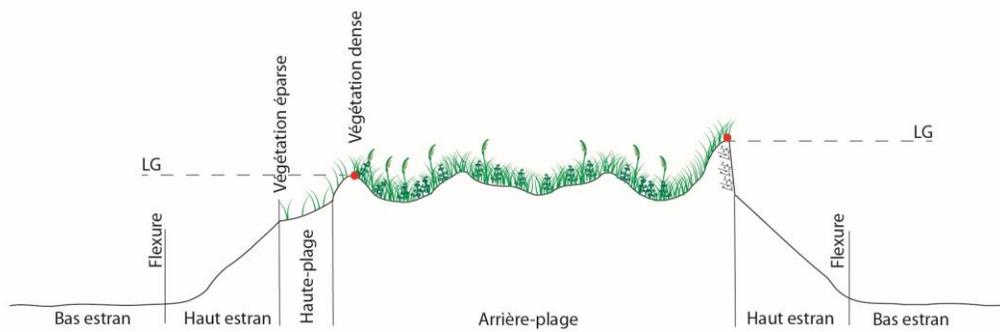


Figure 53. Méthode éco-géomorphologique pour les côtes dunaire actives

Les côtes dunaires sont parfois précédées d'une terrasse de plage (figure 54). Une terrasse de plage sera considérée si elle répond aux trois critères suivants :

1. Elle est caractérisée par de la végétation dense et bien établie (arrière-plage) ;
2. L'arrière-plage de la terrasse de plage fait au moins 5 m de largeur ;
3. L'arrière-plage de la terrasse de plage fait au moins 50 m de long de façon parallèle à la côte.

Si la terrasse de plage rencontre ces trois critères, la LG se situera au front de l'arrière-plage (limite de la végétation dense ou sommet de l'escarpement). Sinon, la LG sera localisée au pied de la dune derrière la terrasse de plage.

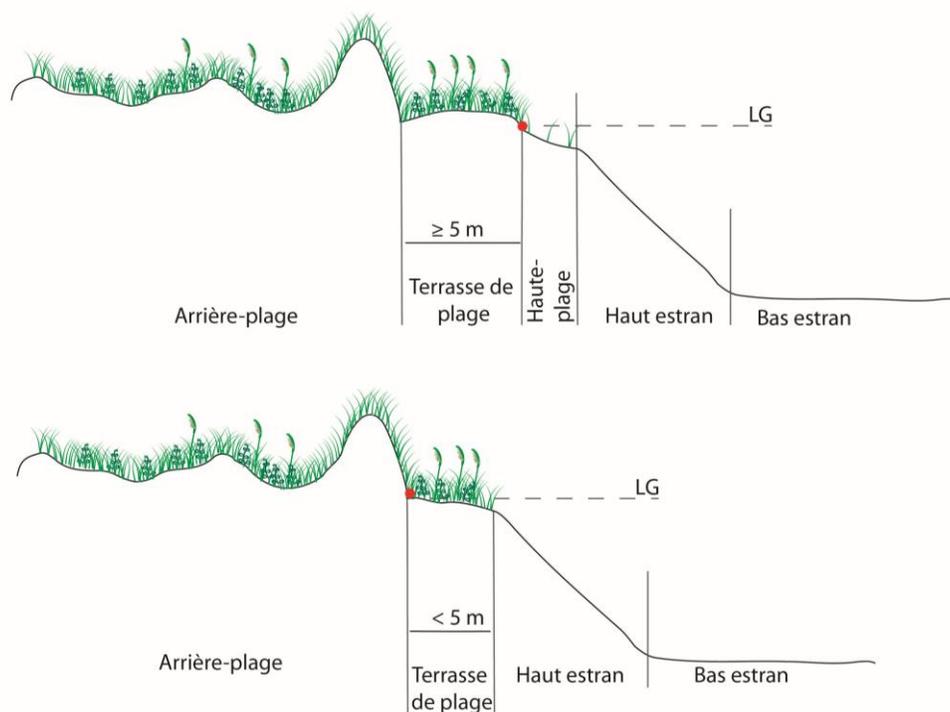


Figure 54. Méthode éco-géomorphologique pour les côtes dunaires à terrasse de plage

Marais maritime frangeant

Pour les cas des marais maritimes frangeants, le critère servant à déterminer la limite géomorphologique est la fin du milieu humide côtier, c'est-à-dire la limite supérieure du schorre supérieur. Trois grands scénarios sont observés : un escarpement (falaise) borde le schorre supérieur; une infrastructure a été implantée près de la limite supérieure du schorre, constituant une limite anthropique de l'écosystème ; et le passage entre le schorre supérieur et la zone dite riveraine n'est pas marqué par une forme géomorphologique spécifique, la pente des deux zones étant faible et continue.

Le premier élément utilisé pour déterminer une limite géomorphologique est la présence d'un escarpement (falaise) ou d'un ouvrage de protection (aboiereau, route, remblai). Dans ces cas, la LG est située au sommet de l'escarpement ou de l'infrastructure (figure 55). Si le passage entre le littoral et la rive se fait sans démarcation géomorphologique apparente, la fin du schorre supérieur devra être déterminée à partir du substrat. Lorsqu'un milieu humide d'eau douce borde un marais maritime, les méthodes prévues à la PPRPLPI pour ce type de milieu

peuvent alors être directement appliquées (ex. méthode botanique experte ; correspond à LHEB sur la figure 55).

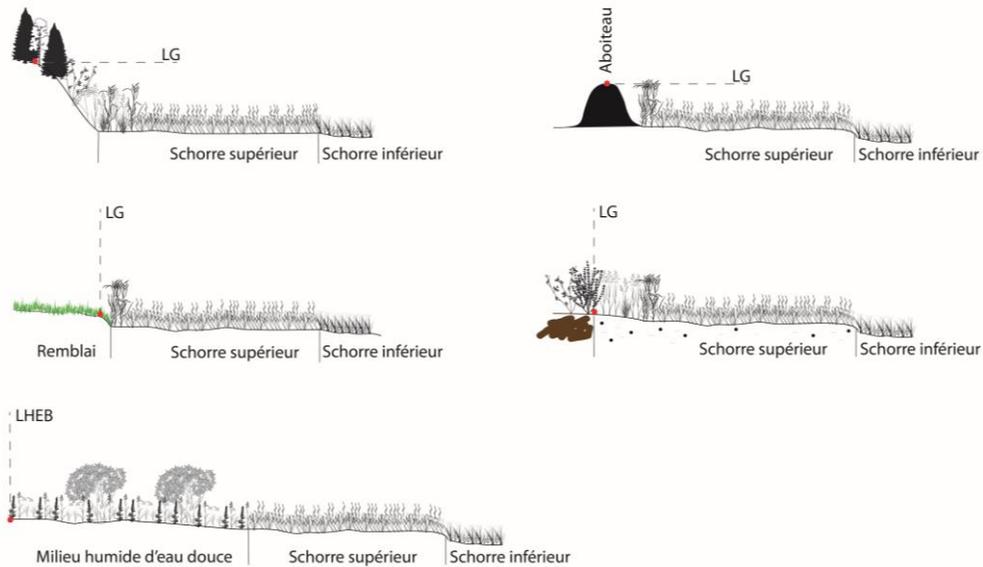


Figure 55. Méthode éco-géomorphologique pour les côtes à marais maritime frangeant

Il est à noter qu'un schorre inférieur ou une partie de schorre est parfois présente sur un bas estran ou un haut estran sableux (figure 56) : ceux-ci ne sont pas utilisés comme critère. Le type de côte derrière ce lambeau de schorre permettra de déterminer la méthode à utiliser pour localiser la LG.

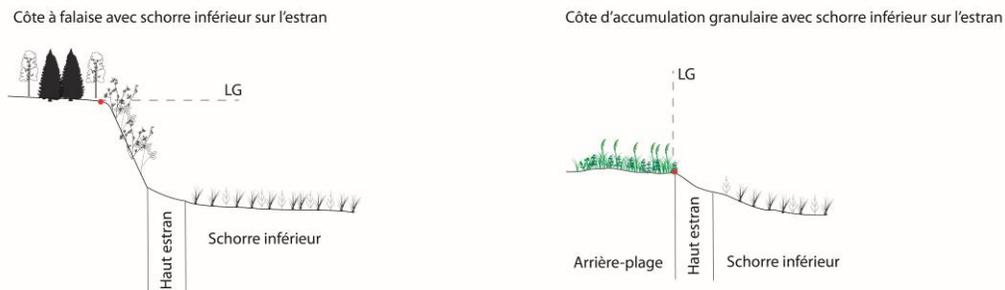


Figure 56. Méthode éco-géomorphologique pour les côtes avec lambeaux de schorre

Côte rocheuse sans falaise

Le critère utilisé pour déterminer une limite sur les côtes rocheuses sans falaise en est un de type écologique (figure 57). On recherche la limite inférieure de la végétation terrestre. La végétation peut être herbacée, arbustive ou arborescente ; elle peut être éparsée ou dense pour ces types de côtes. Les lichens constituent également un critère pour positionner la LG.



Figure 57. Méthode éco-géomorphologique pour les côtes rocheuses sans falaise. À gauche de la figure, la LG se situe au front de la végétation éparsée ; à droite de la figure, la LG se situe au front du lichen (orangé).

Falaise

Que la falaise soit active ou végétalisée, la LG se situera au sommet de l'escarpement (figure 58), tel que défini dans la section 3.2.1. Le seul critère à considérer est la présence ou l'absence d'une terrasse de plage devant la falaise. Effectivement, une falaise est parfois précédée d'une terrasse de plage (figure 59). Une terrasse de plage sera considérée si elle répond aux trois critères suivants :

1. Elle est caractérisée par de la végétation dense et bien établie (arrière-plage) ;
2. L'arrière-plage de la terrasse de plage fait au moins 5 m de largeur ;
3. L'arrière-plage de la terrasse de plage fait au moins 50 m de long de façon parallèle à la côte.

Si la terrasse de plage rencontre ces trois critères, la LG se situera au front de l'arrière-plage (limite de la végétation dense ou sommet de l'escarpement). Sinon, la LG sera localisée au sommet de la falaise derrière la terrasse de plage.

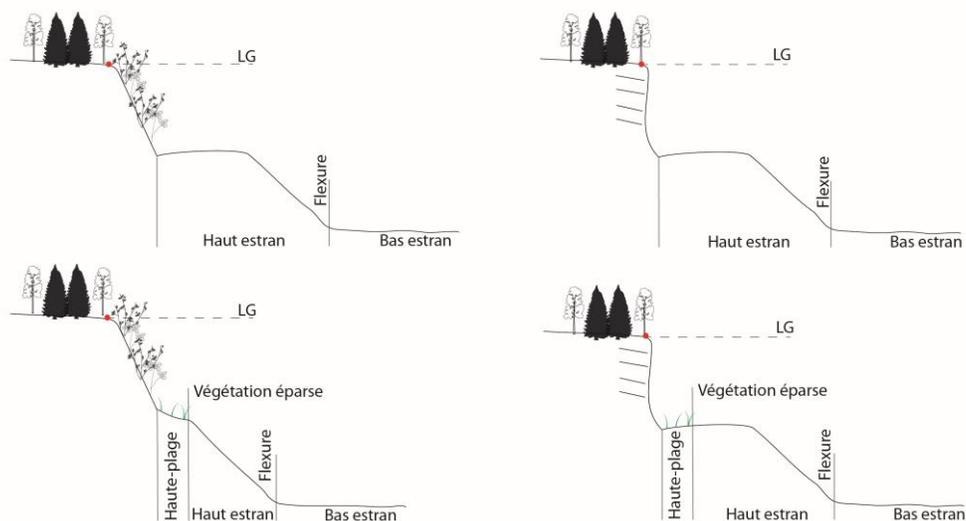


Figure 58. Méthode éco-géomorphologique pour les côtes à falaise

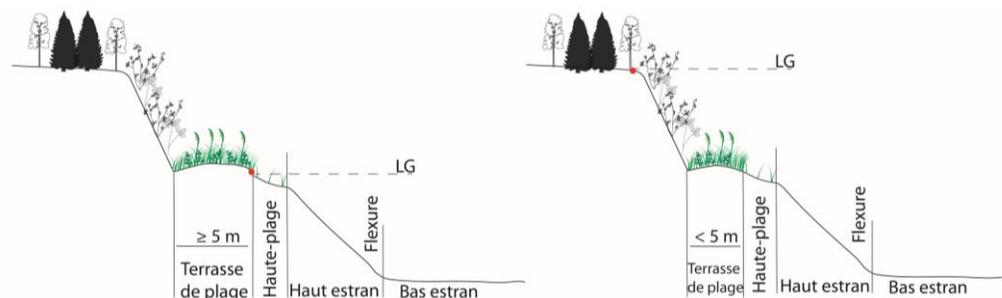


Figure 59. Méthode éco-géomorphologique pour les côtes à falaise à terrasse de plage

Côte artificialisée

Le processus pour localiser la LG sur les côtes artificialisées est similaire à celui des côtes à falaise. L'influence des vagues et des processus de franchissement justifie d'utiliser le sommet de l'ouvrage de protection tel qu'actuellement défini dans la PPRLP (figure 60). Rappelons que l'infrastructure doit se trouver au front de l'arrière-plage pour déterminer une LG. Un ouvrage situé sur l'estran ne sera pas considéré (par exemple : un épis rocheux ou en bois perpendiculaire à la côte, un muret se trouvant sur la haut estran). La méthode à suivre pour les cas de marais maritimes où une infrastructure a été érigée (aboiteau, remblai de route) est décrite précédemment dans la section *Marais maritime frangeant*. Le seul cas où un critère différent pourra être utilisé est lorsque l'infrastructure

est précédée d'une terrasse de plage (figure 61). La terrasse de plage sera considérée si elle répond aux trois critères suivants :

1. Elle est caractérisée par de la végétation dense et bien établie (arrière-plage) ;
2. L'arrière-plage de la terrasse de plage fait au moins 5 m de largeur ;
3. L'arrière-plage de la terrasse de plage fait au moins 50 m de long de façon parallèle à la côte.

Si la terrasse de plage rencontre ces trois critères, la LG se situera au front de l'arrière-plage (limite de la végétation dense ou sommet de l'escarpement). Sinon, la LG sera localisée au sommet de l'ouvrage de protection derrière la terrasse de plage.

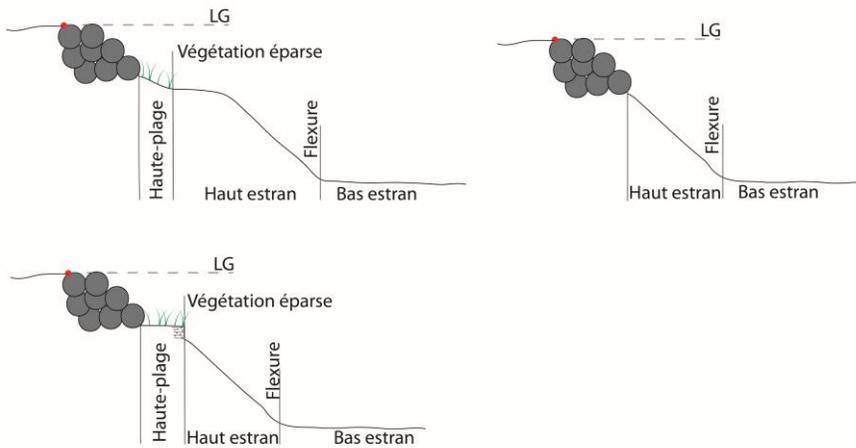


Figure 60. Méthode éco-géomorphologique pour les côtes artificialisées

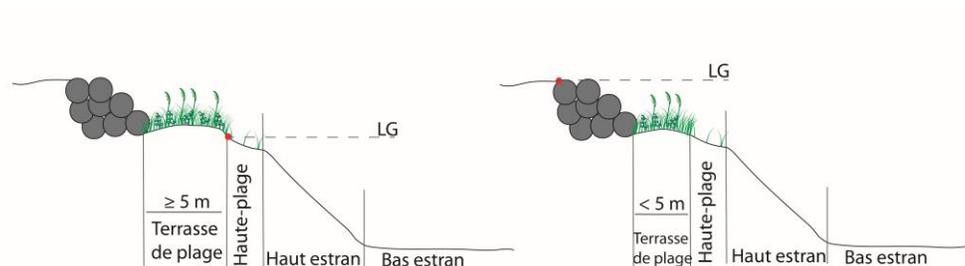


Figure 61. Méthode éco-géomorphologique pour les côtes artificialisées à terrasse de plage

3.4.2. Les côtes abritées

Les côtes abritées comptent les faces intérieures des flèches littorales et des tombolos ainsi que les marais maritimes situés derrière ces côtes d'accumulation granulaire. Il peut également y avoir des côtes artificialisées, présentant un ouvrage de protection. On se réfère alors directement à la méthode pour les côtes artificialisées exposées décrite dans la section précédente.

Côte d'accumulation granulaire abritée

Le premier élément à observer lorsque la côte correspond à la face intérieure d'une flèche littorale ou d'un tombolo est la présence ou l'absence d'un marais maritime abrité. Si la côte d'accumulation granulaire abrite un marais maritime, la face abritée peut présenter un profil végétalisé ou actif (figure 62).

Le profil sera considéré végétalisé si de la végétation dense et continue s'étend du marais maritime à la côte granulaire. La frontière entre le marais et la côte granulaire est alors recherchée. Davantage régit par les niveaux d'eaux, les étages de végétation répondent à un léger changement d'altitude. Ces zones végétalisées présentent une frontière distincte entre la végétation humide, fréquemment submergée, et la végétation côtière, intolérante à la submersion fréquente. Le critère sera alors la limite inférieure de la végétation côtière. Celle-ci est généralement composée d'herbacés tels que *Ammophila breviligulata* et *Leymus mollis ssp. mollis* ainsi que de *Lathyrus japonicus*.

Pour aider à identifier cette limite, il est pertinent d'observer d'abord la topographie de la zone, de localiser la rupture de pente entre le marais maritime, dont la pente est faible, et la côte d'accumulation, qui présente un profil plus arrondi. À partir du moment où le profil de la côte commence à s'élever, un substrat sableux, qui n'est pas saturé d'eau, peut alors être remarqué. La limite inférieure de la végétation côtière se situera à une altitude supérieure à la rupture de pente entre les deux systèmes. Les indicateurs sont plus subtils mais une LG a pu être déterminée de cette façon sur tous les profils intérieurs de flèches littorales et de tombolos étudiés. L'analyse comparative montre d'ailleurs que la LG et la LHEB concordent souvent du côté intérieur de ces côtes, appuyant l'utilisation de ces critères.

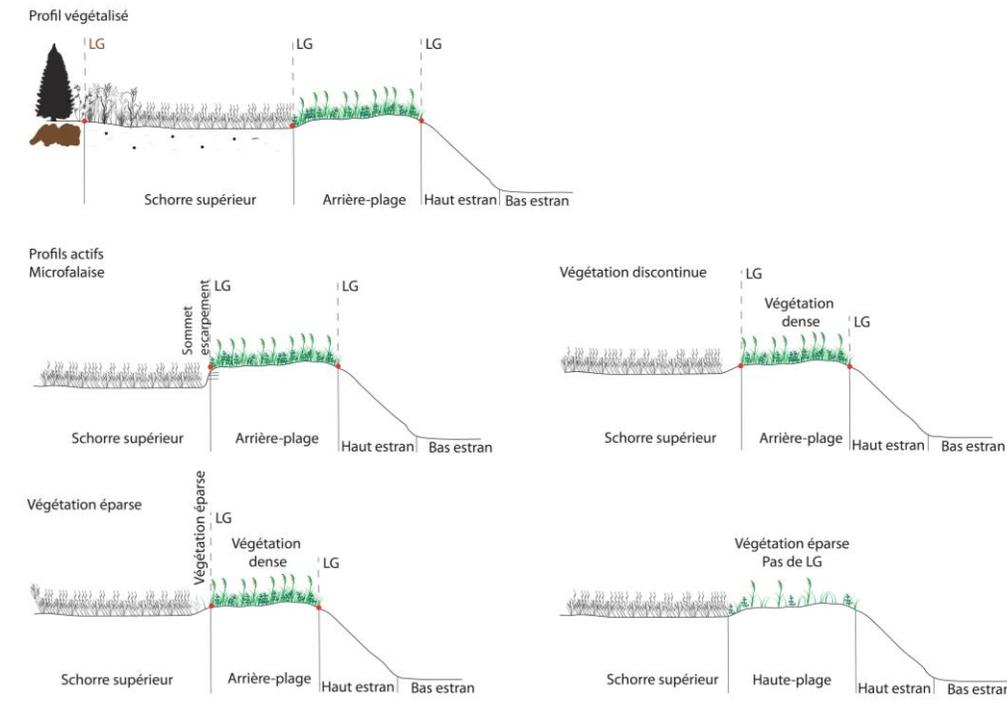


Figure 62. Méthode éco-géomorphologique pour les côtes d'accumulation granulaire abritées

Aux Îles-de-la-Madeleine, les indicateurs pour localiser une LG sur la face intérieure des tombolos ou des flèches littorales abritant un marais maritime sont similaires. Après avoir localisé la rupture de pente entre le marais maritime et la côte granulaire, il s'agit d'observer le changement de végétation. Il a été remarqué que la limite inférieure de la végétation côtière concordait avec la limite inférieure de *Ammophila breviligulata* et de *Morella pensylvanica* (myrique de Pennsylvanie) dans pratiquement tous les cas étudiés. Aussi, l'affleurement du substrat sableux, qui permet de déterminer le changement de système, est un indicateur privilégié étant donné la colonisation des côtes granulaires par *Ammophila breviligulata*. Cette espèce ne couvre pas de façon très dense le substrat sableux qui devient visible. Les profils types recensés lors de la campagne de terrain sont présentés à la figure 63.

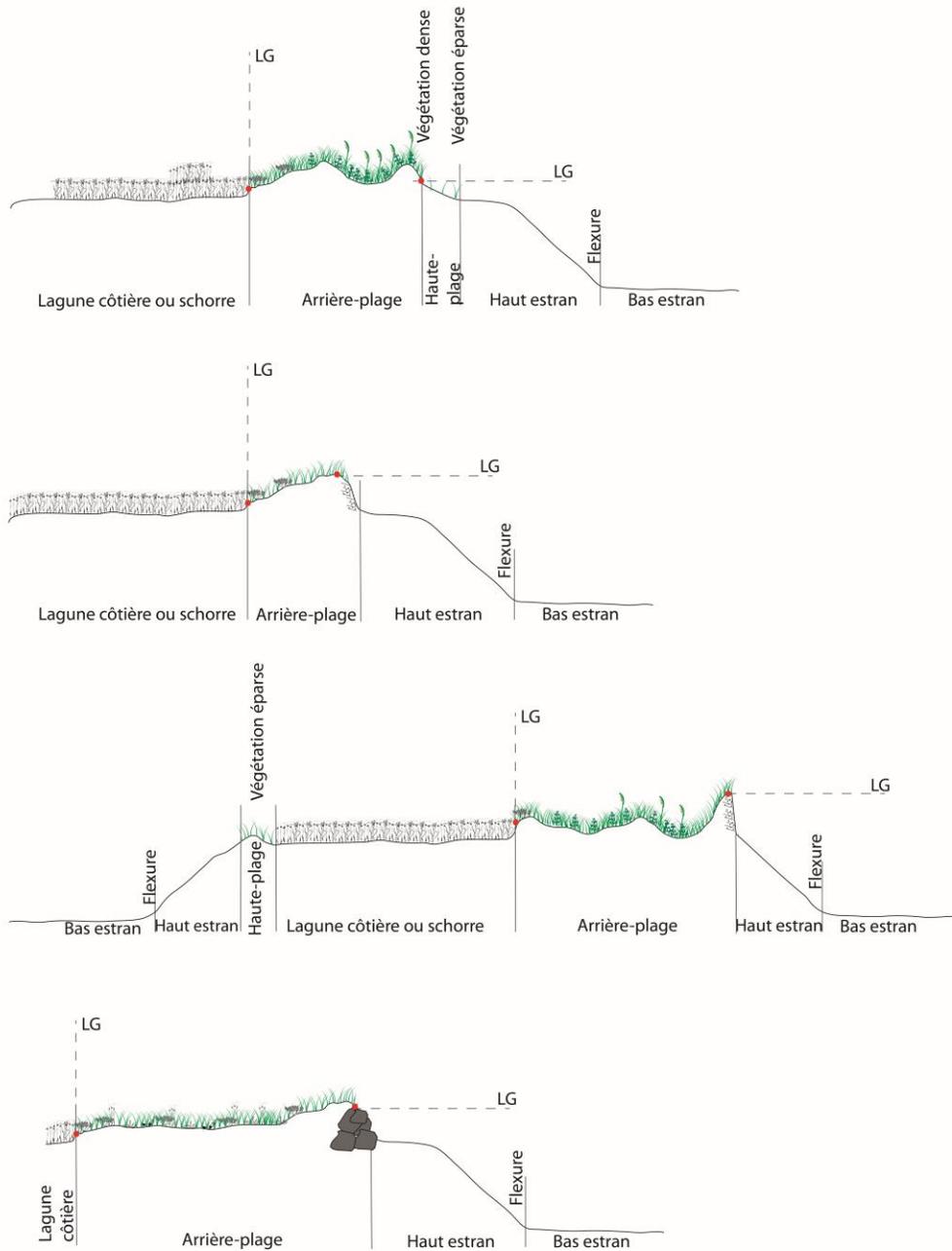


Figure 63. Méthode éco-géomorphologique pour les côtes d'accumulation granulaire abritées aux Îles-de-la-Madeleine

Le profil sera actif si la végétation n'est pas dense et continue entre le marais maritime et la côte granulaire (figure 62). Le haut estran de la face intérieure de la flèche ou du tombolo, souvent sableux, sera alors partiellement (présence de végétation éparse) ou totalement dénudé. La même méthode que pour les côtes d'accumulation granulaire exposées sera alors utilisée (voir section 3.4.1). La LG sera localisée au front de la végétation dense ou au sommet d'une microfalaise d'érosion bordant une arrière-plage, selon le cas présent sur la côte analysée. Si ni l'un, ni l'autre de ces deux critères n'est présent sur la portion de côte, la LG ne pourra pas être déterminée. S'il s'agit d'une côte naturelle, le régime de submersion à cet endroit est trop fréquent pour permettre l'établissement d'une arrière-plage (et donc d'une LG). La LG se trouve plus loin vers les terres, à l'endroit où l'un des critères éco-géomorphologiques peut être observé selon le type de côte. Si la côte est anthropisée au point que la végétation ne peut plus pousser, une méthode alternative devra être utilisée. Il en sera question dans la section 3.4.3.

Si la côte intérieure de la flèche ou du tombolo n'abrite pas de marais maritime, la méthode de détermination de la LG associée aux côtes d'accumulation granulaire exposées s'applique directement (figures 50 et 51).

Marais maritime abrité

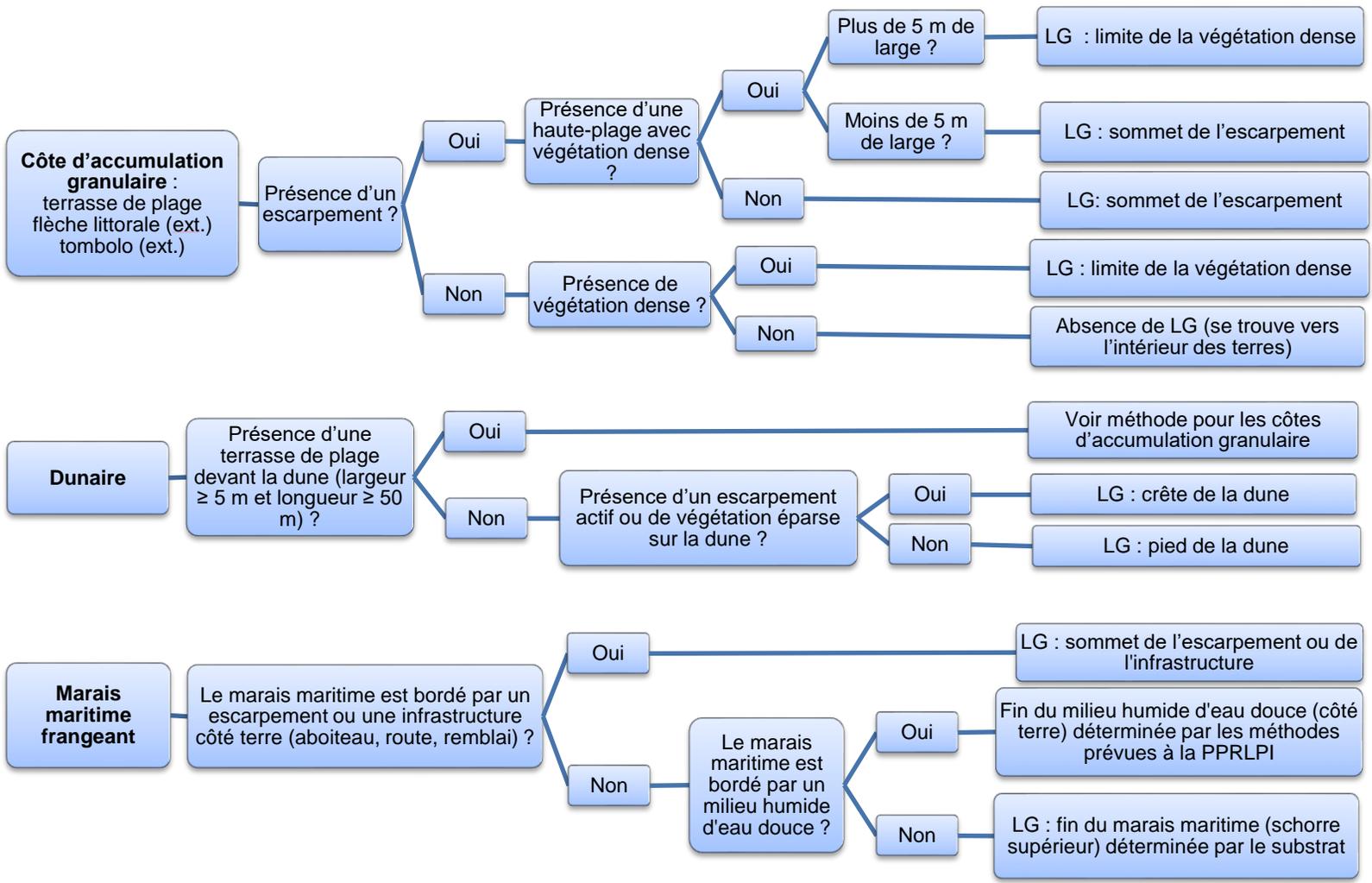
Lorsqu'un marais maritime est localisé derrière une flèche littorale ou un tombolo, deux limites devront être identifiées : une au fond du marais, c'est-à-dire à la limite supérieure du schorre supérieur, et une à la frontière avec la côte d'accumulation granulaire abritée. Afin de définir le critère à utiliser pour placer la LG, il faudra d'abord observer le système dans son ensemble et déterminer si on se trouve au fond du marais, contigu au milieu typiquement terrestre, ou si on se trouve à la frontière entre le marais et une flèche ou un tombolo.

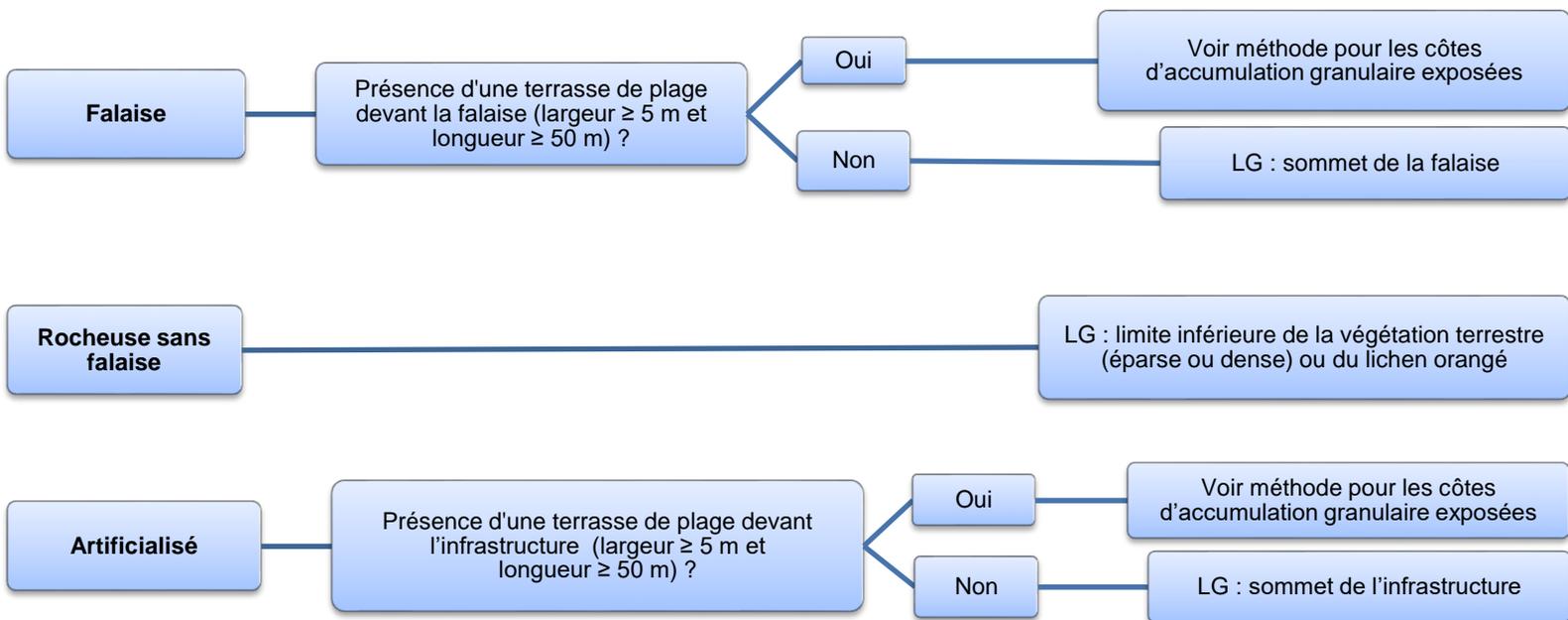
La méthode utilisée pour déterminer une LG au fond d'un marais maritime abrité est la même que pour les marais maritimes frangeants (côtes exposées ; figure 55). S'il y a présence d'un escarpement (falaise) ou d'un ouvrage de protection (aboiteau, route, remblai) à la limite supérieure du schorre supérieur, la LG est située au sommet de l'escarpement ou de l'infrastructure. Si le passage entre le littoral et la rive se fait sans démarcation géomorphologique apparente, la fin du milieu humide côtier devra être déterminée (voir section 3.4.1).

Si le marais maritime est adossé à la face intérieure d'une flèche littorale ou d'un tombolo, c'est la frontière entre le marais et la côte d'accumulation granulaire qui sera recherchée. La méthode est décrite ci-haut, dans la section sur les côtes d'accumulation granulaire abritées (figures 62 et 63).

3.4.3. Organigramme d'aide à la décision

Un organigramme d'aide à la décision a été élaboré afin de mener l'intervenant à déterminer, étape par étape, une LG en milieu côtier pour le domaine maritime (figure 64). Cet organigramme reprend l'ensemble des types de côtes ainsi que les critères éco-géomorphologiques déterminants pouvant être observés. Une liste de cas spécifiques, dont la méthode éco-géomorphologique proposée ne permet pas de déterminer une limite, sera dressée à la suite des organigrammes.





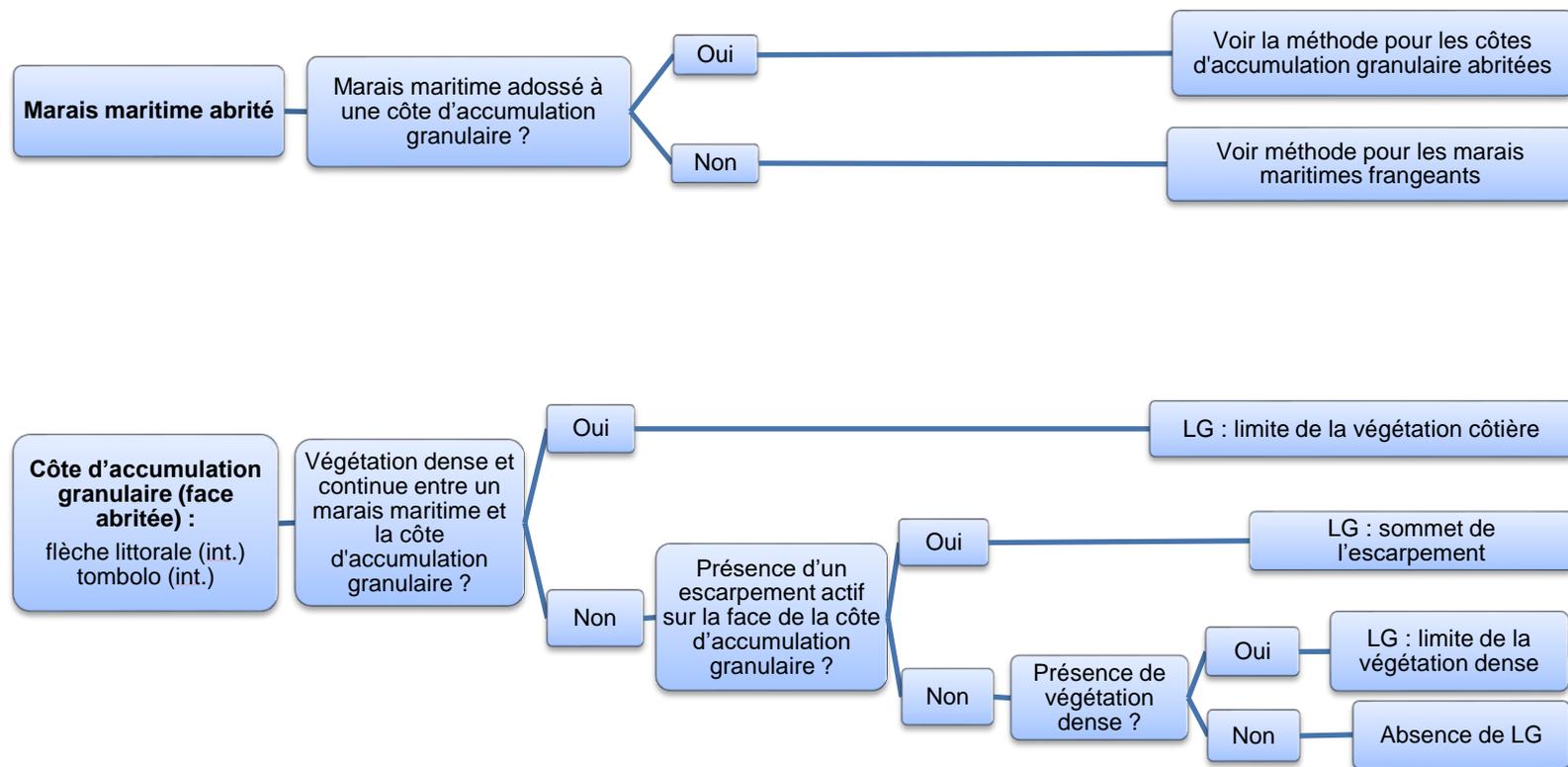


Figure 64. Organigramme d'aide à la décision pour définir la LG selon les types de côtes et les critères éco-géomorphologiques définis par le LDGIZC

Dans certains cas exceptionnels, la méthode éco-géomorphologique telle que proposée demande quelques spécifications supplémentaires ou n'est pas applicable. Ces cas sont présentés dans les paragraphes suivants. Les étapes à suivre pour chacun de ces cas seront clairement énumérées dans le guide de détermination de la limite géomorphologique rédigé dans le cadre du présent projet.

Embouchure et estuaire de rivière

L'estuaire et le golfe du Saint-Laurent font partie d'un grand bassin versant dans lequel se jettent plusieurs rivières. La rencontre entre ces systèmes fluviaux et le domaine maritime forme des zones de transition où l'eau douce et l'eau salée se rencontrent, où les marées font place à l'eau vive. Alors que la méthode éco-géomorphologique est adaptée au domaine maritime, les méthodes prévues à la PPRLPI (botanique, niveau de récurrence 2 ans, etc.) s'appliquent aux écosystèmes fluviaux. Il importe donc de définir la portée de l'application de chaque méthode dans ces milieux de transition. Deux patrons sont observés quant à ces systèmes : 1) les embouchures de rivières où le chenal principal s'élargit et se jette directement dans la mer ; et 2) les estuaires caractérisés par plusieurs chenaux et colonisés par un marais maritime.

Dans les cas où le chenal principal de la rivière se jette directement dans la mer, celui-ci coupe la côte. Alors qu'un critère éco-géomorphologique se dessinait parallèle à la côte, celui-ci marque un virage à la rencontre de l'embouchure de la rivière et son tracé devient parallèle au chenal. Le haut estran présente une configuration similaire. Le long de la côte, le haut estran constitue une frange parallèle au littoral. À l'embouchure du cours d'eau, le haut estran, tronqué, marque une courbe s'engouffrant de façon parallèle au chenal de la rivière. L'application de la méthode éco-géomorphologique s'arrête à partir de l'endroit où le haut estran rétrécit et s'estompe (figure 65). S'il n'y a pas de haut estran, la méthode s'applique jusqu'à la rupture, par le chenal de la rivière, du critère éco-géomorphologique qui suit un tracé parallèle à la côte. Pour certains secteurs, les embouchures de rivières forment un entonnoir depuis la mer vers le chenal fluvial et le tracé d'une LG de part et d'autre est moins linéaire le long de la côte ; la rupture est alors moins claire. Le haut du goulot de l'entonnoir, où la largeur du chenal rétrécit, est un indicateur supplémentaire pour déterminer la limite de la zone où la méthode éco-géomorphologique s'applique. Un pont est souvent construit à la hauteur de ce goulot. Une telle infrastructure constituerait la limite supérieure d'applicabilité de la méthode.

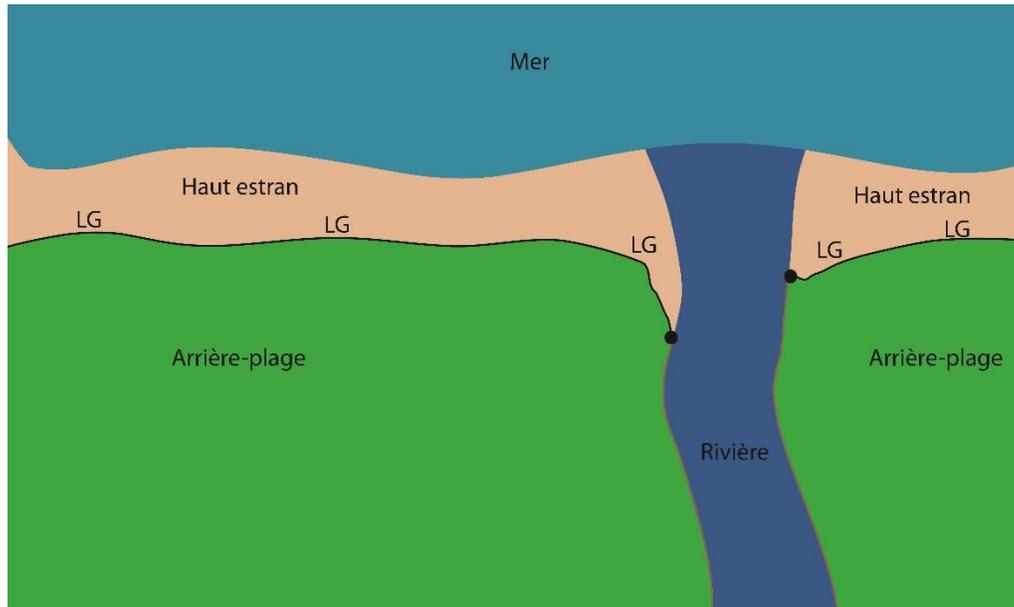


Figure 65. Application de la méthode éco-géomorphologique à l'embouchure des rivières. Le trait noir marque la LG parallèle à la côte alors que les points noirs marquent la fin de l'application de la méthode pour le domaine maritime.

Les estuaires caractérisés par de multiples chenaux et la présence de marais maritimes sont des milieux plus complexes. La frontière supérieure de ces écosystèmes à l'échelle de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent sera d'ailleurs tracée dans le cadre d'un autre projet chapeauté par le LDGIZC. Celle-ci pourra servir de référence pour délimiter la zone d'application de la méthode éco-géomorphologique pour le domaine maritime. Sinon, en présence d'un marais maritime, la LG sera déterminée à partir de la méthode éco-géomorphologique. Dans les zones transitoires où le milieu d'eau douce fluvial et le marais maritime sont contigus, les méthodes prévues à la PPRLPI pour les milieux fluviaux peuvent directement être appliquées (méthode botanique, niveau de récurrence des crues 0-2 ans de la rivière, etc.).

Versants continentaux

Parmi les cas devant être spécifiés, notons d'abord les versants continentaux, tels que présentés dans la section 3.2.2. Ceux-ci sont principalement observés sur la côte nord de la Gaspésie ainsi que sur la Côte-Nord. Comparativement aux falaises côtières, ce type de système a une origine principalement du contexte géologique structural et n'a pas été formé par les agents côtiers actuels ; il ne réagit pas directement aux agents hydrodynamiques côtiers. Qui plus est, ces versants sont très élevés et délimiter un sommet serait très laborieux, en l'absence de données LiDAR. Des écosystèmes forestiers occupent

généralement la face exposée à la mer. Nous proposons donc de positionner la LG à la limite inférieure de la végétation terrestre, quelle qu'elle soit.

Côte à falaise artificialisée

Les cas de falaises côtières artificialisées (ex. enrochement à la base) amènent une certaine confusion quant au type de côte auquel se référer pour déterminer une LG. Tel que les critères éco-géomorphologiques sont définis dans la méthode, une infrastructure adossée à une falaise impliquerait d'utiliser la méthode pour les côtes artificialisées (LG au sommet de l'infrastructure). Les situations où l'infrastructure couvre la totalité de la face abrupte de la falaise ne posent pas de problème particulier : le sommet de l'infrastructure concorde avec le sommet de l'escarpement. Pour éviter toute confusion, il est pertinent de préciser d'utiliser le sommet de l'infrastructure pour localiser une LG dans ces cas (figure 66A). Or, il convient de spécifier la méthode pour les cas où une infrastructure est implantée au bas d'une falaise et qu'une partie de sa face abrupte est exposée (figure 66B). Un LG localisée au sommet de l'infrastructure serait alors plus basse et plus rapprochée de la mer que si la falaise n'avait pas été stabilisée. Lorsqu'un ouvrage de protection est présent à la base d'une falaise et qu'une partie de sa face reste exposée, la méthode utilisée pour déterminer la LG est celle des côtes à falaise (sommet de l'escarpement ou front de la terrasse de plage si les conditions sont remplies).

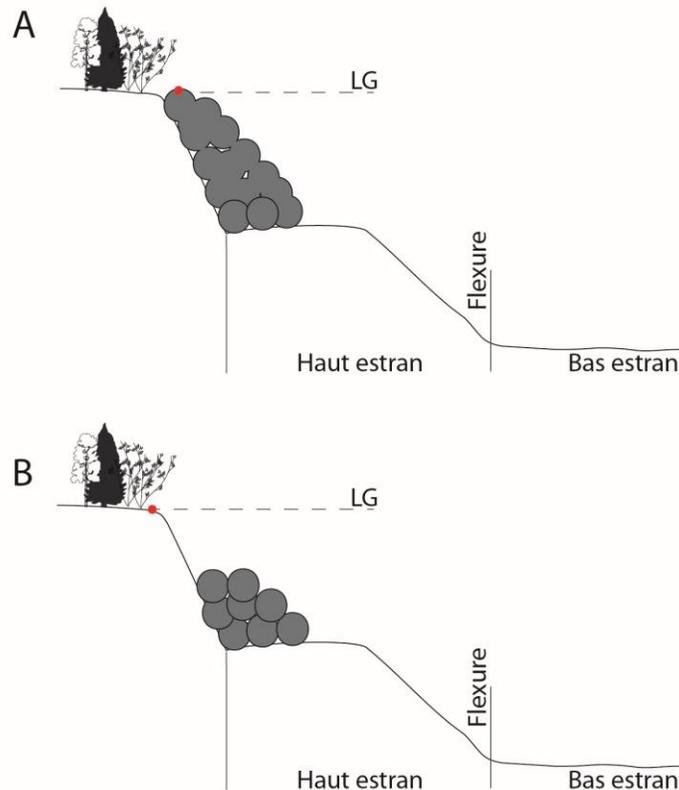


Figure 66. Localisation de la LG sur les côtes à falaise artificialisées

Ouvrage de protection trop bas

Durant les ateliers, le cas particulier de l'île d'Orléans a été soulevé. Les côtes situées à proximité de la voie navigable subissent les impacts du batillage généré par les bateaux, qui peuvent s'ajouter au niveau de surcote et de vagues formées par le vent. Ces vagues peuvent surpasser les ouvrages de protection même si leur altitude serait normalement assez élevée. Dans la littérature portant sur le Saint-Laurent, il est bien établi que le batillage des navires a un impact sur l'érosion des côtes et que celui-ci est lié notamment à la distance entre la rive et la voie navigable (Brebner, 1967 ; D'agnolo, 1978 ; Dauphin, 2000 ; Donnelly, 1968 ; Garde côtière canadienne, ND). Sur des côtes non artificialisées, l'impact de ces vagues sur la côte pourra être observable par la formation d'une microfalaise d'érosion, au sommet de laquelle la LG sera positionnée. Pour les côtes artificialisées, il sera plutôt question de submersion, dont les indicateurs peuvent être plus discrets. Nos observations montrent que dans l'estuaire moyen, où la morphologie des côtes est davantage régie par les niveaux d'eau que par les vagues, le niveau de récurrence 2 ans est plus

rarement dépassé. Bien que cette cote mérite d'être actualisée sur la base de données marégraphiques plus récentes et d'y ajouter l'effet des vagues à la côte (modélisation), il est proposé d'utiliser le niveau de récurrence 2 ans et d'y ajouter une élévation fixe en prévision des niveaux atteints par le battillage. Une étude approfondie serait de mise afin d'évaluer cette élévation additionnelle.

Les descentes de bateau constituent également des infrastructures rigides en milieu côtier. Ces installations sont souvent construites au niveau du sol, à de basses élévations, couvrant la végétation côtière. Dans le cadre de l'application d'une méthode éco-géomorphologique, ces infrastructures ne devraient pas être considérées dans la localisation d'une LG. Si des critères éco-géomorphologiques tels que décrits dans la typologie (section 3.2.1.) sont présents derrière l'infrastructure (vers les terres), ceux-ci pourront servir à positionner la LG. Si ceux-ci sont absents, il est nécessaire de se référer aux côtes de part et d'autre de la descente et de déterminer l'altitude de la LG pour celles-ci. Cette altitude pourra être rapportée au-delà de la descente de bateau.

Milieus anthropisés

Lors des ateliers 2, les terrains privés côtiers anthropisés sont ressorti comme étant problématiques quant à l'application de la méthode éco-géomorphologique. Cette problématique est liée à la présence de remblai, mis en place en accord avec le processus légal, et de pelouse tondue. Il importe de spécifier la démarche à suivre dans de telles situations. À moins que le remblai ait été récemment mis en place, sa forme est considérée en équilibre par rapport à la dynamique côtière locale. En ce sens, si une microfalaise se développe au front du remblai, celle-ci témoigne des hauts niveaux d'eau atteints par la mer. Le sommet de l'escarpement d'érosion peut être utilisé comme critère pour localiser la LG.

Dans le cas d'un remblai végétalisé, le front de la végétation dense pourra être utilisé, même s'il s'agit de pelouse. À la manière de la végétation colonisant l'arrière-plage, la végétation dense présente sur les terrains privés répond à la dynamique côtière locale et à la fréquence de la submersion marine. Néanmoins, il demeure pertinent d'observer la présence de certains indicateurs géomorphologiques pouvant témoigner de la submersion marine. La présence de laisses de marée ou de dépôt sédimentaire (dépôt sableux ou graveleux sur le terrain) pourra indiquer le niveau atteint par les plus hautes eaux. Il reste difficile de déterminer l'événement à l'origine de ces indicateurs et s'il s'agit d'une tempête exceptionnelle dont le niveau d'eau serait au-delà d'une limite d'inondation normale conforme aux objectifs derrière la ligne des hautes eaux de la PPRLPI.

Si une côte naturelle avoisine la côte remblayée et s'apparente au même type de côte, le report de l'altitude de la LG déterminée à partir du milieu naturel devrait être priorisé. Des segments de 50 m de part et d'autre de la zone étudiée peuvent être utilisés pour déterminer l'altitude d'une LG (moyenne des points d'altitude pris aux 0,50 m). Si l'élévation du critère déterminé sur le secteur

anthropisé est supérieure à la moyenne des altitudes mesurées sur les côtes naturelles adjacentes, ce sera le critère à utiliser pour déterminer la LG. Dans le cas contraire, la moyenne déterminée sur les côtes adjacentes pourra être reportée derrière la côte anthropisée à l'aide d'un DGPS pour y établir la LG.

Aux Îles-de-la-Madeleine, le piétinement et le passage de véhicules tout-terrain (VTT) sur les plages engendrent des brèches dans la végétation côtière, formant des îlots de végétation (figure 67). Comme on peut le voir sur la photo suivante, les brèches formées peuvent être de largeur variable et les îlots peuvent être très isolés ou bien rapprochés les uns des autres. Il serait laborieux de tracer une LG en suivant le front de ces îlots et les frontières des brèches. Bien que la zone contenant ces îlots puisse être d'une largeur appréciable et supérieure au seuil de 5 m de largeur, il est recommandé d'utiliser le pied de la dune se trouvant derrière comme critère pour localiser la LG. C'est le genre de situation où une méthode alternative, utilisant un niveau de récurrence cohérent avec la dynamique côtière, serait pertinente, et tout particulièrement aux Îles-de-la-Madeleine où aucune cote n'est disponible.



Figure 67. Îlots de végétation côtière devant les dunes aux Îles-des-la-Madeleine

Cas où la méthode éco-géomorphologique ne s'applique pas

Les conditions en période hivernale ne permettent pas l'établissement d'une LG, bien que la période soit rallongée par rapport à l'application de la méthode botanique experte. À défaut d'une méthode alternative fournissant une cote altitudinale de référence, il est proposé de définir une imagerie de référence pour chaque portion de côte de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent (ex. mosaïques

de 2015 pour le Bas-Saint-Laurent) sur laquelle une LG approximative et temporaire pourrait être tracée en photo-interprétation selon le type de côte et les critères définis dans la typologie. Il est recommandé que le tracé soit fait à une résolution de 1:300 dans un système d'information géographique. La LG ainsi tracée devrait être validée sur le terrain au printemps ou à l'été suivant.

Pour certaines portions de côtes, la méthode éco-géomorphologique ne peut être appliquée, simplement car les critères visuels requis ne sont pas présents. Une méthode alternative référant à un niveau altitudinal défini par secteur, cohérent avec la dynamique côtière et révisé périodiquement, reste nécessaire. Bien que cette alternative nécessite l'utilisation d'outils de précision tel qu'un DGPS, et donc souvent les services d'un arpenteur-géomètre, elle reste une référence pertinente dans certains cas problématiques. Une cote peut servir de référence pour les cas énumérés ci-haut ; elle est également essentielle pour des milieux très anthropisés, où la végétation n'est pas en mesure de pousser.

3.5. Retour sur les ateliers 2

Un second atelier a été tenu afin de répondre à l'objectif 4. Comme pour le premier atelier, les cinq ateliers se sont tenus dans chacune des régions touchées par le projet : Baie-Comeau (Côte-Nord), Québec (Chaudières-Appalaches et Capitale-Nationale-Charlevoix), Rimouski (Bas-Saint-Laurent), Gaspé (Gaspésie) et Îles-de-la-Madeleine. Ces ateliers ont permis de rejoindre les différents intervenants qui utilisent ou qui doivent déterminer la LHE sur les littoraux du Québec maritime. Ces rencontres ont donc rassemblé des arpenteurs-géomètres, des employés des municipalités et des MRC (directeurs généraux, aménagistes, urbanistes et inspecteurs), ainsi que des professionnels de certains comités ZIP et de différents ministères provinciaux concernés (MTMDET, MDDELCC et MSP). L'ensemble des résultats du projet ont été présentés aux différents intervenants qui utilisent ou qui doivent déterminer la LHE sur les littoraux du Québec maritime. Ces résultats concernaient :

- la typologie des critères éco-géomorphologiques ;
- la description des cas géomorphologiques types ;
- les grandes lignes de l'analyse comparative entre la méthode botanique experte et la méthode éco-géomorphologique proposée par le LDGIZC ;
- la proposition de la méthode éco-géomorphologique telle que proposée par le LDGIZC ;
- l'intégration des vagues dans la méthode hydrologique actuelle ;
- l'évaluation des corrélations entre les variables morphodynamiques.

Les échanges ayant suivi la présentation des résultats étaient orientés sur quatre thématiques : l'applicabilité de la méthode éco-géomorphologique sur le

terrain, les cas particuliers qui ne sont pas décrits dans la méthode proposée, la préférence quant à l'utilisation d'une méthode et les besoins en ce qui a trait au contenu d'un guide permettant d'appliquer la méthode éco-géomorphologique. Les paragraphes qui suivent présentent un compte-rendu de ces échanges. Le tableau 27 recense les avantages et les inconvénients relatifs à la méthode éco-géomorphologique énoncés lors des ateliers.

Tableau 27. Avantages et inconvénients de la méthode éco-géomorphologique énoncés lors des ateliers 2

Avantages	Inconvénients
Pas besoin d'instruments de précision (DGPS) dispendieux pour identifier une LG	Subjectivité reste, notamment quant au seuil de densité de végétation (75%)
Facile d'application ; critères « instinctifs »	LG mobile dans le temps
Laisse moins de place à la subjectivité	Certains ouvrages de protection se trouvent sous la LHE ou la LG (une approche a été proposée dans la méthode éco-géomorphologique à la suite des ateliers 2)
Plus facile à appliquer en-dehors de la période de floraison	Non applicable l'hiver
Plus d'intervenants peuvent l'appliquer sur le terrain puisque l'expertise nécessaire à l'application de la méthode éco-géomorphologique est moindre que pour la méthode botanique	Non applicable sur certains terrains anthropisés : pas de végétation, remblai, gazon tondu (une approche a été proposée dans la méthode éco-géomorphologique à la suite des ateliers 2)
Cohérente avec les séries temporelles de niveaux d'eau et de vagues	Levé laborieux quand la LG est déterminée sur de grandes distances (vs une cote)
	Altitude trop basse dans certains cas, principalement pour les flèches littorales
	Une nouvelle limite implique un processus d'apprentissage pour les citoyens

Aux Îles-de-la-Madeleine, les intervenants présents à l'atelier 2 ont affirmé que la méthode éco-géomorphologique était plus simple à appliquer sur le terrain et plus cohérente, à leur avis, que la méthode botanique experte. Néanmoins, les participants ont relevé certains éléments particuliers par rapport à ce territoire et à l'application de la méthode proposée par le LDGIZC. D'abord, le critère de végétation dense est moins applicable aux Îles-de-la-Madeleine, où *Ammophila breviligulata* est très présente dans la zone côtière. Cette espèce de plante ne couvre pas le substrat sableux comme les autres espèces côtières. Bien qu'elle

pourrait être considérée comme dense, elle ne couvrirait pas 75% du substrat. Les représentants de l'organisme Attention Fragiles considèrent satisfaisant une densité de 18 plants/m² dans les travaux de revégétalisation des dunes et proposaient d'utiliser le même ratio pour déterminer la densité de cette espèce. Qui plus est, la position d'une LG déterminée dans les milieux colonisés par *Ammophila breviligulata* sera variable à l'échelle de quelques semaines : cette espèce se trouve enfouie dans le sable au printemps alors que quelques semaines plus tard, sa couverture apparente est plus vaste. Pour un même site, une LG déterminée au printemps sera plus conservatrice et derrière une LG déterminée à l'été. Le piétinement et le passage de véhicules tout-terrain (VTT) sur les plages engendrent des brèches dans la végétation côtière, formant des îlots de végétation. Il a été demandé de spécifier la méthode à suivre dans ces cas-là (voir section 3.4.3.). Finalement, une méthode alternative reste essentielle pour déterminer une limite l'hiver ou dans les secteurs anthropisés où il n'y a aucun indicateur botanique ou géomorphologique (ex. La Grave). Alors qu'aucun niveau de récurrence n'est déterminé aux Îles-de-la-Madeleine, il serait pertinent de fournir un niveau de référence valide quant à la portée des hautes eaux.

Le but derrière la modification de la méthode de détermination de la ligne des hautes eaux en milieu côtier est notamment de simplifier et d'uniformiser son utilisation par les différents intervenants. Il a été mentionné que la multitude de lignes utilisée en aménagement et en gestion des zones côtières complique le travail des acteurs, notamment au niveau local (villes, municipalités, MRC), qui doivent englober dans l'application des lois et règlements l'ensemble de ces lignes. Il a été demandé de bien distinguer la LHE de la PPRLPI des autres lignes notamment par la nomenclature, voire d'en arriver à définir une seule ligne commune et de plutôt ajuster le zonage, les règles d'aménagement et les interventions derrière cette ligne en fonction des objectifs visés.

Le cadre normatif du MSP a d'ailleurs été abordé dans tous les ateliers. Selon certains intervenants, la LG ressemble à la ligne de côte utilisée dans le cadre normatif et la même ligne pourrait être utilisée. Dans l'optique où le cadre normatif serait obligatoire et appliqué sur l'ensemble du territoire, seule la permission pour les bâtiments accessoires serait applicable en lien avec la LHE de la PPRLPI. Le cadre normatif était considéré plus restrictif pour la construction en bord de mer.

Lors des ateliers, nous avons remarqué que les impacts perçus en lien avec le positionnement d'une LHE varient en fonction des organismes qui l'utilisent et des objectifs qu'ils visent dans son application : aménagement, construction, sécurité civile ou interventions pour protéger les infrastructures (ex. réseau routier). En ce sens, les acteurs œuvrant au niveau municipal et à la sécurité civile privilégient une limite plus éloignée de la mer que possible pour limiter les interventions ainsi que la vulnérabilité des citoyens et du cadre bâti. Au niveau des organisations intervenant dans la zone côtière, notamment pour ériger des ouvrages de protection le long des routes, une limite éloignée de la mer implique davantage de compensation, dont une partie n'aurait possiblement pas besoin d'être compensée, en lien avec la réglementation fédérale relative à l'habitat du

poisson. La LHE sépare effectivement deux types d'écosystème : marin et terrestre. C'est en ce sens que notre démarche vise à être cohérente par rapport à l'intention derrière la définition de la LHE, c'est-à-dire une limite séparant la rive du littoral, pouvant être surpassée par la mer à l'occasion (aux deux ans environ).

La mobilité de la LHE a beaucoup été abordée durant les ateliers, laquelle n'est pas résolue avec la méthode éco-géomorphologique, selon plusieurs intervenants. L'année de la détermination d'une LHE en milieu côtier va faire varier la localisation de la zone où il est possible d'intervenir derrière cette ligne. Si la ligne est déterminée une année durant laquelle un système est en progradation, celle-ci pourra se trouver davantage vers la mer. Une année durant laquelle une tempête a eu lieu et a fait reculer le front de végétation dense ou un escarpement, la zone pouvant accueillir des interventions sera plus loin vers les terres. Il a été souligné qu'un promoteur ou un citoyen peut attendre que la position de la ligne soit à son avantage (vers la mer) pour faire appel à un arpenteur qui viendra fixer cette ligne et maximisera la superficie d'intervention derrière la LHE.

Le besoin d'une méthode alternative à la méthode éco-géomorphologique pour certaines situations a été soulevé à tous les ateliers. Une cote altitudinale reste privilégiée dans certains cas, notamment par les arpenteurs-géomètres. La localisation d'une LG durant l'hiver ou sur des terrains anthropisés n'ayant pas les critères énoncés nécessite une autre méthode. Qui plus est, une cote permet de valider la position du critère éco-géomorphologique déterminé (le critère doit être à une altitude plus élevée que cette cote). Il a été mentionné à quelques reprises que l'accès (gratuit) à un fichier de forme contenant une limite tracée à l'échelle du Québec maritime élimine toute ambiguïté quant à la détermination d'une LHE. Une telle ligne devrait être obligatoire, sans modification possible à l'échelle de la gouvernance locale. Cette limite devrait être révisée périodiquement afin d'assurer sa conformité.

Les cas particuliers relevés où la méthode éco-géomorphologique présentée ne semble pas être applicable ou adéquate sont les suivants :

- Milieux anthropisés : pas de végétation ou de microfalaise d'érosion, présence de remblai et de gazon tondu, descente de bateau ;
- Ouvrages de protection trop bas, notamment sur l'île d'Orléans où les vagues créées par les bateaux s'ajoutent au niveau d'eau et aux vagues ;
- Versants continentaux, comme en Gaspésie, où il n'y a pas de face abrupte comme c'est le cas pour les falaises ;
- Estuaire des rivières (jusqu'à où la méthode éco-géomorphologique s'applique et quand la méthode botanique redevient privilégiée).

Ces cas, ainsi que quelques autres, ont été abordés dans la section 3.4.3.

Les commentaires relatifs à une méthode hydrologique adaptée au milieu côtier réfèrent aux problématiques liées à la modélisation. Les résultats obtenus par

des modèles ne sont pas toujours cohérents avec la morphologie du terrain. Il a été mentionné que l'orientation du vent, la bathymétrie de l'avant-côte et la morphologie de la zone côtière feront varier l'atteinte des vagues à la côte. Dans la mesure où une cote devait être déterminée pour un secteur donné, plusieurs cas dans un certain périmètre devraient être pris en compte. Il serait aussi important, selon les intervenants, d'inclure les vagues et les surcotes en plus des données marégraphiques. Finalement, il a été souligné que bien qu'une cote soit facile d'utilisation, les services d'un arpenteur-géomètre sont souvent nécessaires pour la localiser (DGPS), ce qui restreint le nombre d'intervenants pouvant identifier la LHE.

Des propositions quant à l'application de la méthode éco-géomorphologique et de la PPRLPI dans son ensemble ont été formulées. Ces propositions sont les suivantes :

- Utiliser un autre terme que « ligne des hautes eaux » pour éviter la confusion ;
- Formation offerte aux professionnels travaillant avec la LHE (inspecteurs, biologistes, géographes, aménagistes, arpenteurs-géomètres, ingénieur, etc.) par le MDDELCC relative à l'identification des types de côtes et des critères éco-géomorphologiques, en incluant des ateliers pratiques sur le terrain. Cette formation serait obligatoire pour identifier la LHE de façon « officielle » ;
- Spécifier les connaissances, les compétences et les outils qu'un professionnel doit avoir pour pouvoir déterminer une LG ;
- Spécifier les spécialistes de référence en cas de besoin, de problématique ou de litige (soit le MDDELCC);
- Rendre les données accessibles pour tous. Lorsqu'une LG ou une LHE est déterminée pour un site, cette information pourrait être colligée sur une plate-forme web et rendue disponible pour tous afin d'uniformiser le positionnement de ces limites ;
- Revoir la largeur de la bande riveraine telle que prévue dans la PPRLPI pour le milieu côtier afin qu'elle soit cohérente avec la dynamique des systèmes côtiers ;
- Interdire tout nouvel aménagement ou construction sur les flèches littorales ;
- Organiser une tournée rassemblant des arpenteurs-géomètres ainsi que des professionnels des ministères et du LDGIZC (partage du territoire selon la connaissance des professionnels) afin de (1) localiser une LG de façon systématique (aux 2 km, par exemple) à l'échelle du Québec maritime en privilégiant les côtes basses, (2) déterminer une cote (puisque la LG est corrélée à la hauteur des plus hautes vagues dans l'analyse des séries temporelles) et (3) la diffuser ou relever les critères éco-géomorphologiques.

Finalement, plusieurs éléments ont été mentionnés quant à l'élaboration d'un guide d'application de la méthode éco-géomorphologique. Globalement, les participants aux ateliers ont demandé qu'il y ait beaucoup d'images, de photos et d'exemples concrets relatifs à tous les cas géomorphologiques et à la clé d'aide à la décision ainsi qu'aux plantes côtières typiques. Le besoin relatif à un guide simplifié, avec des onglets, de format terrain, rigide et durable a également été noté. Le développement d'une application mobile a également été proposé. La gratuité de ces outils a semblé primordiale.

3.6. Évaluer la concordance entre les méthodes hydrologique, éco-géomorphologique, hydrologique actuelle (0-2 ans) et hydrologique dynamique

3.6.1. Méthodologie

Des mesures *in situ* ont été réalisées afin d'évaluer si les niveaux de récurrence 2 ans (méthode hydrologique actuelle) telles que calculées par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ ; réfère maintenant à la Direction de l'expertise hydrique du MDDELCC), ou par interpolation sur des points de calculs du CEHQ, sont représentatifs des conditions météo-marines locales le long du Saint-Laurent (objectif 3 du projet). Bien que divers modèles existent présentement au Québec (i.e. WW3, opéré par l'ISMER-UQAR et Environnement Canada ; WAM, opéré par le ministère des Pêches et Océans (MPO) ; modèle de surcote opéré par (MPO) pour calculer les conditions de vagues et/ou niveaux d'eau au large, aucun modèle actuellement opérationnel ne permet d'obtenir les paramètres de vagues et niveaux d'eau près de la côte (suite au déferlement). Les mesures réalisées sur le terrain comblent donc cette lacune qui, autrement, ne serait résolue qu'avec des modèles complexes de morphodynamique littorale. Des projets de validation de modèles numériques (hydrostatique et non-hydrostatique) sont actuellement en cours au LDGIZC pour différents secteurs d'études, mais sortent du cadre d'implantation de ce projet portant sur l'identification de la LHE pour le domaine maritime.

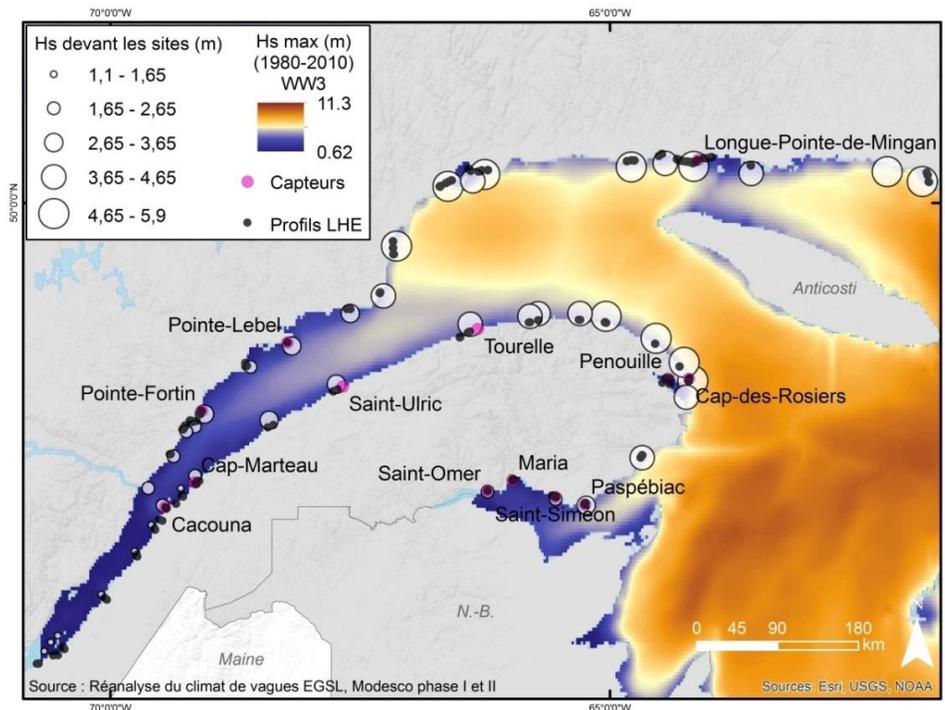


Figure 68. Localisation des capteurs de pression pour la mesure des vagues, des profils topographiques (mis à part les Îles-de-la-Madeleine) et des points de modélisations des vagues au large issus du modèle WW3 (représentation des vagues significatives maximales H_s max (m) sur la période 1980-2010; Bernatchez et al., 2017)

Pour l'ensemble des sites étudiés comportant des capteurs de pression pour la mesure des vagues et niveaux d'eau à la côte, une évaluation de la position verticale du niveau de récurrence 2 ans tel que calculé par le CEHQ, de la LHEB suivant la méthode de la PRLPI et de la LG telle qu'identifiée par le LDGIZC versus les niveaux d'eau observés localement a été réalisée. Au total, 12 capteurs de pression pour la mesure de niveau d'eau et de vagues (figure 68) couvrent une durée de 3 à 6 mois d'observation pendant la période estivale de 2016. Ils sont répartis à raison d'un seul capteur par site, sur les littoraux de Cap-Marteau, Cacouna, Cap-des-Rosiers, Saint-Anne-des-Monts, Saint-Ulric, Saint-Omer, Saint-Siméon, Paspébiac, Penouille, Rivière-Pentecôte et Pointe-à-Fortin (tableau 28). Le capteur situé à Chandler a été détruit par une tempête. Sur trois autres sites, Pointe-Lebel, Longue-Pointe-de-Mingan et Maria, les séries temporelles sont plus longues puisque les instruments implantés font partie d'un réseau de suivi de la morphodynamique littorale ayant débuté en octobre 2015. Sur ces plages, plusieurs capteurs sur un ou plusieurs profils perpendiculaires à la côte formaient un réseau d'échantillonnage des conditions hydrodynamiques, mais seul un capteur localisé dans la zone intertidale de ces sites a été sélectionné pour les analyses de ce projet.

Tableau 28. Déploiement des capteurs sur les sites suivis dans le cadre du projet sur la ligne des hautes eaux

Position	Été 2016		Automne 2016		Hiver 2016	
	Déploiement	Retrait	Déploiement	Retrait	Déploiement	Retrait
Cap-Marteau	16-06-04	16-08-04	16-08-04	16-11-18		
Cacouna	16-06-05	16-08-22	16-08-22	16-11-18		
Cap-des-Rosiers	16-06-06	16-08-19	16-08-19	16-11-23	16-11-23	16-12-16
Sainte-Anne-des-Monts	16-06-07	16-08-16	16-08-16	16-11-16		
Saint-Ulric	16-06-08	16-08-21	16-08-21	16-11-16		
Saint-Omer	16-06-03	16-08-21	16-08-21	16-11-16		
Saint-Siméon	16-06-05	16-08-20	16-08-20	16-11-30		
Paspébiac	16-06-04	16-08-09	16-08-18	16-11-30		
Chandler	16-07-04		PERDU			
Penouille	16-06-05	16-08-20	16-08-20	16-11-24		
Pentecôte	16-06-04		PERDU			
Pointe à Fortin	16-06-08	16-08-05	16-08-05	16-11-16		



Figure 69. Exemple de capteurs RBR nécessaires aux inventaires en zone intertidale (a) ; exemple d'installation sur roc (b) ; et en milieu sableux (c)

Les capteurs de pression utilisés par le LDGIZC sont les modèles *Dfast6* et *Dwave* de la compagnie RBR (figure 69). Une fréquence d'échantillonnage de 4 Hz en continue a été sélectionnée pour l'ensemble des capteurs, permettant une durée d'acquisition non-interrompue de 90 jours – une durée limitée par les batteries. Après la transformation des données en niveau d'eau – la pression atmosphérique est au préalable soustraite de la pression de la colonne d'eau – une analyse spectrale est effectuée afin d'obtenir les paramètres statistiques standard de niveau d'eau moyen ($\bar{\eta}$) (m), hauteur de vague significative (H_s) (m), et période (T_{m02}) (s). Les capteurs sont installés sur l'estran légèrement sous le niveau d'eau moyen afin d'être submergés le plus fréquemment possible. Au cours d'une période de déploiement, en plus de fournir les caractéristiques des vagues à la côte, un instrument devient un référentiel altitudinal local pour les niveaux d'eau lorsque qu'aucun marégraphe n'est présent près du site.

L'utilisation des capteurs sur l'estran est nécessaire pour bien comprendre la différence entre des niveaux prédits au large (pas d'effet de fond sur la propagation des vagues) ou à des marégraphes (en milieu protégé) sans effet d'agitation marine. En effet, en plus de contribuer à l'agitation du plan d'eau en zone littorale, le déferlement des vagues incidentes engendre une élévation de la colonne d'eau – sous l'effet de la contrainte de radiation (Longuet-Higgins et Parkin, 1962), de la bathymétrie et des paramètres de vagues, ce qui se répercute sur le niveau d'eau observé sur l'estran. Le niveau d'eau total (NET ; voir figure 1) observé sur la plage est donc plus élevé que celui enregistré au large sous l'effet d'un ajustement de la pente du niveau moyen de la mer près de la côte. Ce phénomène se nomme le *wave setup* et peut se calculer en moyennant la variabilité haute fréquence du jet de rive (*swash runup*) (Komar, 1998) autour d'un niveau moyen ($\bar{\eta}$). La combinaison du *setup* et du *swash runup* compose le *runup* (R), communément référé par le terme R_2 en référence à l'élévation atteinte par 2% des plus hauts jets de rive (Cariolet, 2011).

Connaître l'ensemble des phénomènes hydrodynamiques influençant les niveaux d'eau sur plusieurs milieux (grande échelle) exige d'avoir recourt à des formulations empiriques au détriment des modèles numériques et/ou physiques hautement exigeant en temps de calculs (Vousdoukas et al., 2016). Ainsi, dans ce projet, le niveau d'eau total sur une plage (NET) est exprimé par l'équation suivante (Gallien et al., 2015) :

$$NET = \bar{\eta} + R_2$$

où $\bar{\eta}$, obtenu au capteur, représente concrètement la combinaison du niveau de marée astronomique, de la surcote et du *setup* en présence de vagues.

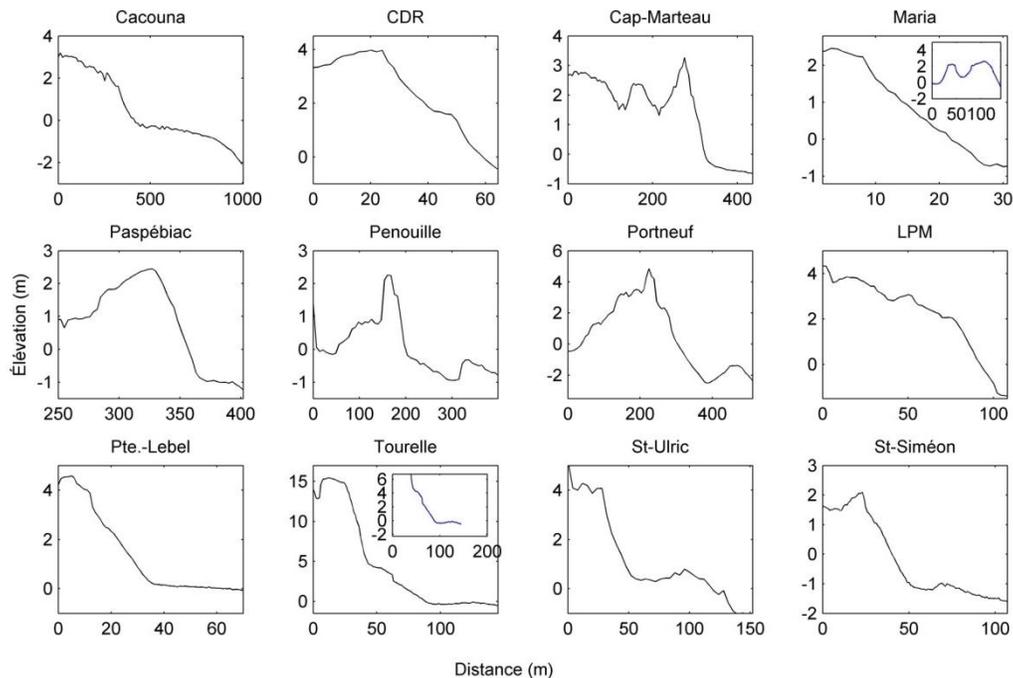


Figure 70. Représentation de la variabilité des profils au DGPS suivis par des capteurs de pression pour les mesures de vagues. La courbe en bleu dans l'encadré du profil de Maria représente le profil de St-Omer, alors que celle du profil de Tourelle est un agrandissement du profil sur la portion de haut estran au pied de la falaise meuble.

Pour l'ensemble des séries temporelles de niveau d'eau $\bar{\eta}$, le R_2 a été estimé en utilisant la valeur de H_s transformée. Le choix de cette estimation repose sur des levés de validation de niveau de *runup* à l'Anse-au-Lard et de lignes d'eau (jonction eau/plage) à Pointe-Lebel (Didier et al., 2017), où les résultats ont montré une relation linéaire de type $NET = \bar{\eta} + H_s$, avec H_s mesuré au droit de la plage dans la zone intertidale suite au déferlement. Cette relation est plus performante qu'une relation empirique non ajustée au site car elle diminue l'incertitude qui est habituellement associée aux équations de la littérature qui ont été validées sur des sites variés en dehors des plages de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent. Cette incertitude verticale atteint plusieurs dizaines de centimètres pour la plupart des équations (Stockdon et al., 2006). Dans l'analyse des niveaux d'eau et de vagues observés aux différents sites, cette relation empirique semble être justifiée comme indicateur des niveaux d'eau totaux sur les côtes, avec l'effet des vagues. Cela est appuyé par les fortes corrélations de la figure 71.

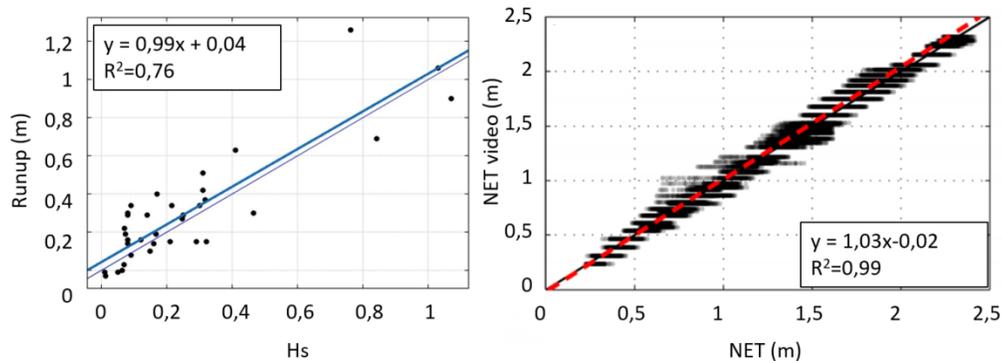


Figure 71. Élévation du jet de rive (*runup*) (gauche) en fonction des vagues significatives à la côte à l'Anse au Lard et du niveau d'eau total mesuré par la caméra à Pointe-Label

Une fois les séries temporelles de niveaux d'eau totaux créées, des analyses de surpassements des différentes limites ont été réalisées pour la période de suivi afin de vérifier si celles-ci peuvent être influencées par les niveaux d'eau avec ou sans vagues.

3.6.2. Surpassement du niveau de récurrence 2 ans

Des analyses de dépassement de seuils, soit les élévations des différentes limites, par les niveaux d'eau observés à la côte (moyens et totaux) ont été réalisées afin d'évaluer s'il existe une différence de positionnement vertical entre les limites issues des diverses méthodes de détermination de la LHE.

D'abord, pour l'analyse des surpassements du niveau de récurrence 2 ans, comme la plupart des instruments ont été installés pendant une durée inférieure à 2 ans, l'hypothèse ici sous-entend que le seuil établi comme ce niveau de récurrence 2 ans ne serait pas atteint par les niveaux d'eau à la côte ou, du moins, aurait une faible probabilité de se produire. Ainsi, bien que cette étape ne permette pas de déterminer de longues périodes de retour associées aux niveaux d'eau à la côte, elle permet de valider l'hypothèse selon laquelle un niveau de récurrence 2 ans sous-estime les niveaux réels, celui-ci n'incluant pas les vagues. Dans ce cas, le niveau de récurrence 2 ans serait surpassé au capteur, même si ce dernier est sous l'eau pendant une durée moindre que 2 ans.

Les cotes d'élévation associées au niveau de récurrence 2 ans, préalablement calculées par le CEHQ, ont été utilisées dans ce travail en raison de la disponibilité de ces données ainsi que pour une meilleure cohérence méthodologique entre tous les sites. Ceci permet également de reproduire la

méthode telle qu'elle est appliquée actuellement, basée sur les données officielles disponibles. Pour les secteurs où les données ne sont pas disponibles, ces niveaux ont été interpolés entre deux cotes avoisinantes, tel que suggéré par le CEHQ.

Les figures suivantes montrent les séries temporelles de niveau marin (nommé *marin moyen* car il s'agit du niveau moyenné sur 17 minutes) et niveau marin total mesuré à chaque site. Sur chaque figure, la cote de récurrence 2 ans (indiquée 0-2ans) est superposée afin de vérifier visuellement sa position verticale.

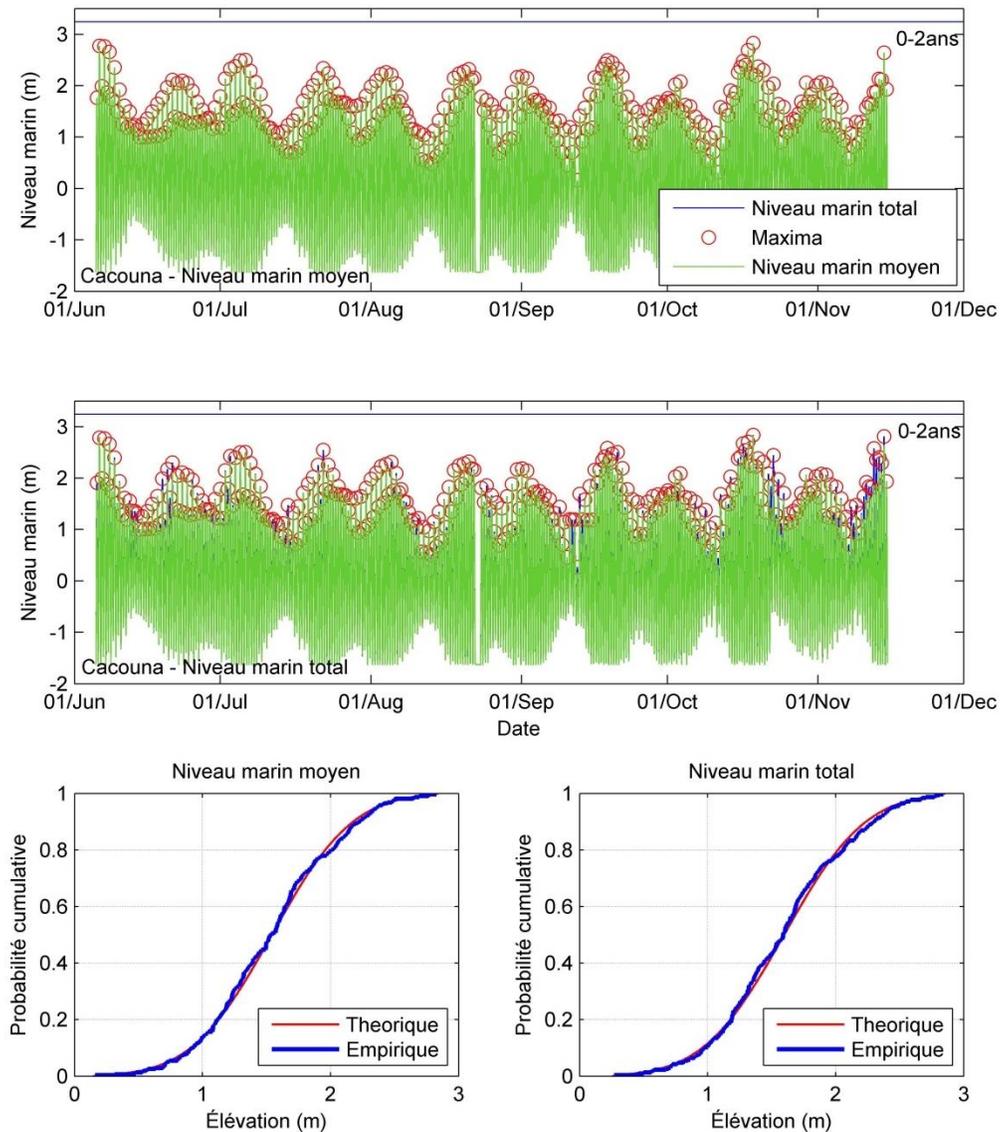


Figure 72. Séries temporelles des niveaux marins moyen et total à Cacouna et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surpassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

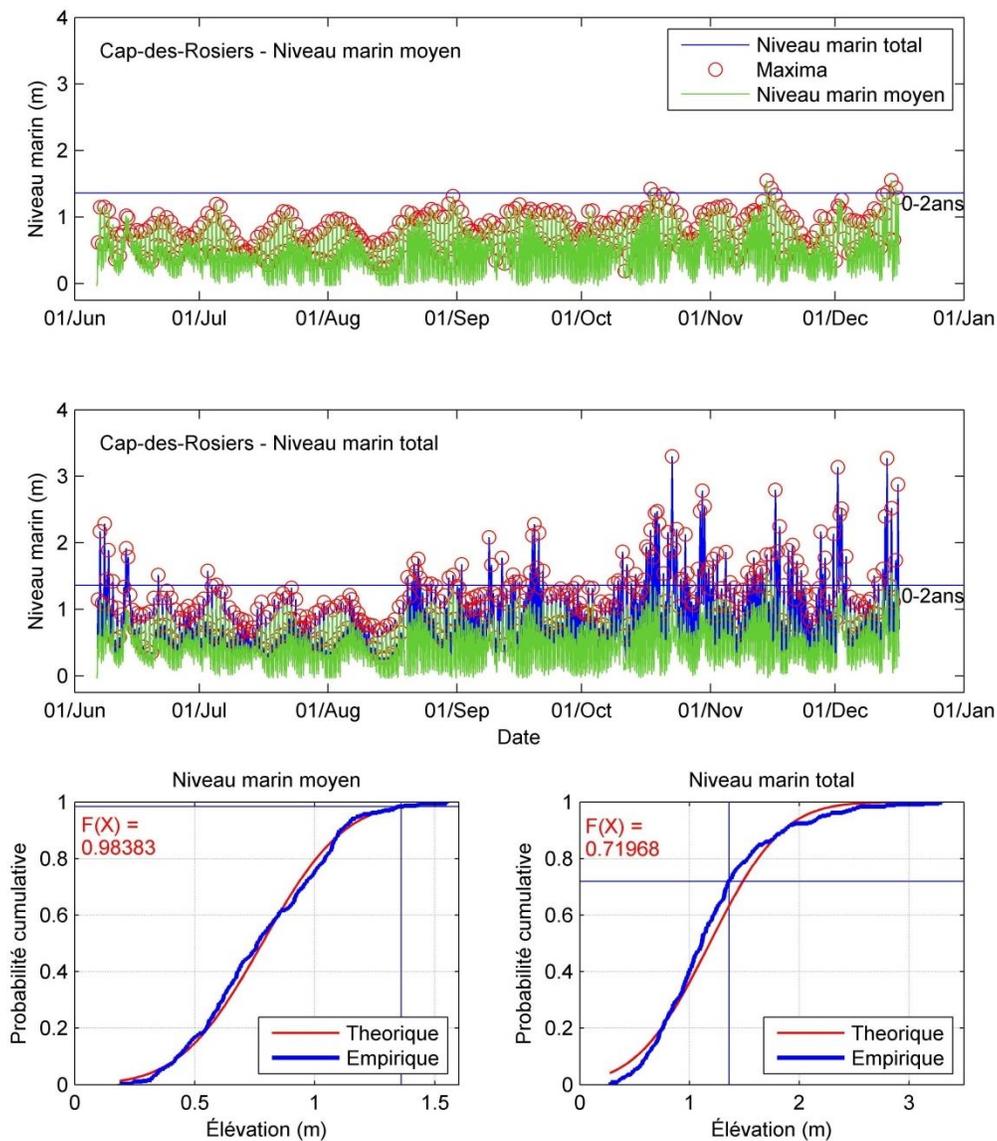


Figure 73. Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Cap-des-Rosiers et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surpassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

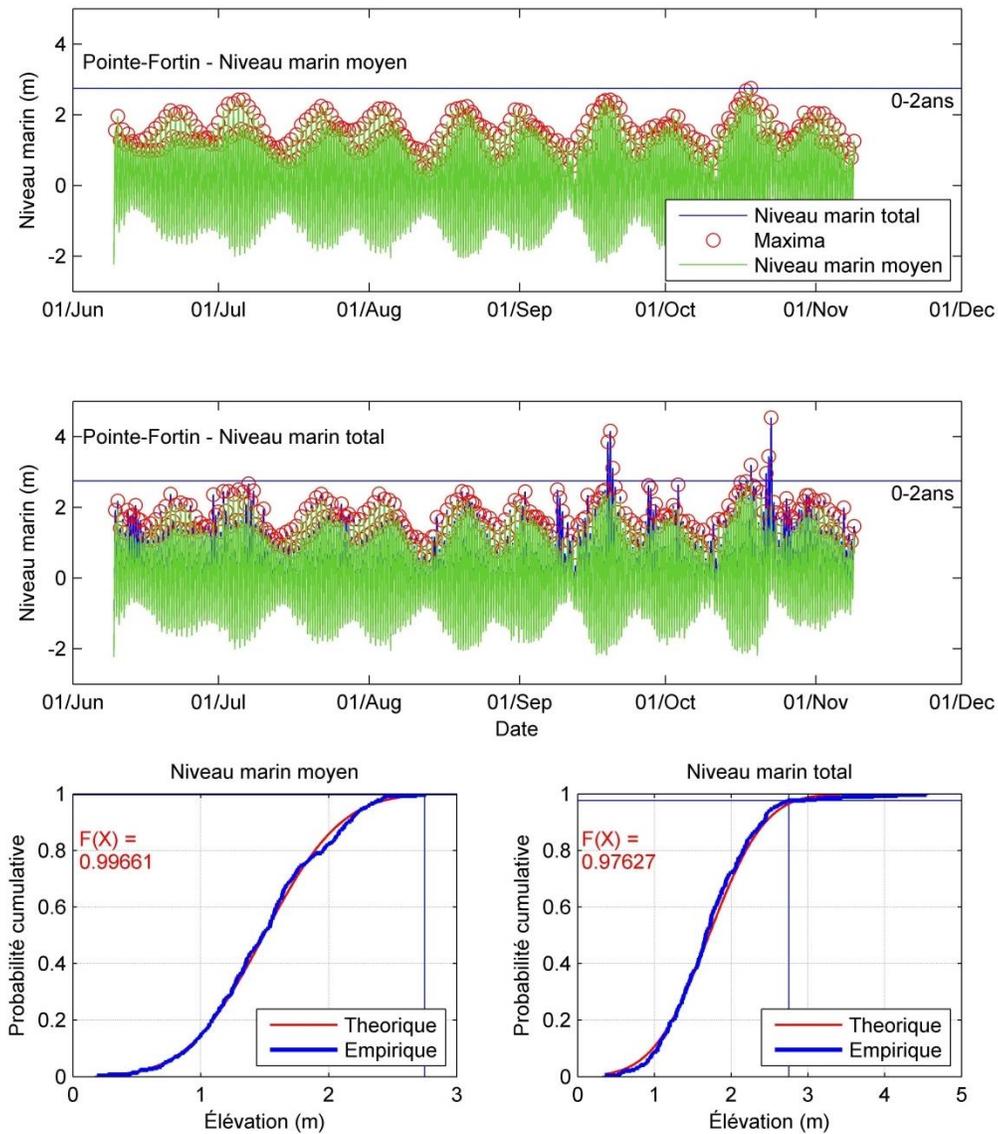


Figure 74. Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Pointe-Fortin et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a un dépassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

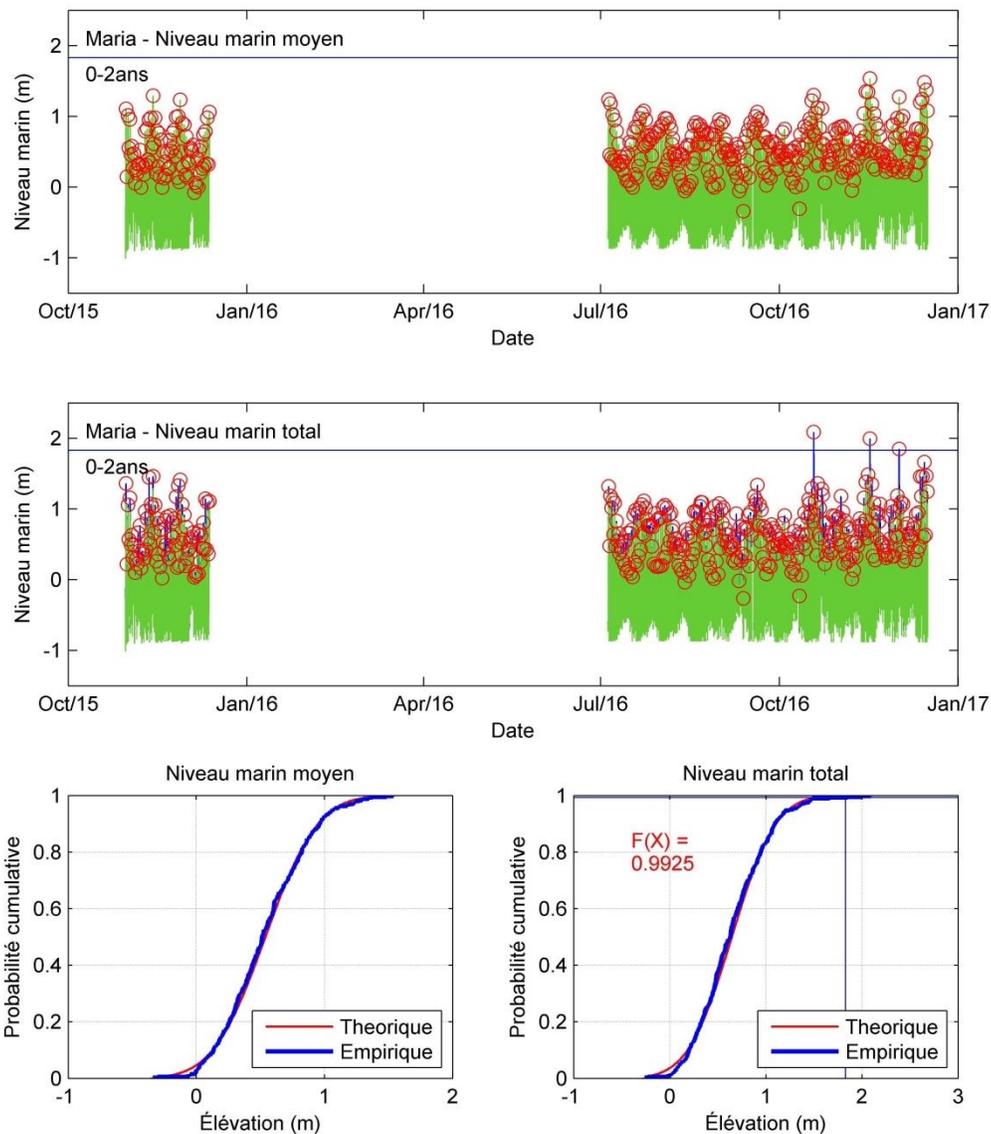


Figure 75. Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Maria et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surpassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

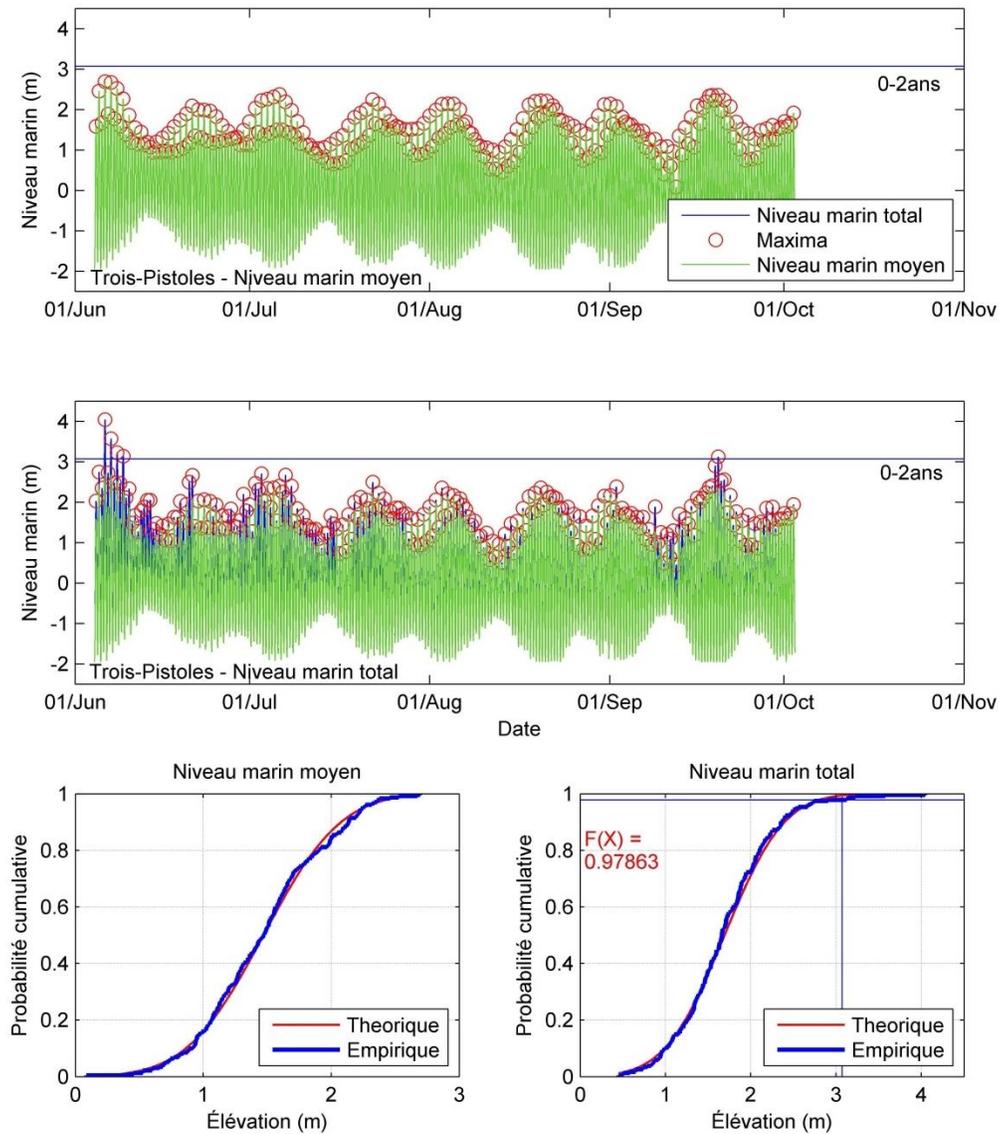


Figure 76. Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Trois-Pistoles et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surpassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

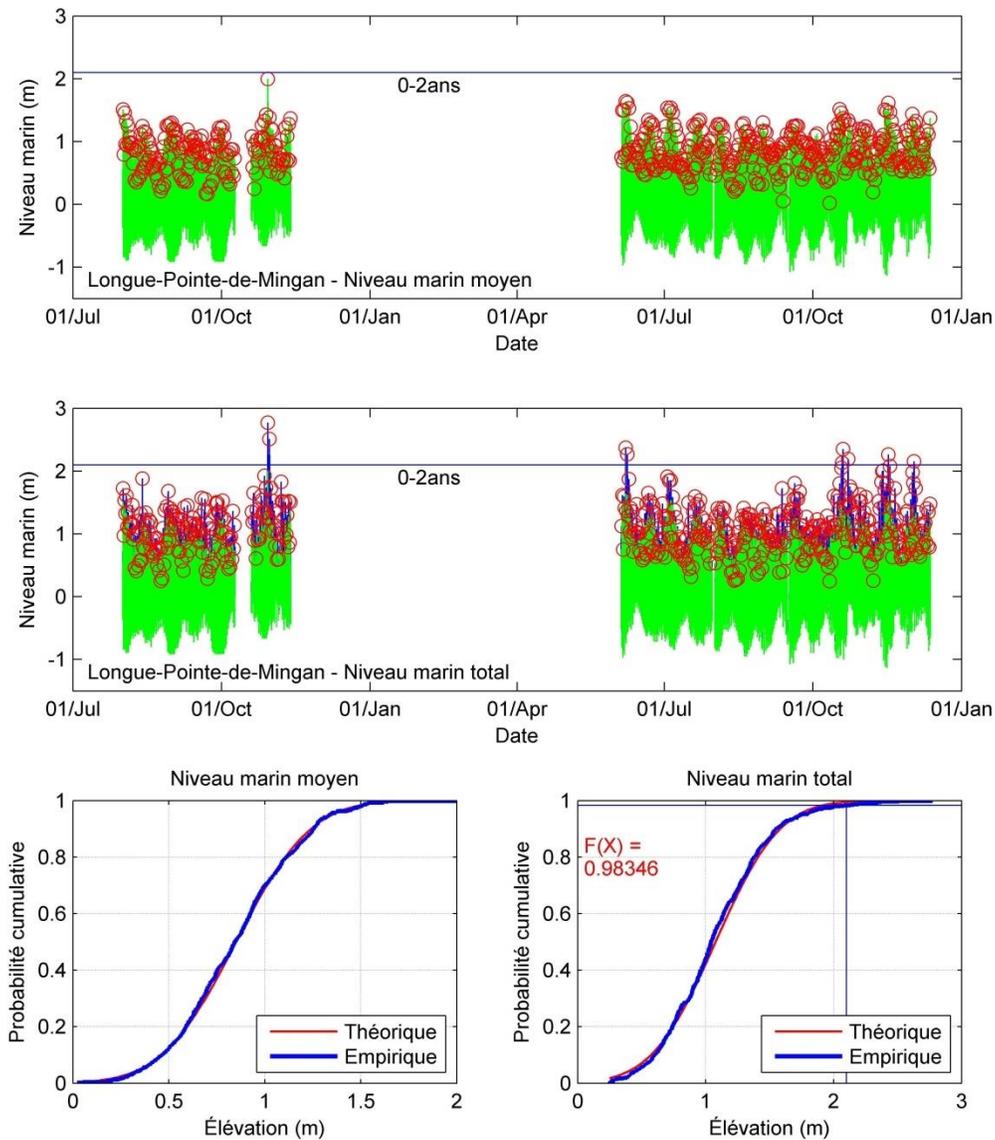


Figure 77. Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Longue-Pointe-de-Mingan et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

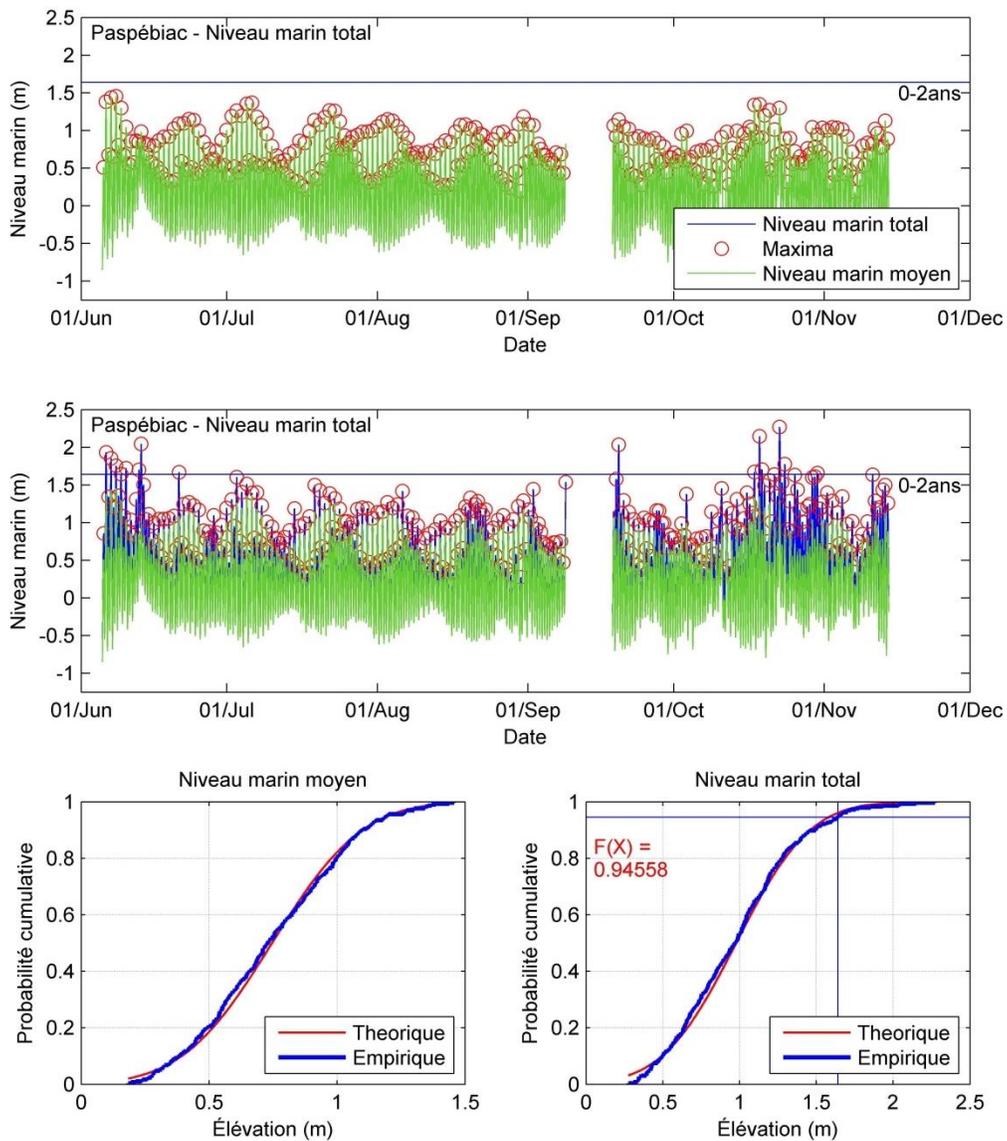


Figure 78. Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Paspébiac et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surpassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

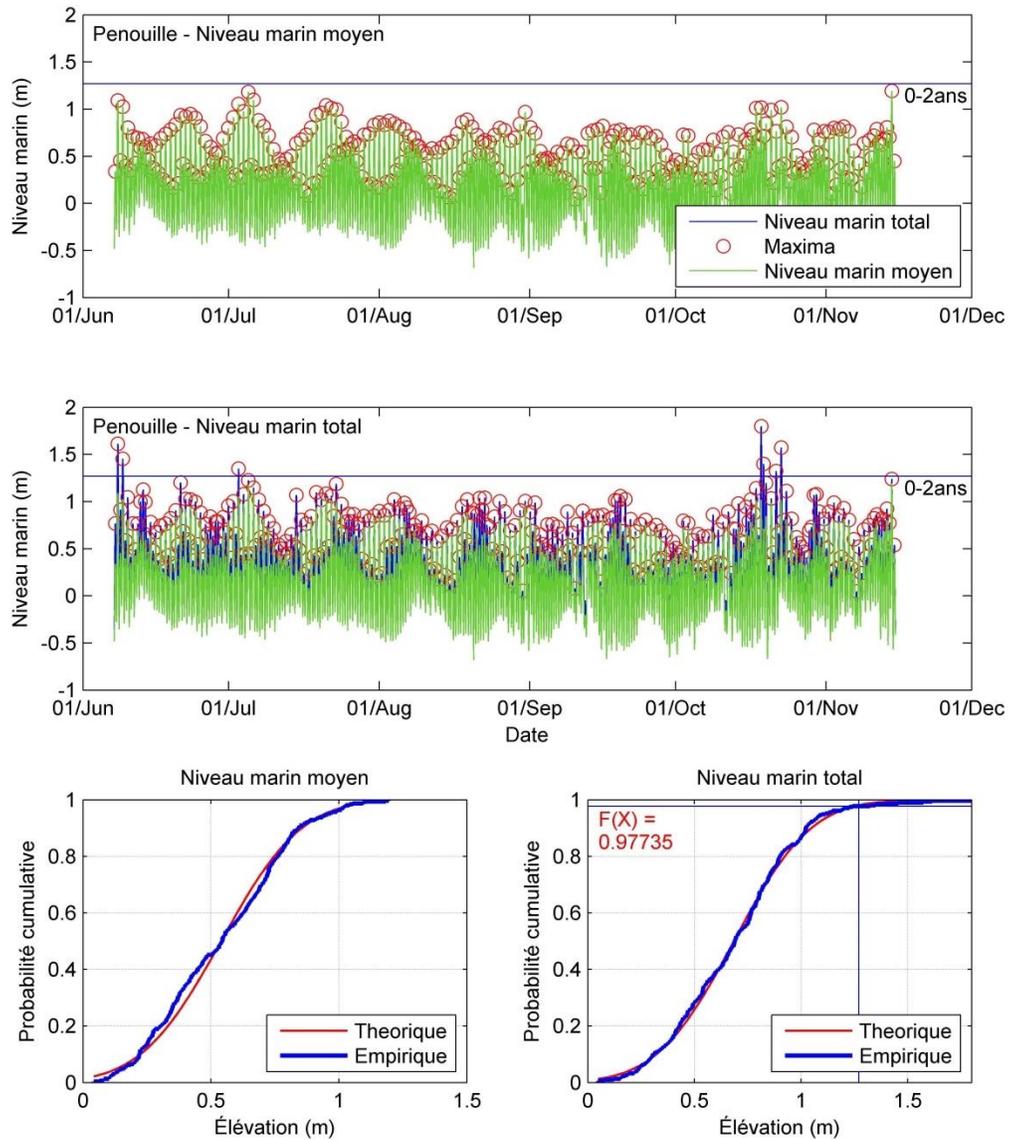


Figure 79. Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Penouille et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surpassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

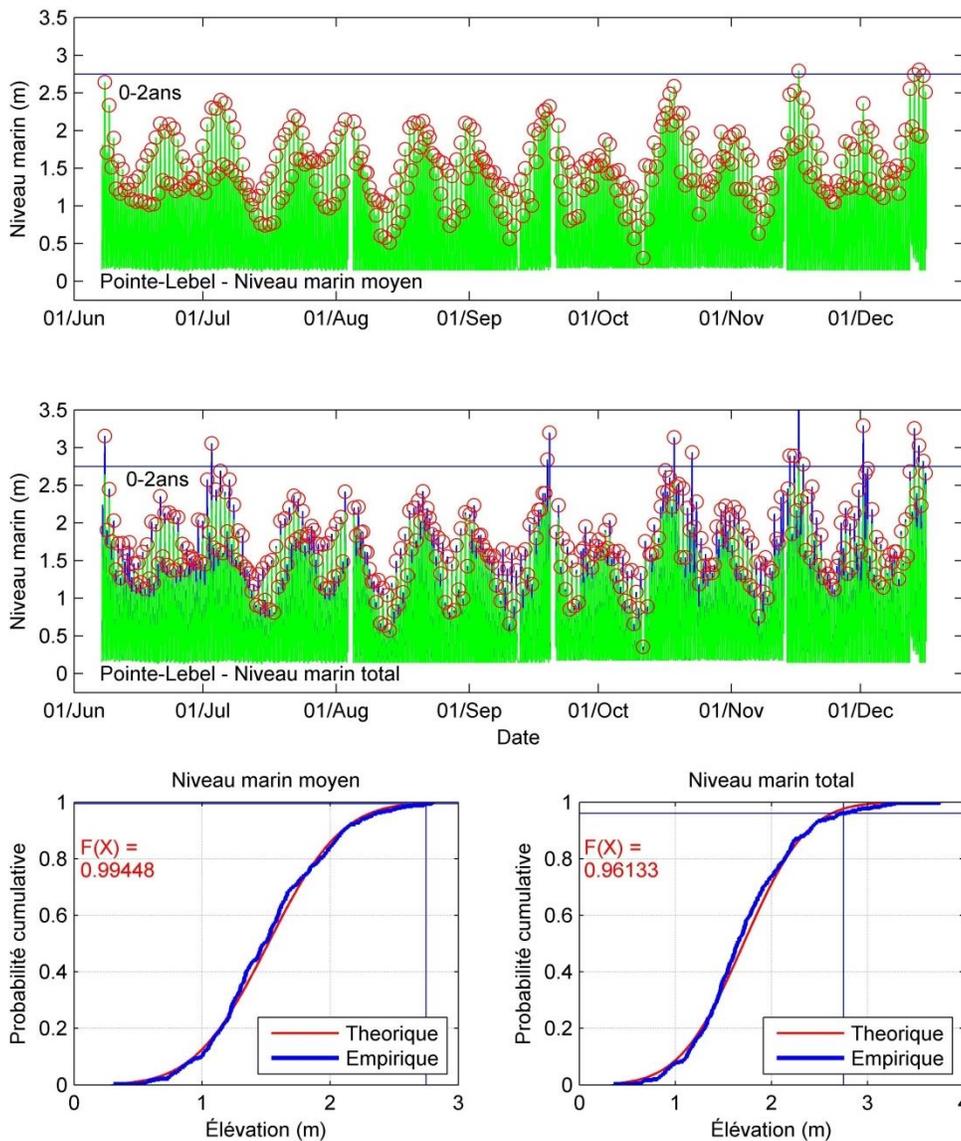


Figure 80. Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Pointe-Lebel et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surpassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

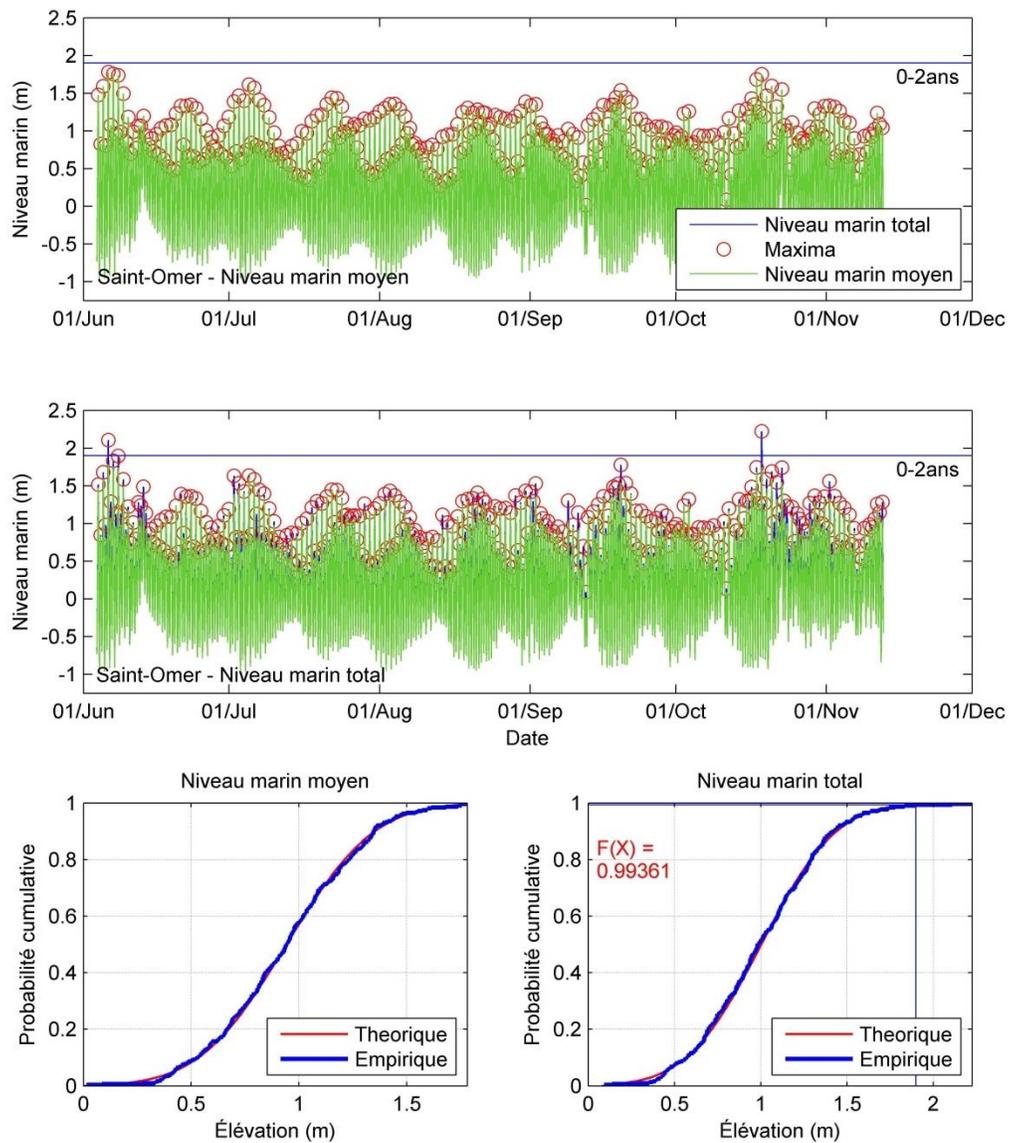


Figure 81. Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Saint-Omer et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surpassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

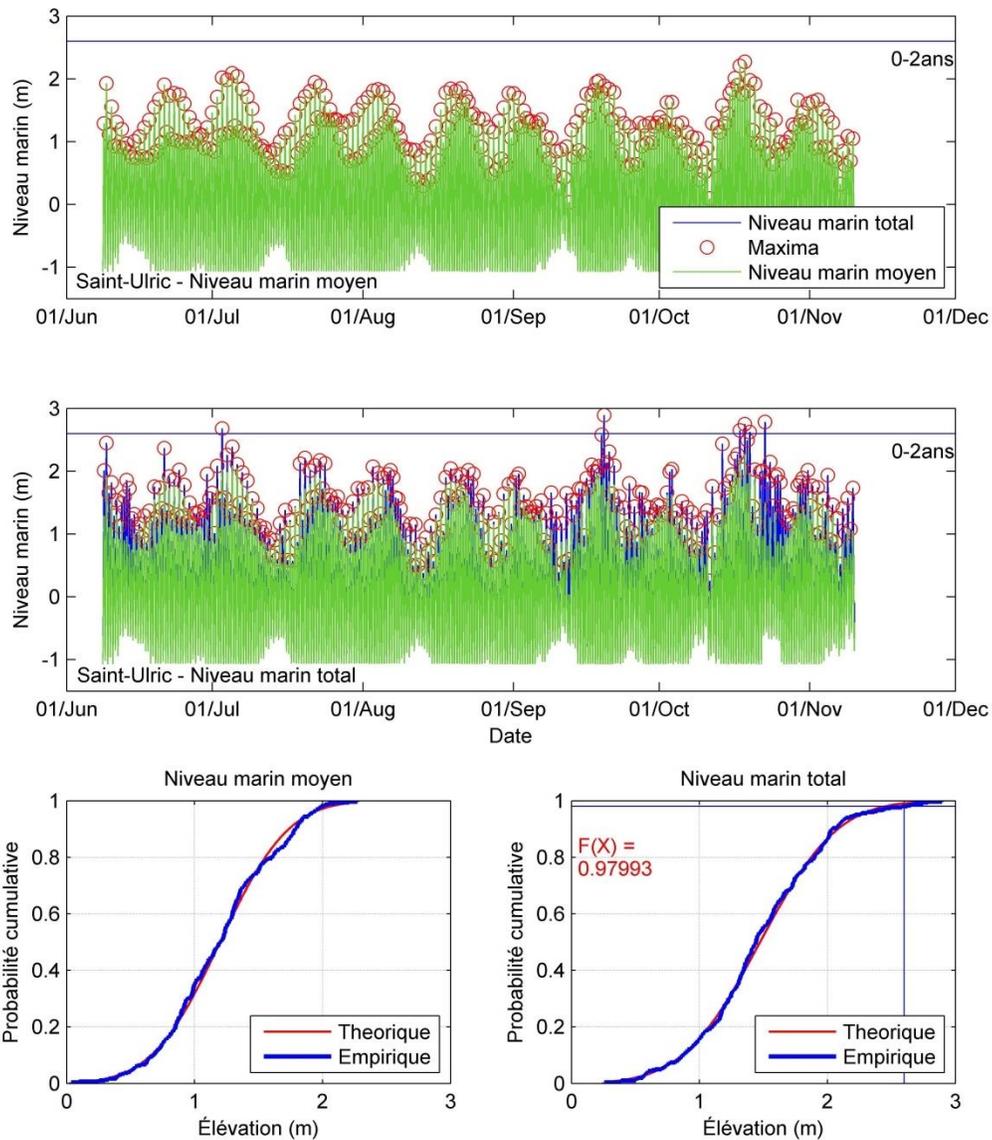


Figure 82. Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Saint-Ulric et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surpassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

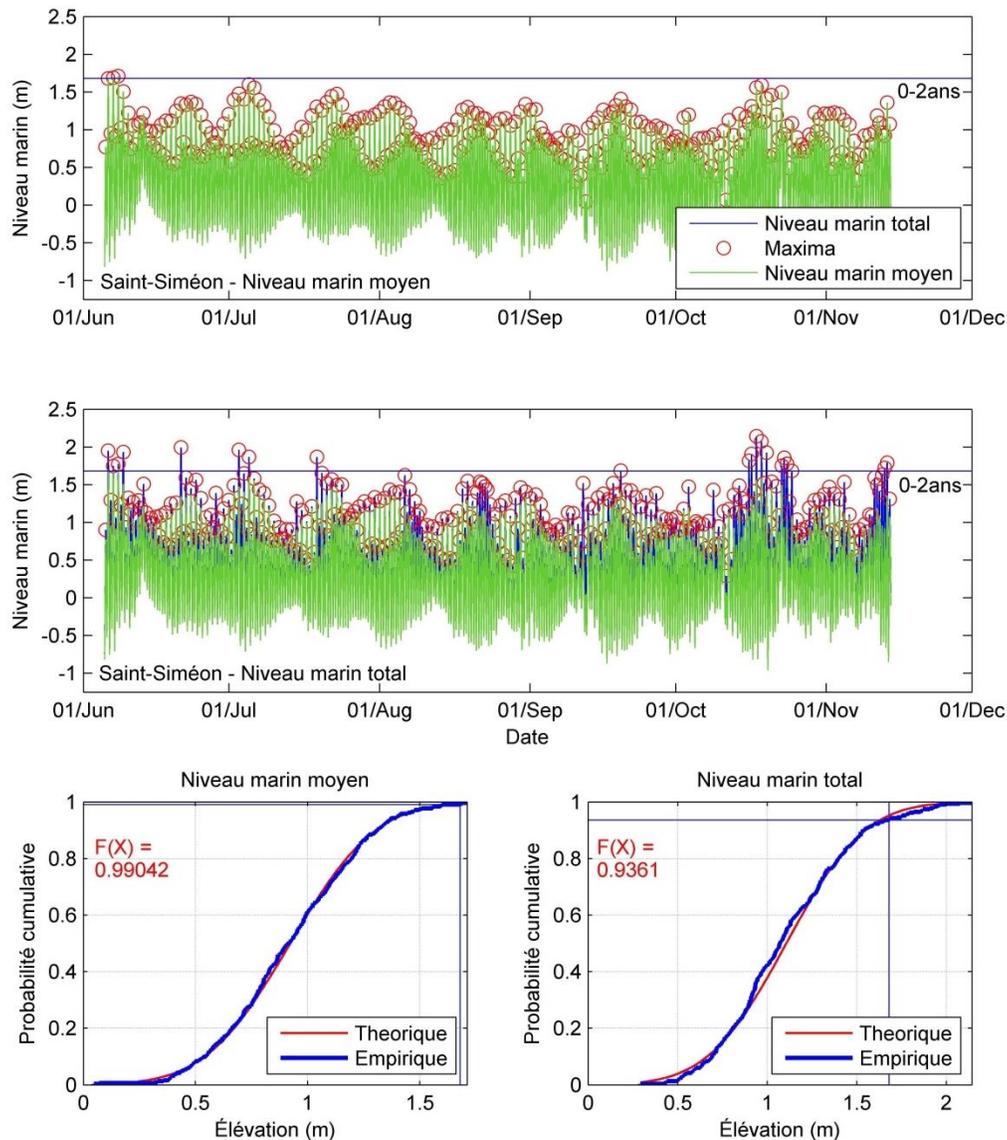


Figure 83. Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Saint-Simon et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a un dépassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

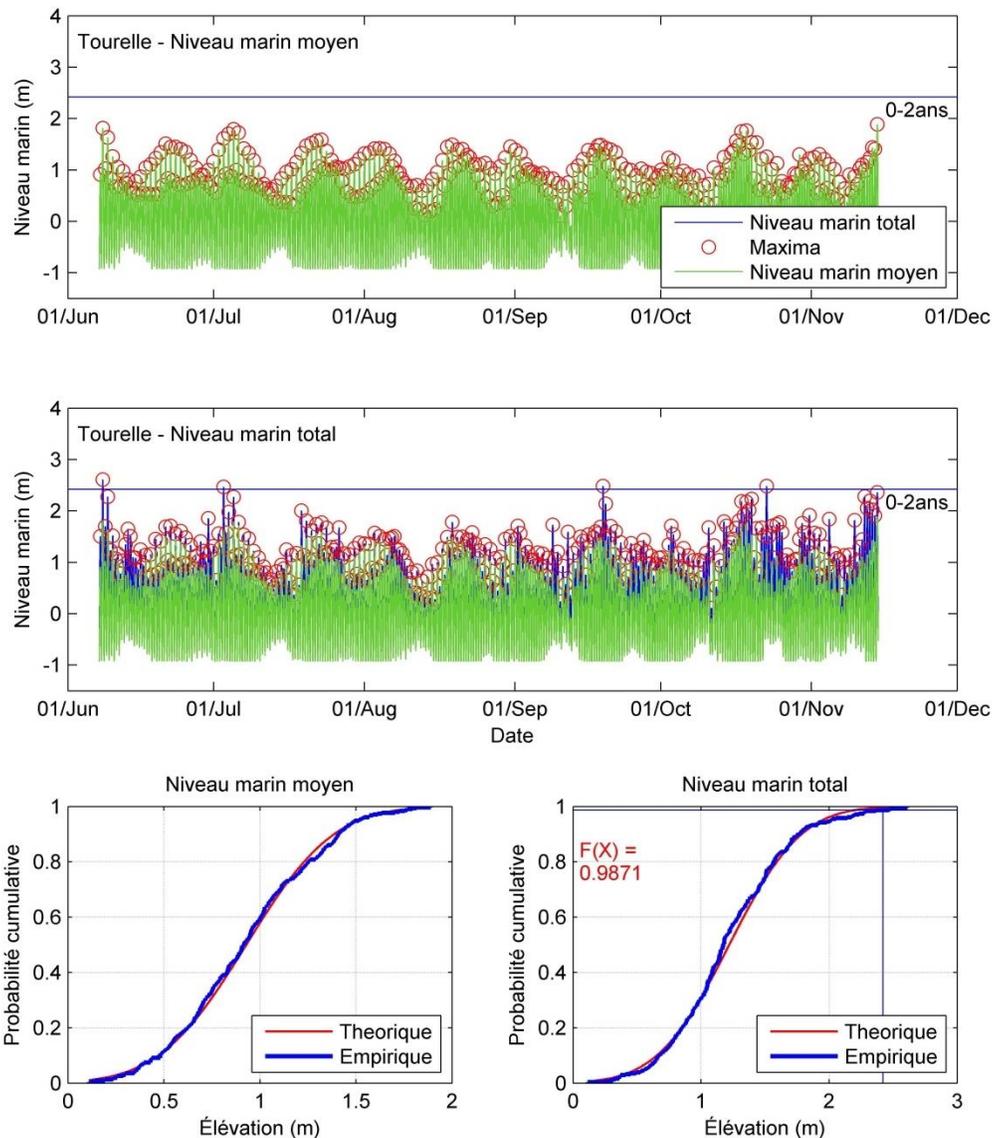


Figure 84. Séries temporelles de niveaux marins moyen et total à Tourelle (Sainte-Anne-des-Monts) et distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics. S'il y a surpassement du niveau de récurrence 2 ans, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

Pour chaque série, une analyse de surpassement de la limite à chaque marée haute est effectuée afin de créer un nouvel échantillon de valeurs de niveau marin total et moyen. La probabilité de dépassement de la LHE, dans les graphiques du bas, se calcule par $1-F(x)$. Par exemple, à Tourelle, le niveau de récurrence 2 ans a été dépassé dans 1,3% des cas de marée haute. Les

probabilités de surpassement des trois limites sont présentées dans les tableaux 29 et 30.

3.6.3. Surpassement de la LHEB

Une comparaison des surpassements des LHEB a également été réalisée. Seules les figures de surpassement sont présentées ici puisque les séries temporelles sont les mêmes que celles présentées dans la section précédente.

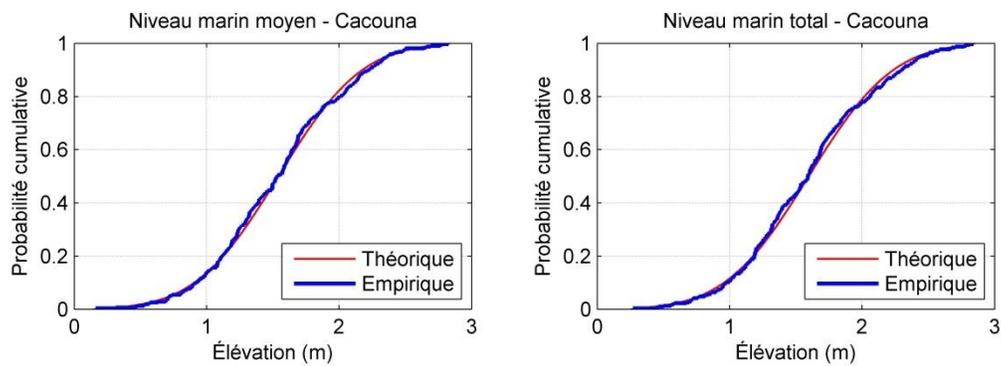


Figure 85. Distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics de niveaux marins total et moyen à Cacouna. S'il y a surpassement de la LHEB, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

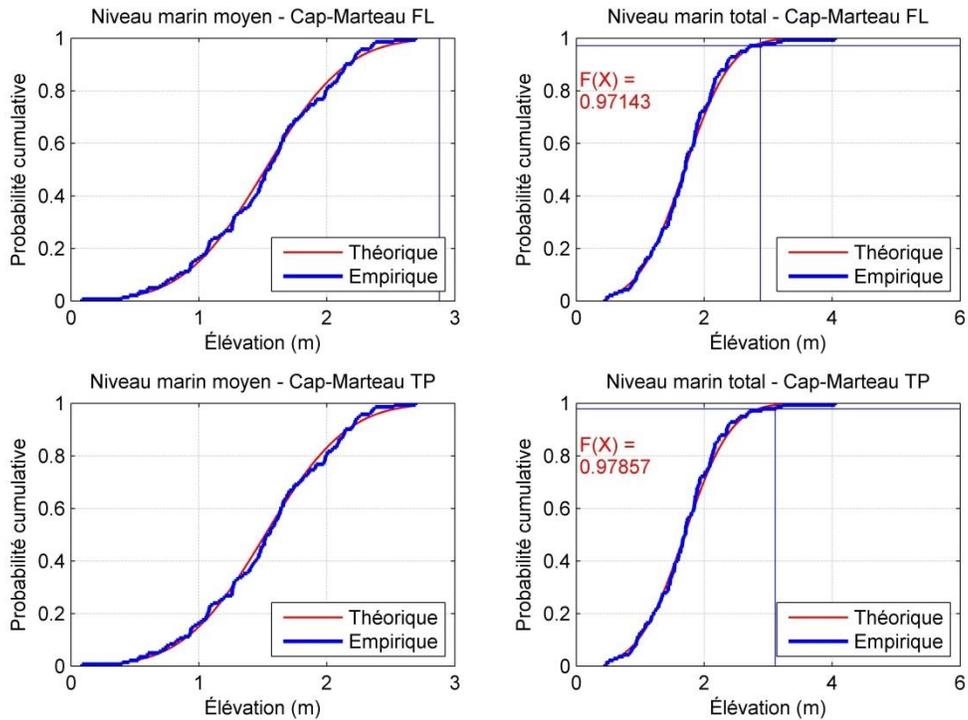


Figure 86. Distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics de niveaux marins total et moyen à Trois-Pistoles (marais de Cap-Marteau sur le secteur de la flèche et de la terrasse de plage). S'il y a surpassement de la LHEB, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

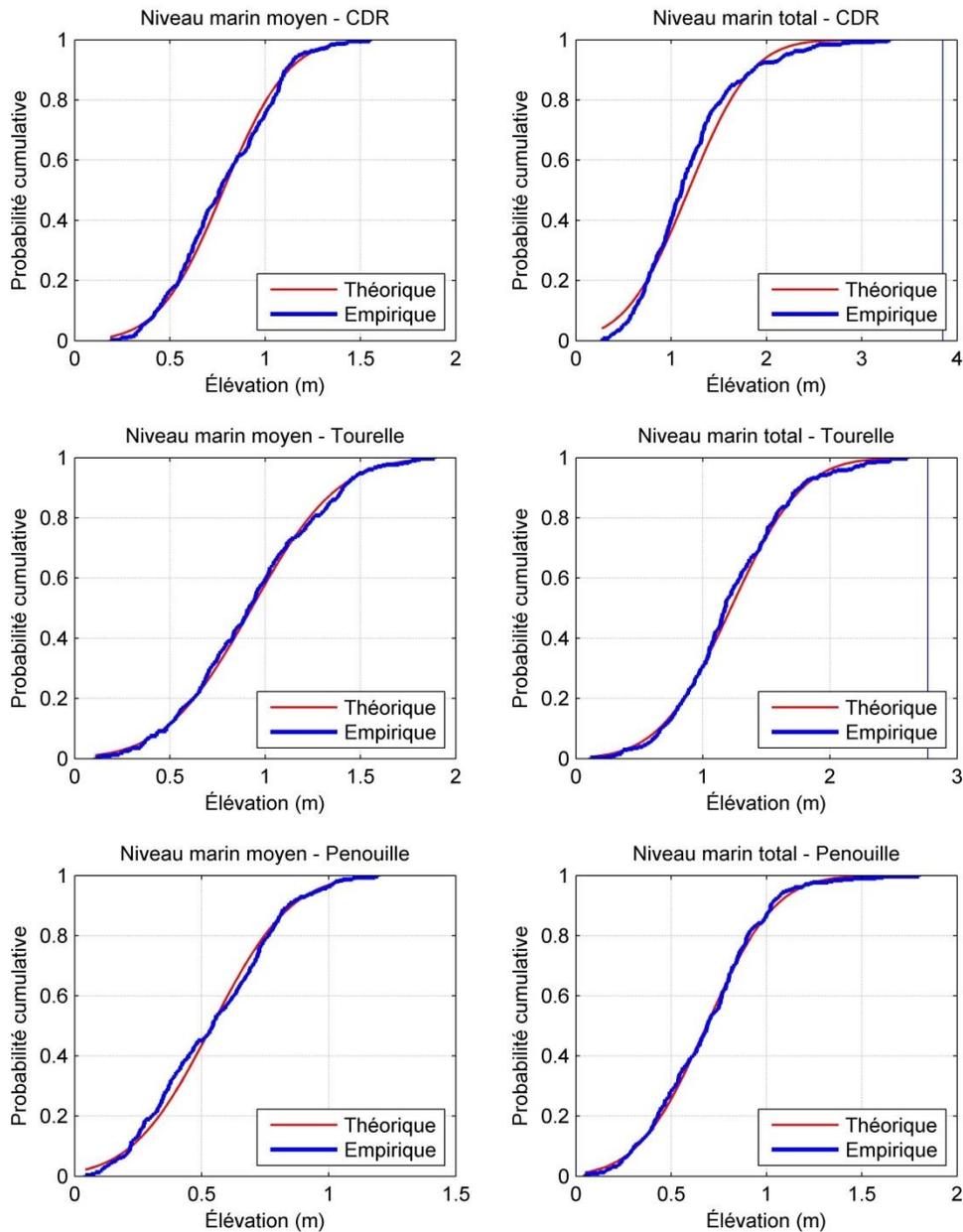


Figure 87. Distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics de niveaux marins total et moyen à Cap-des-Rosiers (CDR), Tourelle (Sainte-Anne-des-Monts) et Penouille. S'il y a un dépassement de la LHEB, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

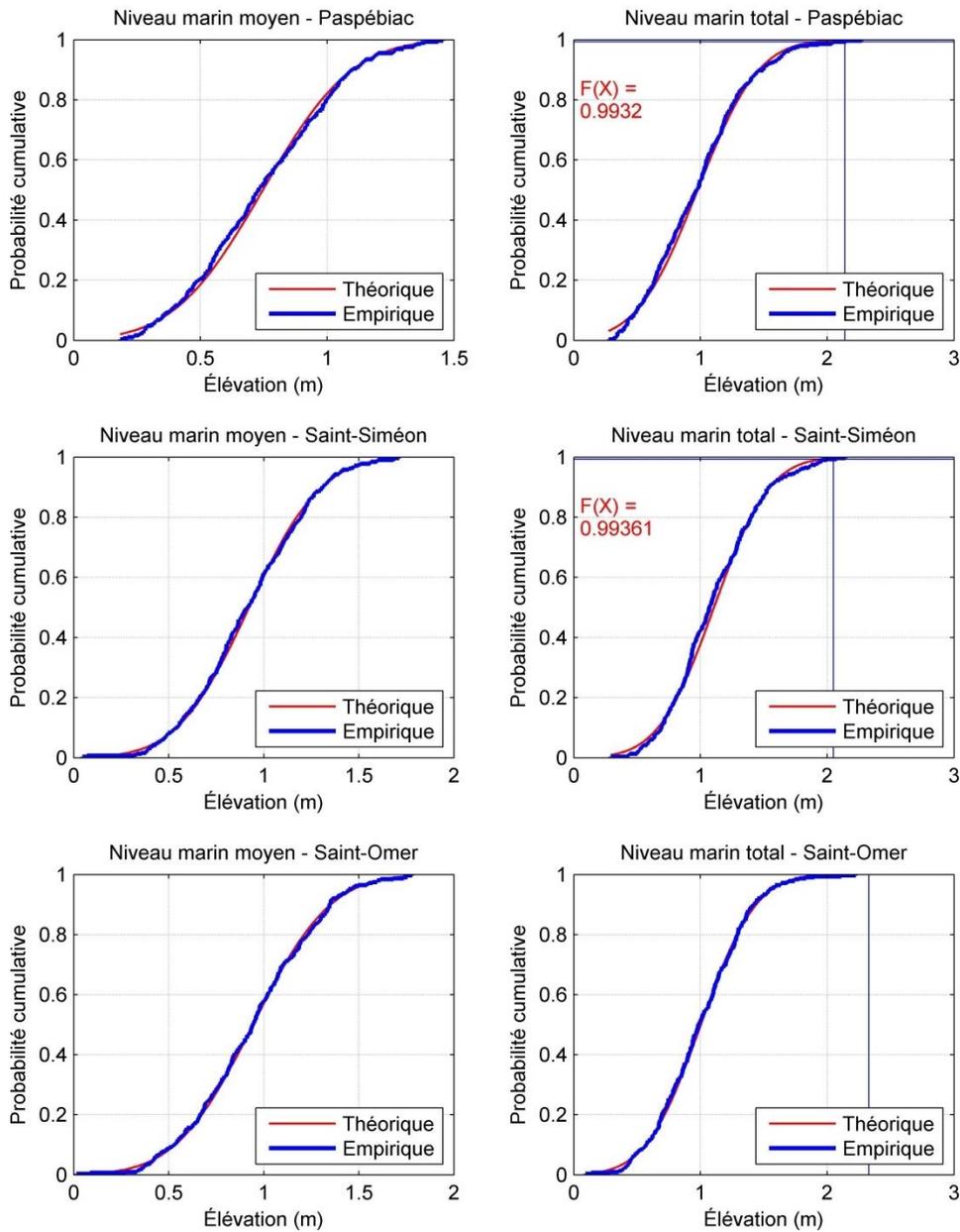


Figure 88. Distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics de niveaux marins total et moyen à Paspébiac, Saint-Siméon et Saint-Omer. S'il y a un surpassement de la LHEB, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

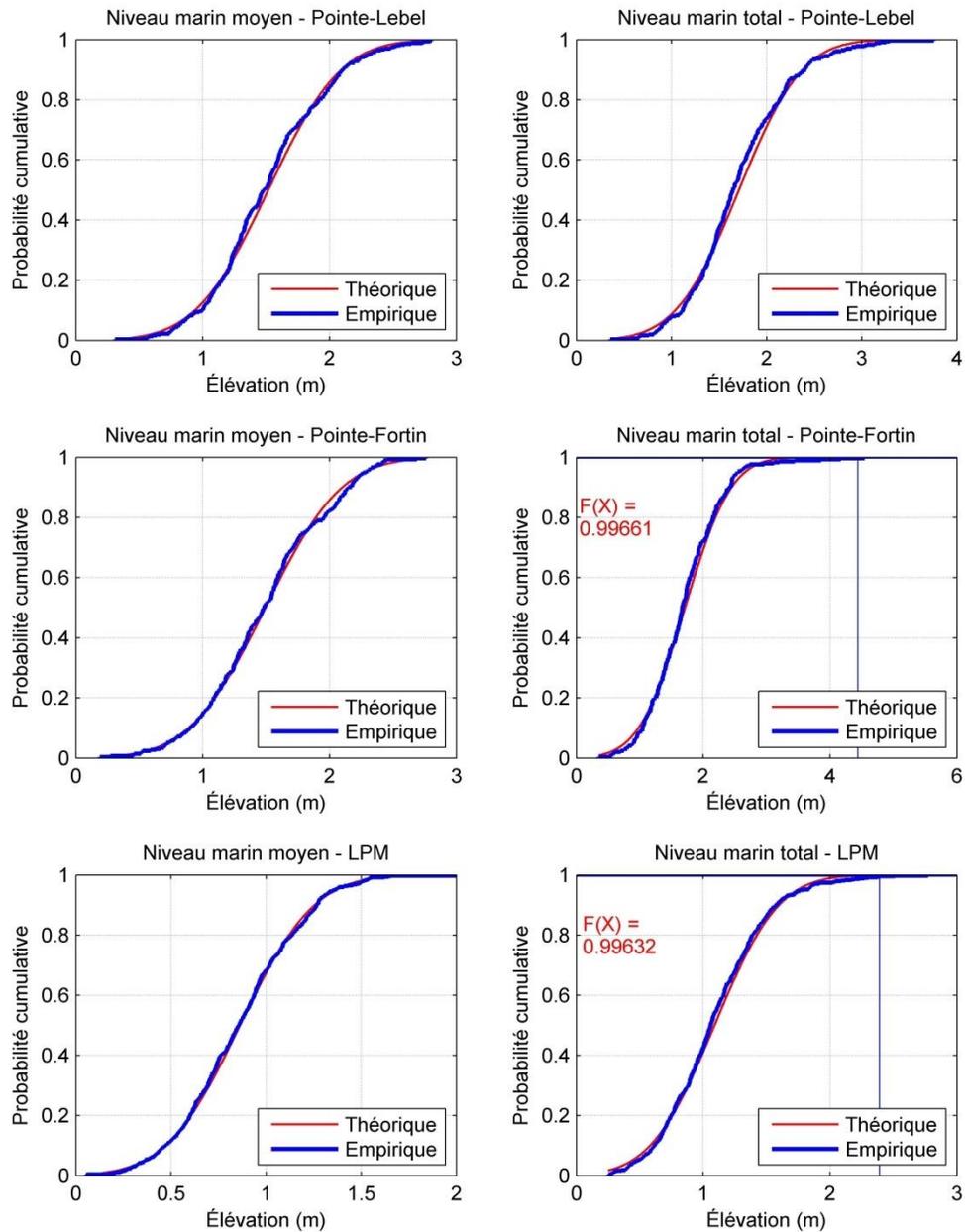


Figure 89. Distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics de niveaux marins total et moyen à Pointe-Label, Pointe-Fortin et Longue-Pointe-de-Mingan. S'il y a un dépassement de la LHEB, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

3.6.4. Surpasserment de la LG

À partir de l'identification des LG sur chacun des profils de plage où sont localisés les capteurs, il a été possible d'évaluer le surpasserment de ce niveau défini par les critères éco-géomorphologiques. Les figures suivantes présentent succinctement les fréquences de surpasserment.

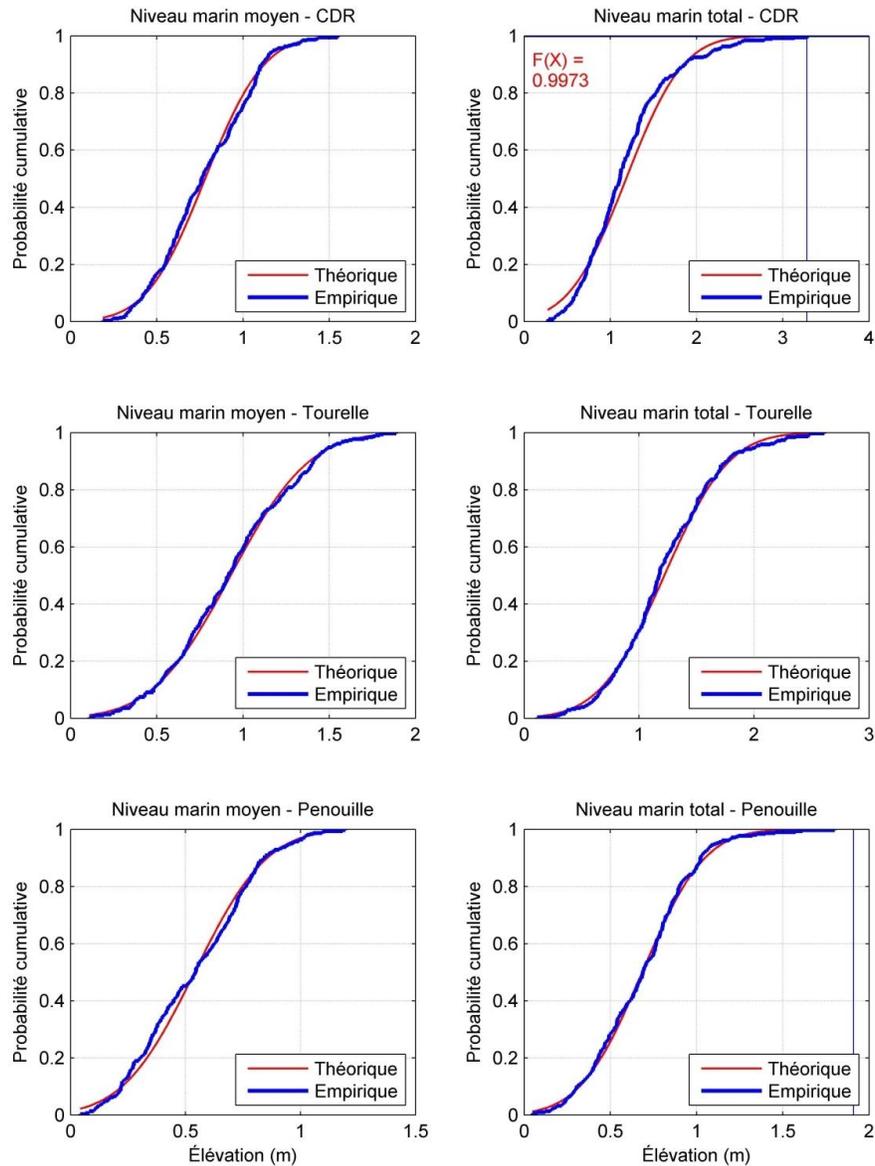


Figure 90. Distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics de niveaux marins total et moyen à Cap-des-Rosiers, Tourelle et Penouille. S'il y a surpasserment de la LG, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

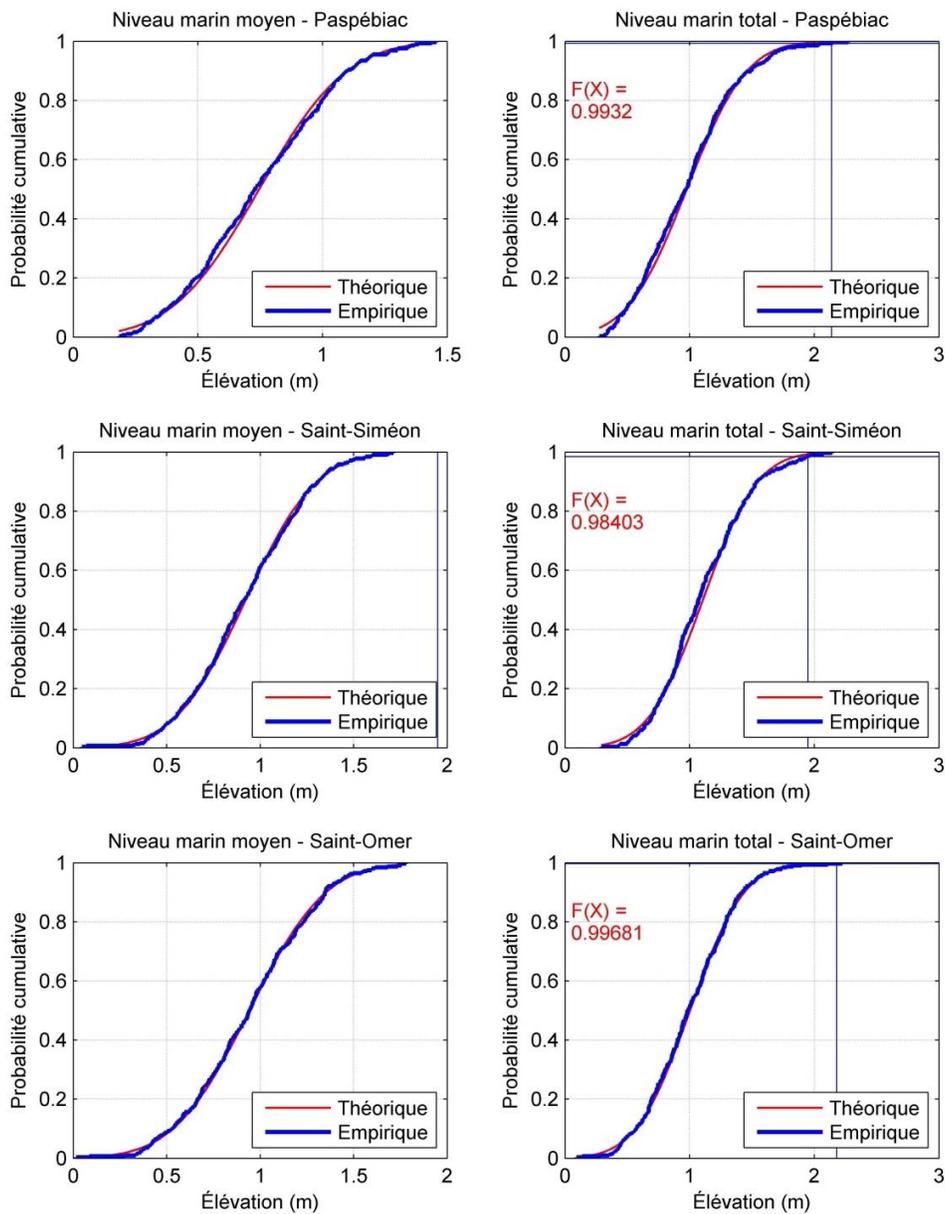


Figure 91. Distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics de niveaux marins total et moyen à Paspébiac, Saint-Siméon et Saint-Omer. S'il y a un surpassement de la LG, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

Il est à noter que pour le site de Paspébiac, l'altitude de la LG a été mesurée sur la flèche ouest, alors que le capteur était situé devant la flèche est et ce, en raison du cordon de gravier à l'est qui subit des épisodes de franchissement et de débordement rendant la détermination d'une LG impossible.

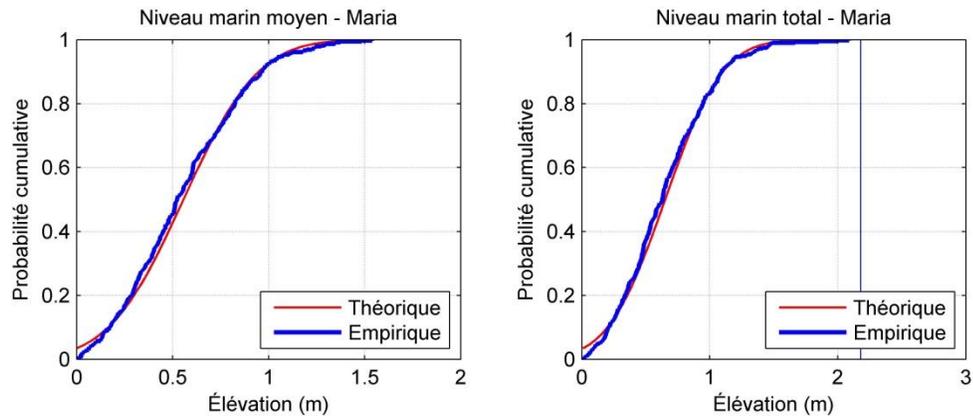


Figure 92. Distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics de niveaux marins total et moyen à Maria. S'il y a surpassement de la LG, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

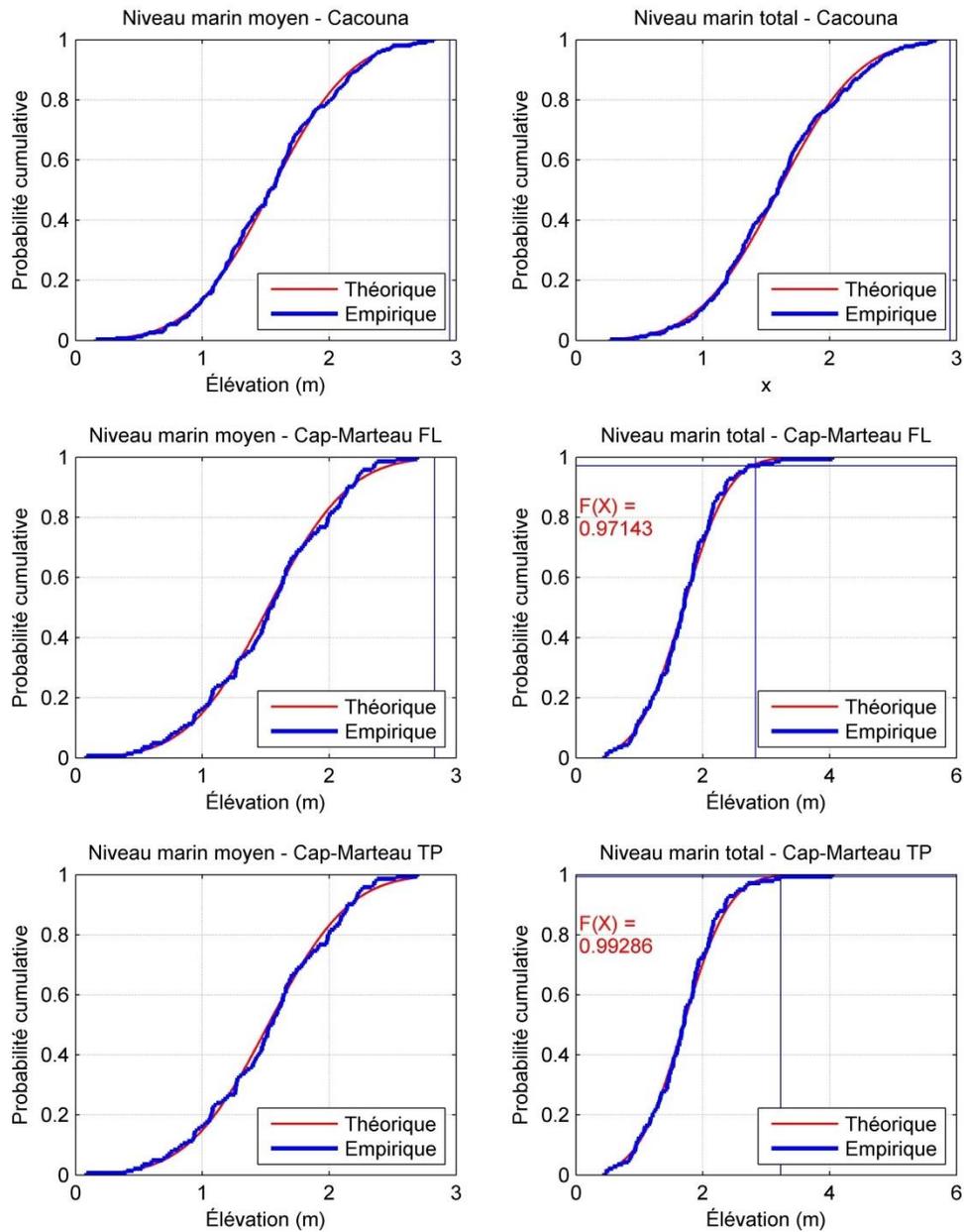


Figure 93. Distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics de niveaux marins total et moyen à Cacouna et Trois-Pistoles (secteur de la flèche et de la terrasse de plage de Cap-Marteau). S'il y a surpassement de la LG, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

Pour le secteur du Cap-Marteau, deux mesures de LG ont été comparées à l'élévation des niveaux d'eau au capteur car son emplacement permettait de mesurer les vagues de diverses directions (principalement dans le quadrant d'orientations ouest-nord-est). Ainsi, il est possible de vérifier les surpassements au droit des deux sites, dont les morphologies sont variées (la face exposée d'une flèche littorale et une terrasse de plage). Sur les deux sites, les niveaux d'eau n'ont jamais dépassé la LG, alors qu'avec l'effet des vagues, cette limite a été dépassée quelques fois (1-3% des marées hautes).

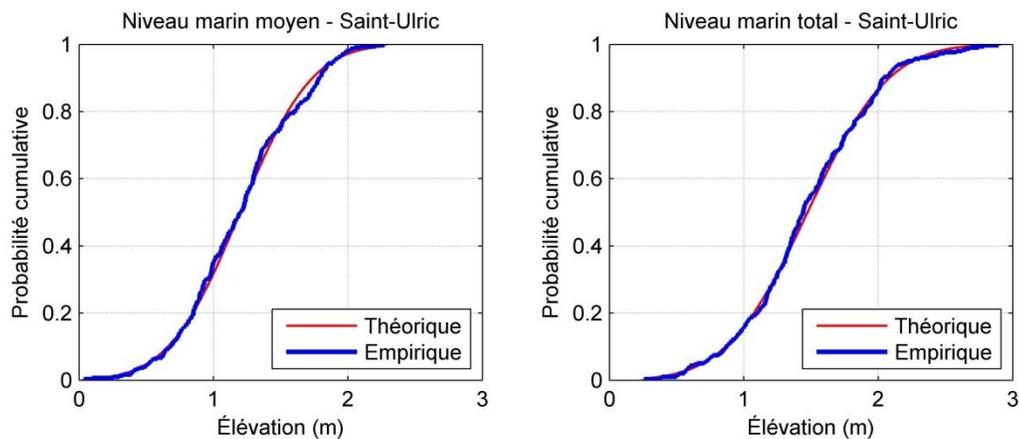


Figure 94. Distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics de niveaux marins total et moyen à Saint-Ulric. S'il y a surpassement de la LG, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

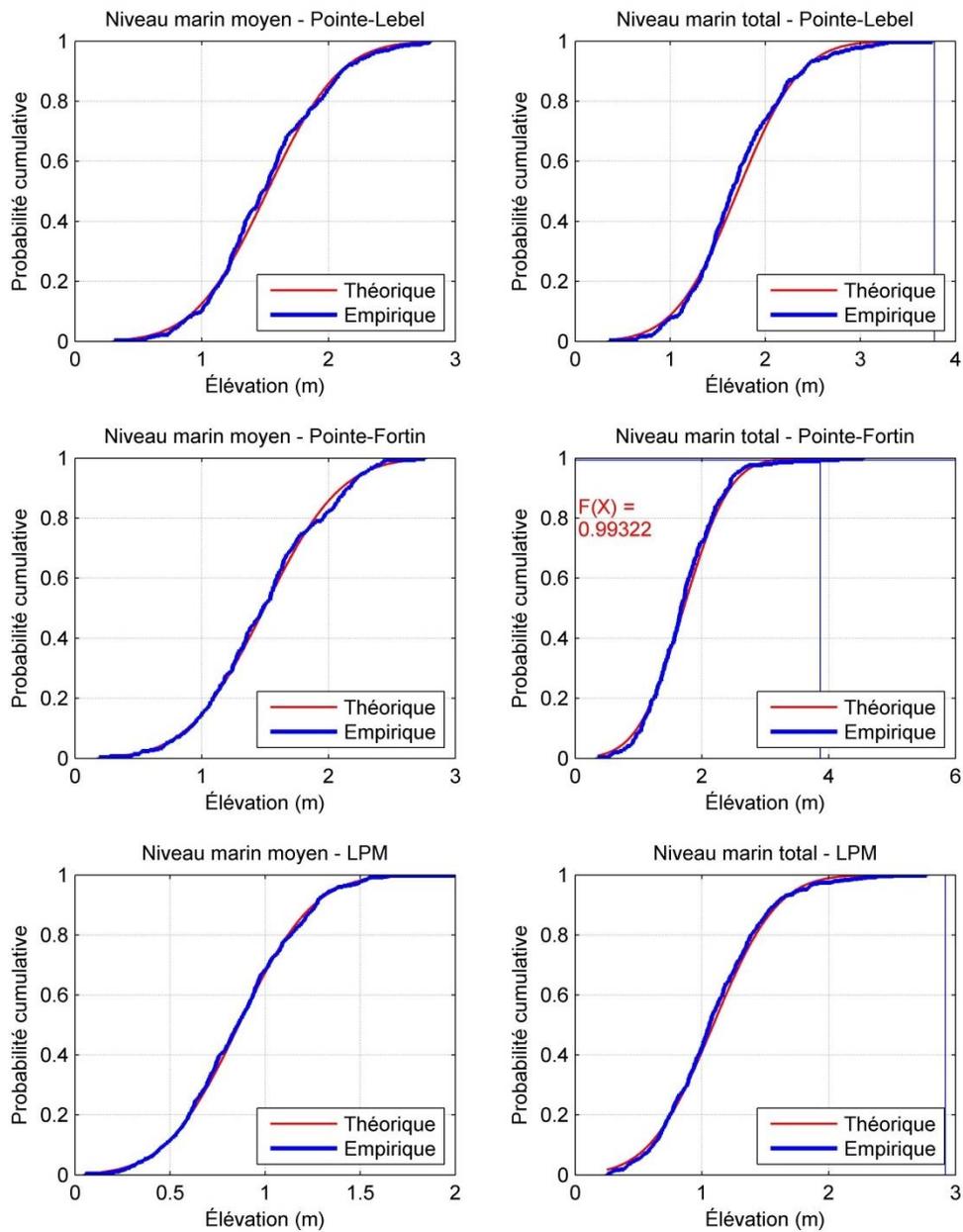


Figure 95. Distribution de probabilité cumulative des valeurs de pics de niveaux marins total et moyen à Pointe-Lebel, Pointe-Fortin et Longue-Pointe-de-Mingan. S'il y a surpassement de la LG, la probabilité de non-dépassement est indiquée dans les graphiques du bas.

**Tableau 29. Probabilité de dépassement des limites par les
niveaux marins moyens aux sites instrumentés**

Sites	F(x) niveau marin moyen			1/F(x) niveau marin moyen		
	0-2 ans	LHEB	LG	0-2 ans	LHEB	LG
Cacouna	0	0	0	0	0	0
Cap-des-Rosiers	0,984	0	0	1,016	0	0
Pointe-Fortin	0,997	0	0	1,003	0	0
Maria	0	ND	0	0	0	0
Trois-Pistoles (Cap-Marteau TP)	0	0	0	0	0	0
Trois-Pistoles (Cap-Marteau FL)	ND	0	0	ND	0	0
Longue-Pointe-de-Mingan	0	0	0	0	0	0
Paspébiac	0	0	0	0	0	0
Penouille	0	0	0	0	0	0
Pointe-Lebel	0,994	0	0	1,006	0	0
Saint-Omer	0	0	0	0	0	0
Saint-Ulric	0	ND	0	0	0	0
Saint-Siméon	0,990	0	0	1,010	0	0
Tourelle	0	0	0	0	0	0

**Tableau 30. Probabilité de dépassement des limites par les
niveaux marins totaux aux sites instrumentés**

Sites	F(x) niveau marin total			1/F(x) niveau marin total		
	0-2 ans	LHEB	LG	0-2 ans	LHEB	LG
Cacouna	0	0	0	0	0	0
Cap-des-Rosiers	0,720	0	0,997	1,390	0	1,003
Pointe-Fortin	0,976	0,997	0,993	1,024	1,003	1,007
Maria	0,993	ND	0	1,008	ND	0
Trois-Pistoles (Cap-Marteau TP)	0,979	0,979	0,993	1,022	1,022	1,007
Trois-Pistoles (Cap-Marteau FL)	ND	0,971	0,971		1,029	1,029
Longue-Pointe-de-Mingan	0,983	0,996	0	1,017	1,004	0
Paspébiac	0,946	0,993	0,993	1,058	1,007	1,007
Penouille	0,977	0	0	1,023	0	0
Pointe-Lebel	0,961	0	0	1,040	0	0
Saint-Omer	0,994	0	0,997	1,006	0	1,003
Saint-Ulric	0,980	ND	0	1,020	ND	0
Saint-Siméon	0,936	0,994	0,984	1,068	1,006	1,016
Tourelle	0,987	0	0	1,013	0	0

Le dépassement du niveau de récurrence 2 ans par le niveau marin moyen sur la période de mesures est observé sur quatre sites : Cap-des-Rosiers, Pointe-Fortin, Pointe-Lebel et Saint-Siméon. Les probabilités de dépassement varient entre 0,3% (Pointe-Fortin) et 1,6% (Cap-des-Rosiers). Les LHEB et les LG pour ces sites n'ont pas été dépassés par les niveaux marins moyens sur les séries temporelles enregistrées ; il n'y a donc pas de probabilité de dépassement de ces deux limites par le niveau marin moyen (tableau 29).

En intégrant les mesures de vagues (tableau 30), le niveau de récurrence 2 ans est dépassé par les niveaux marins totaux dans la quasi-totalité des sites instrumentés ; seul le site de Cacouna n'enregistre pas de dépassement de ce niveau. Les probabilités de dépassement varient entre 0,6% (à Saint-Omer) et 6,8% (à Saint-Siméon). Cap-des-Rosiers montre une probabilité de dépassement du niveau de récurrence 2 ans particulièrement élevée, qui s'élève à 39,0%. Six sites montrent un dépassement de la LHEB ; sept sites affichent un dépassement de la LG. Les probabilités de dépassement de la LHEB et de la LG varient entre 0,3% (à Pointe-Fortin pour la LHEB ; à Cap-des-Rosiers et Saint-Omer pour la LG) et 2,9% (sur la flèche littorale de Cap-Marteau).

3.6.5. Analyse de dépassement des limites à la côte

Les analyses de dépassement des limites montrent que la méthode par calcul de période de retour de 2 ans positionne une limite en-deçà des niveaux atteints par l'effet des vagues et du niveau d'eau (avec surcote) combinés (NET) pour la plupart des sites. Or, plus on s'éloigne du golfe, vers l'amont du fleuve, les vagues sont moins importantes et le marnage acquiert une amplitude plus élevée. Pour cette raison, les limites positionnées en amont du fleuve ont été moins dépassées que celles en aval, subissant un climat de vagues plus énergétique.

La marée laisse des traces sur une plage. Plus le marnage est important, plus l'effet morphogène de la marée sur la zone intertidale est marqué. Cet aspect est d'autant plus important que le ratio de l'amplitude marégraphique (marnage) sur la hauteur des vagues est élevé : pour une vague de hauteur donnée (H), plus le ratio marnage/H est élevé, plus l'effet de la marée est important comparativement à l'effet des vagues sur une plage. Ce paramètre se nomme le marnage relatif (RTR) (Masselink, 1993). Règle générale, le rôle de la marée dans les processus morphodynamiques côtiers est insignifiant lorsque le RTR est inférieur à 3 (Masselink, 1993). Cependant, le rôle de la marée augmente encore plus avec la diminution du rôle des vagues. Dans le Saint-Laurent, la majorité des sites côtiers est plutôt sous une forte prédominance des vagues en période de fortes vagues (le RTR est ici estimé à partir des vagues maximales au large simulées).

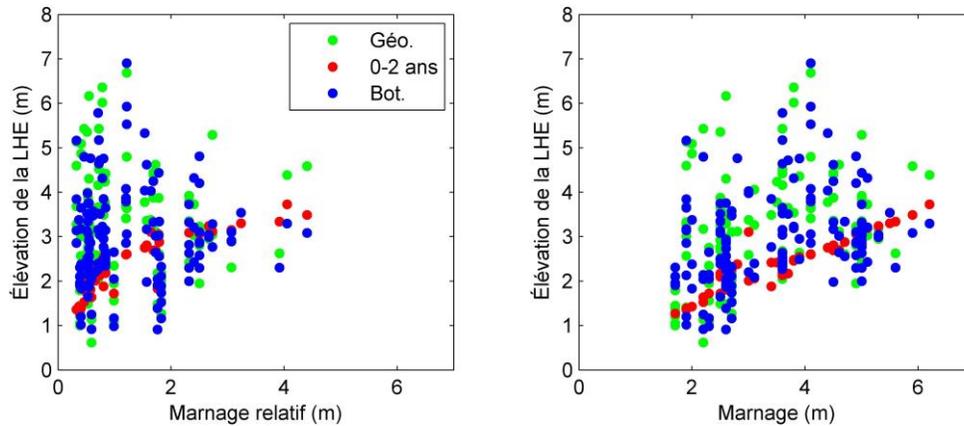


Figure 96. Élévation des limites en fonction du marnage relatif (RTR) et du marnage (m) pour l'ensemble des sites étudiés, excluant les Îles-de-la-Madeleine : Géo. réfère à la LG ; 0-2 ans réfère au niveau de récurrence 2 ans ; et Bot. réfère à la LHEB.

La tendance des surpassements n'est pas linéaire le long de la côte même si un seuil semble s'établir autour d'un marnage de 3 mètres (figure 97). Des sites instrumentés en zone à marnage faible (entre 2 et 2,3 m) seraient nécessaires pour augmenter l'échantillon et établir véritablement la zone de transition séparant un régime côtier à prédominance marégraphique ou principalement contrôlé par les vagues. Le RTR est un indice parmi tant d'autres pour caractériser la morphodynamique d'une plage. Cette dernière est le résultat d'une combinaison de facteurs morphogènes (ex. vitesse de chute adimensionnelle ou paramètre de Gourlay, taille des grains, pente de plage, type de déferlement, présence ou absence de barres, *surf scaling parameter*, nombre d'Iribarren, etc. (Short, 1998)). Dans le cas présent, des variations des niveaux d'eau le long du Saint-Laurent, le marnage – de micro- à macro-tidal –, semble être un critère important conditionnant la limite d'influence des forçages hydrodynamiques sur la plage.

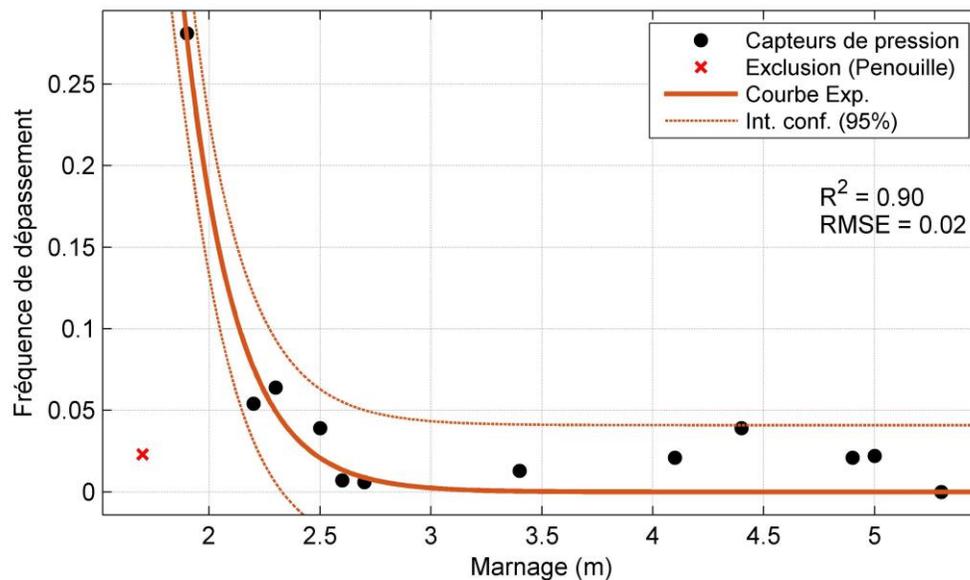


Figure 97. Fréquence de dépassement du niveau de récurrence 2 ans selon le marnage

De par la configuration du Saint-Laurent, les niveaux de récurrence 2 ans sont pertinents dans un contexte où le marnage est élevé et où les vagues sont faibles. Ce qui est logique puisque les cotes sont fonction des niveaux maximums annuels enregistrés à une station marégraphique donnée et ne tiennent pas compte des vagues. Dans les zones où le marnage est faible et les vagues ont une amplitude élevée, on se situe davantage dans le golfe du Saint-Laurent et les plages sont ouvertes sur des fetchs plus longs qui engendrent des vagues plus fortes. Les niveaux de récurrence 2 ans y sont plus fréquemment surpassés, comme à Cap-des-Rosier, et donc inadéquats. C'est dans ces zones que la LG semble la plus appropriée.

Étant directement obtenus à partir des séries temporelles aux marégraphes, les niveaux de récurrence 2 ans (figure 98, en bas à droite) sont incontestablement rapides à mettre en place puisqu'ils se calculent rapidement. Par contre, ils ne sont corrélés avec aucune autre limite si on se fie aux sites globaux (avec et sans capteurs) et ce, peu importe le marnage (figure 98).

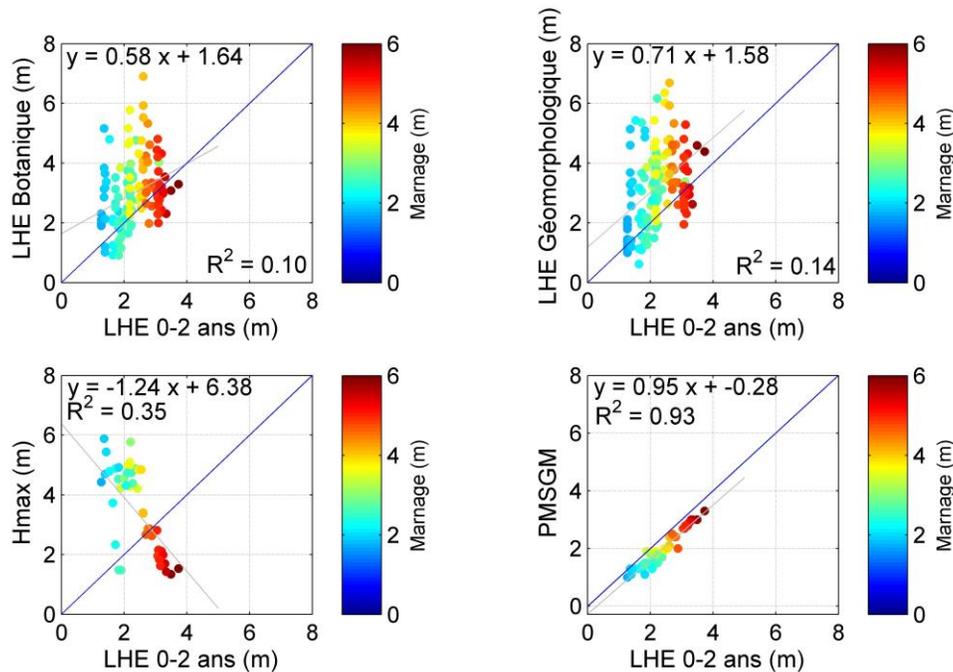


Figure 98. Corrélation entre la LHEB (LHE Botanique), la LG (LHE Géomorphologique), la hauteur des vagues au large (Hmax), la PMSGM et le niveau de récurrence 2 ans (LHE 0-2 ans) sans les vagues pour l'ensemble des sites.

Ce qui ressort davantage des données analysées est la relation qui existe entre les LG et les LHEB et ce, indépendamment du marnage (figure 99). Ces deux interprétations de la position des limites semblent donc toutes deux explicatives des mêmes phénomènes environnementaux sur la plage. Ce lien est assez visuel : la corrélation est faible (0,54) et l'ordonnée à l'origine de la régression est de l'ordre de 97 cm, mais celle-ci semble forcée par un grand nombre de points dans les élévations des limites se situant autour de 2,5 m. Davantage de sites d'étude à fort marnage en amont du fleuve permettrait d'éclaircir cette relation.

En ce qui concerne l'effet des vagues, en aucun cas les vagues maximales au large entre 1980 et 2014 n'expliquent le positionnement des limites. Jusqu'à maintenant, ces analyses ne mettent cependant pas en relation les vagues à la côte.

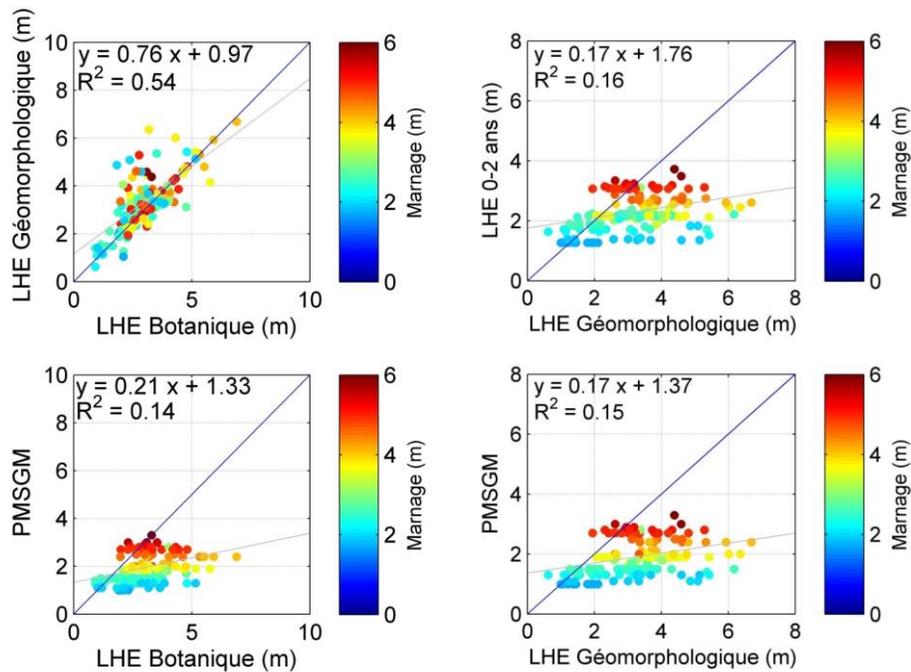


Figure 99. Corrélation entre la LG (LHE Géomorphologique), la LHEB (LHE Botanique) et le niveau de récurrence 2 ans (LHE 0-2 ans) (en- haut) et la PMSGM la LG et la LHEB (en-bas) pour l'ensemble des sites.

La figure suivante montre la relation entre le niveau marin total (NMT) maximal enregistré aux capteurs et le niveau de récurrence 2 ans ajustée grâce à l'addition d'un paramètre de vagues. Ce sont donc des conditions environnementales énergétiques observées aux capteurs *in situ*. Quatre paramètres sont sélectionnés ici afin de définir une méthode hydrodynamique côtière adaptée : la hauteur maximale des vagues au large, la hauteur significative moyenne des vagues à la côte mesurée aux capteurs *in situ*, la hauteur significative maximale des vagues mesurée à la côte aux capteurs *in situ* et le 95^e percentile de la hauteur significative des vagues mesurée à la côte aux capteurs *in situ*. Il apparaît possible d'ajuster la méthode hydrologique actuelle (niveau de récurrence 2 ans) en ajoutant une composante liée aux vagues à la côte, principalement les vagues maximales à la côte (graphique du bas à gauche sur la figure 100) pour obtenir une méthode hydrodynamique côtière adaptée. On observe qu'en ajoutant la valeur de H_s maximale à la côte au niveau de récurrence 2 ans, la corrélation avec le NMT ($R^2=0,86$; RMSE = 37 cm) est probante. Il existe cependant un biais quasi linéaire de 44 cm (surprédiction).

En comparant les différentes limites (niveau de récurrence 2 ans, LHEB et LG) et les niveaux obtenus par une méthode hydrodynamique côtière (niveau de récurrence 2 ans additionné de la hauteur significative de vague maximale à la

côte), il est possible d'établir un lien assez explicite entre chaque limite (figure 100). La relation la plus forte ($R^2 = 0,77$) est celle qui associe la LG et la méthode hydrodynamique côtière adaptée, ce qui appui l'hypothèse selon laquelle il est possible d'ajuster une méthode hydrologique statistique afin de mieux représenter les processus morphodynamiques sur la côte.

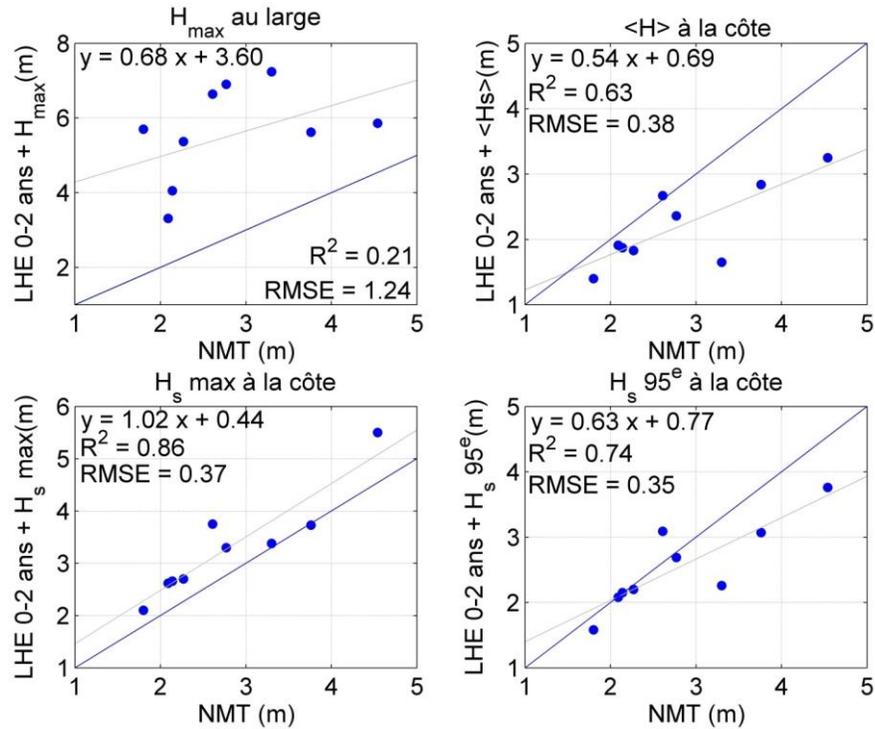


Figure 100. Relation entre le niveau de récurrence 2 ans (LHE 0-2 ans) auquel est ajouté un paramètre de vague au large ou à la côte et le niveau marin total maximal observé à la côte.

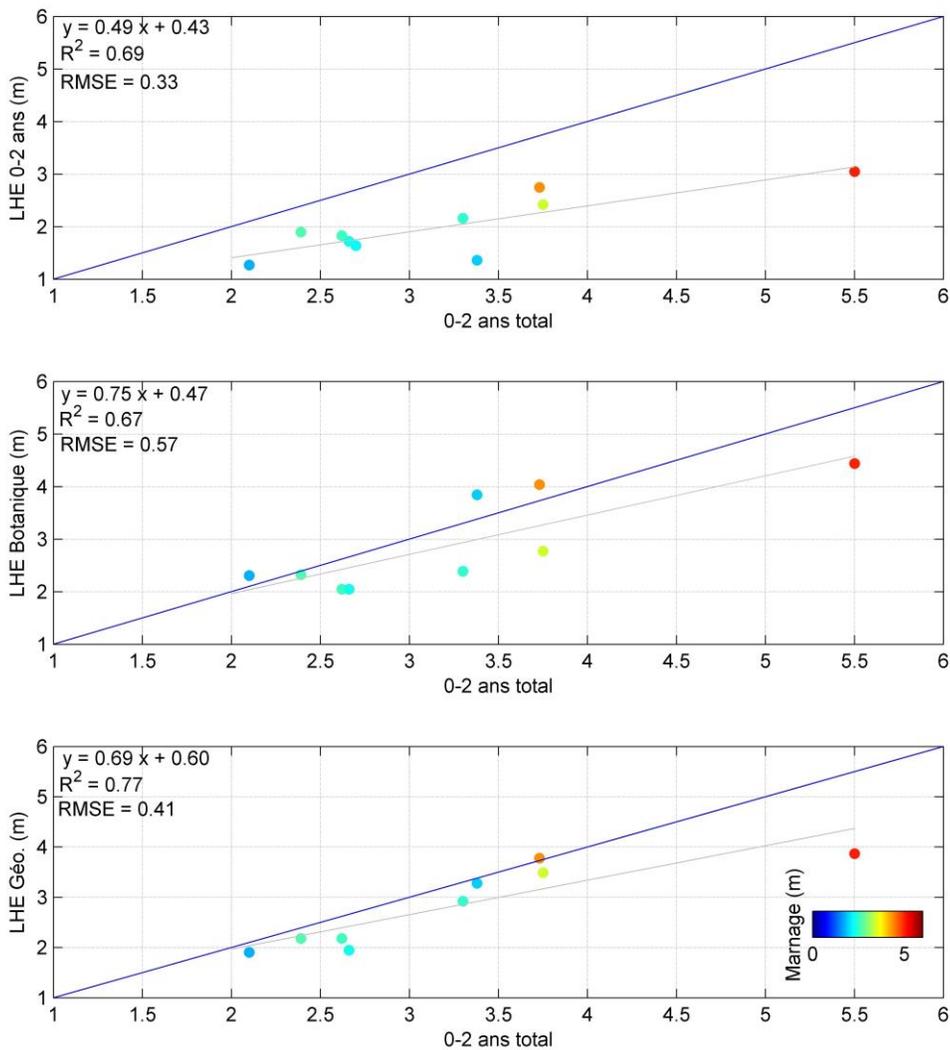


Figure 101. Relations entre les différentes limites et le niveau déterminé par une méthode hydrodynamique côtière (0-2 ans total), qui intègre l'effet des vagues à la côte.

Bien qu'il semble possible d'ajuster la méthode hydrologique actuelle (niveau de récurrence 2 ans) en y intégrant les vagues (figure 101), la figure suivante montre que la LG et la LHEB, étant elles-mêmes corrélées entre elles (voir le graphique en haut à gauche sur la figure 99), se rapprochent le mieux du NMT observé à la côte, soit le niveau maximal observé en intégrant les vagues au niveau d'eau ; les relations entre ces limites sont très bonnes. Les écarts moyens entre les valeurs de niveaux d'eau incluant les vagues (le niveau maximum observé) et le positionnement vertical d'une limite, tant botanique que

géomorphologique, sont respectivement de -0,05 m et -0,11 m. Ces incertitudes sont nettement inférieures à celles associées au niveau de récurrence 2 ans (0,75 m). Ainsi, en plus de présenter une relation plus faible ($R^2 = 0,59$) avec les NMT, l'incertitude est plus élevée.

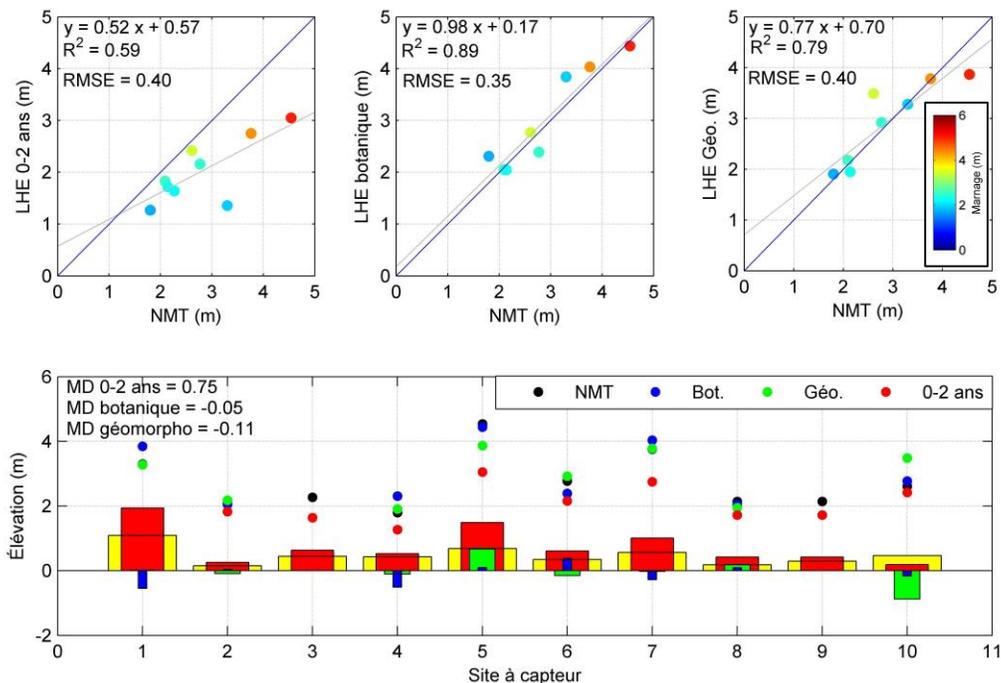


Figure 102. Relations entre les altitudes des limites et les niveaux marins totaux maximaux à la côte (en-haut). Le graphique du bas représente, pour chaque capteur (axe horizontal), l'élévation de chaque limite (sous forme de points) et l'écart qui les sépare du niveau marin total au capteur (bandes verticales). La moyenne des écarts (MD) est représentée par la bande jaune et est inscrite dans le coin supérieur gauche du panneau inférieur. Les écarts absolus entre le NMT et chaque type de limite sont représentés en rouge (niveau de récurrence 2 ans), vert (LG) et bleu (LHEB).

3.6.6. Limites et ouvertures potentielles

L'objectif spécifique 3 visait à évaluer la possibilité d'intégrer le jet de rive aux méthodes de détermination de la LHE à partir des cotes de récurrence 2 ans. À la lumière des résultats de l'analyse des niveaux d'eau atteints sur les plages étudiées, on constate qu'un des paramètres fortement explicatifs du positionnement de la LG est effectivement le jet de rive (*runup*). Ce paramètre, bien qu'empiriquement calculable par ajustement statistique pour un site donné, ne peut être généralisable sur l'ensemble des côtes du Saint-Laurent puisque

des données de validation terrain sont nécessaires. Opérationnellement, cette solution semble difficilement envisageable. De plus, les niveaux maximaux atteints (moyens) par le jet de rive sont souvent nettement supérieurs aux cotes préexistantes puisqu'ils intègrent généralement les plus hauts jets de rive de la série : en ce sens, il s'agit d'une cote très pessimiste qui positionnerait une LHE trop haute sur la côte et qui, parallèlement, serait beaucoup plus élevée que l'emplacement réel des espèces végétales incluses dans la méthode botanique de la PPRLPI. Intégrer le jet de rive à la méthode hydrologique actuelle apparaît donc improbable. Il apparaît cependant possible de prendre en considération le *wave setup* dans une éventuelle analyse d'un niveau de récurrence 2 ans. En effet, les données récoltées au cours de ce projet ont montré l'importance de ce phénomène qui se produit à la suite du déferlement des vagues à l'approche de la côte, provoquant un rehaussement de la nappe d'eau moyenne sur le littoral. En le calculant sur une série temporelle de vagues au droit du site en question, il devient possible d'ajouter le *setup* au niveau de récurrence 2 ans déjà établi par le CEHQ – à condition de sélectionner une loi d'ajustement statistique cohérente avec les données, soit par la sélection d. Cette approche pourrait se réaliser tant en bordure de l'estuaire moyen que maritime, tout en étant ajustée pour un climat de vagues plus important dans le golfe.

4. RECOMMANDATIONS

Les recommandations ressortant de l'étude effectuée dans le cadre du présent projet concernent les méthodes prévues à la PPRLPI ainsi que l'aménagement des zones côtières qui découle de la détermination d'une LHE en milieu côtier. La définition et la gestion de la rive pour le domaine maritime restent fondamentales en vue de répondre aux objectifs visés par cette politique gouvernementale.

En ce qui a trait aux méthodes prévues à la PPRLPI, nous recommandons de prioriser une approche basée sur des critères éco-géomorphologiques pour le domaine maritime dans l'ensemble de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent, incluant l'archipel des Îles-de-la-Madeleine. Il reste néanmoins qu'une méthode alternative doit être prévue à la politique pour des cas ou des contextes particuliers où la méthode éco-géomorphologique n'est pas applicable.

Il a été observé que la méthode hydrologique actuelle utilisant le niveau de récurrence 2 ans, qui n'inclut pas l'effet des vagues, n'était pas adéquate en milieu côtier le long de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent. Ce niveau statistique est fréquemment surpassé par les niveaux d'eau et le jet de rive des vagues. Ce phénomène est d'autant plus fréquent vers l'aval du Saint-Laurent. Qui plus est, les niveaux officiels disponibles datent de 1986 et n'intègrent pas la hausse récente du niveau marin relatif. Ces données ne sont d'ailleurs pas disponibles sur l'ensemble du territoire (ex. inexistantes aux Îles-de-la-Madeleine) et leur fiabilité reste locale étant fonction de la proximité de la jauge de marée. Des problématiques liées à l'aménagement et aux aléas côtiers sont nécessairement exacerbées par l'utilisation de ce type de cote. Nous recommandons d'ajuster cette méthode pour le domaine maritime dans l'application de la PPRLPI.

L'ajustement de la méthode hydrologique actuelle (récurrence 2 ans) comporte deux éléments majeurs. D'abord, les niveaux de récurrence 2 ans doivent être redéfinis sur la base de données marégraphiques actualisées et récentes. Celles-ci doivent être déterminées pour l'ensemble du territoire du Québec maritime. En second lieu, l'effet des vagues à la côte doit être ajoutée au niveau marégraphique de récurrence 2 ans. Il a été observé localement qu'une LHE est représentative de la dynamique côtière qu'en ajoutant au niveau marégraphique la hauteur des vagues, qui correspond fidèlement au niveau atteint par le jet de rive sur la côte.

Comme il a été ressorti dans la revue de la littérature, l'intégration des vagues dans ce type de méthode requiert de la modélisation. La portée du jet de rive des vagues est directement liée à la bathymétrie et à la morphologie de la côte localement. Une élévation standardisée à l'ensemble des côtes du Québec maritime est donc difficilement envisageable. Nous recommandons donc de concentrer les efforts au niveau de la modélisation des hauteurs de vagues à la côte. Une élévation verticale conservatrice pourrait toutefois être déterminée à

court terme pour chaque division du Saint-Laurent moyennant la tenue d'une campagne terrain à grande échelle.

L'analyse des séries temporelles mesurées aux 12 sites témoins dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent a permis d'observer que l'altitude des plus hautes vagues enregistrées était significativement corrélée à l'altitude des critères éco-géomorphologiques utilisés pour le positionnement d'une LG sur les côtes basses meubles. Il a été proposé par les intervenants, lors des ateliers 2, d'organiser une campagne de terrain avec la participation conjointe des arpenteurs-géomètres ainsi que des professionnels concernés des ministères et du LDGIZC afin de déterminer localement l'altitude des critères éco-géomorphologiques sur ces types de côtes, avec les outils de précision nécessaires. En adoptant une approche systématique, des altitudes cohérentes avec la dynamique côtière pourraient être déterminées pour différente portion du territoire du Québec maritime et rendues accessibles aux intervenants. Cette solution a l'avantage de rendre des niveaux altitudinaux représentatifs à court terme, en attendant des données issues de la modélisation des vagues à la côte. Ces cotes altitudinales définies pour l'ensemble du Québec maritime permettraient de fournir une méthode alternative à la méthode éco-géomorphologique.

La position de la LG telle que déterminée par la méthode éco-géomorphologique est planimétrique et non altitudinale. En ce sens, des cotes définies par modélisation ou par une campagne terrain sur l'ensemble du territoire sont nécessaires afin d'intégrer des mesures de prévention en vue des changements climatiques. Une altitude de base doit être définie afin d'y ajouter, minimalement, la hausse prévue du niveau marin et les mouvements verticaux de la croûte terrestre.

Nous soulignons ici que les critères éco-géomorphologiques tels que définis dans la méthode proposée par le LDGIZC correspond à une limite entre le littoral et la rive cohérente avec la dynamique côtière. Néanmoins, dans l'optique où la méthode éco-géomorphologique proposée par le LDGIZC ne serait pas retenue, nous recommandons d'apporter certaines modifications à l'application de la méthode botanique experte.

- 1) D'abord, il serait pertinent de ne pas tenir compte de la zone de végétation éparse (haute-plage) dans le calcul de prédominance des plantes terrestres sur les plantes aquatiques, tel que prévu dans la méthode botanique experte actuelle. En retirant cette zone quant à l'application de la méthode botanique experte, la LHEB ne pourrait pas être positionnée dans la zone atteinte par les houles de tempêtes normales. Les transects d'inventaire de végétation devraient donc débuter au front de la végétation dense ;
- 2) Parmi les méthodes de détermination de la LHE prévues à la PPRLPI, il y a celle relative aux côtes où un mur de soutènement a été érigé. En milieu côtier, les infrastructures de protection sont variées : enrochement, mur, muret, gabion, caissons, etc. L'intégration des autres

ouvrages de protection dans cette méthode relative aux infrastructures permettraient d'éviter toute ambiguïté ;

- 3) Finalement, dans l'application de la méthode botanique experte, nous avons remarqué que plusieurs noms latins pouvaient être attribuables à une seule espèce de plante. Par exemple, dans la liste des espèces de plantes humides de la note explicative de la méthode botanique experte de la PPRPLPI du MDDELCC (2015b), la spartine pectinée se retrouve sous le nom latin *Spartina pectinata*. Toutefois, le terme *Sporobolus michauxianus* est également accepté pour désigner cette espèce (Peterson et al., 2014). Pour éviter toute confusion dans l'identification des plantes et le calcul de prédominance, nous recommandons de dresser une liste comportant minimalement le nom latin et le nom usuel français, en plus du statut hydrique. La liste dressée par Lichvar et al. (2016), qui présente le nom scientifique latin ainsi que le nom usuel anglais, peut servir d'exemple.

Quelle que soit la méthode utilisée pour déterminer une LHE en milieu côtier, il ressort de notre analyse que même localement, l'altitude d'une LG ou d'une LHEB est variable. Le type de côte est un facteur important relatif à cette variabilité. Effectivement, nous avons observé que l'altitude des limites était significativement moins élevée sur les côtes à flèches littorales. En ce sens, la rive déterminée à partir de la position d'une LG ou d'une LHEB sur ce type de côte présente une vulnérabilité accrue par rapport à un autre type de côte. Nous recommandons de revoir minimalement la largeur de la bande riveraine, voire les règlements d'aménagement et de zonage, pour toutes les côtes à flèche littorale et de restreindre le développement et les constructions le long de ces types de côtes.

La zone côtière reste dynamique et le positionnement d'une ligne dans ce milieu ne peut être fixe et durable dans le temps. Le positionnement d'une LHE reste ponctuel, reflétant l'état de la côte à un moment donné. Selon nous, cette problématique se résout par l'implantation d'outils et de règlements d'aménagement et de gestion des risques cohérente avec la dynamique côtière et l'espace que les écosystèmes ont besoin pour bouger dans le temps. Il faut prévoir au niveau législatif que cette ligne, définie dans un milieu dynamique, peut bouger.

Notre mandat concernait la détermination d'une limite entre la rive et le littoral dans une optique de protection des écosystèmes marins et côtiers. Cette ligne de référence est intrinsèquement liée à la gestion et à l'aménagement de la rive et de la zone côtière. Il a été soulevé à plusieurs reprises lors des ateliers 2 qu'une bande de 10 à 15 m derrière la LHE (rive), applicable partout, semblait incohérente en milieu côtier. Une bande de 10 ou 15 m sur la rive d'une terrasse de plage n'aura pas la même signification que sur une côte à falaise. À titre d'exemple, la Politique de protection des zones côtières pour le Nouveau-Brunswick (Ministère de l'Environnement et des Gouvernements locaux, 2002) fixe à 30 m la largeur de la marge côtière s'étendant au-delà de la LHE. Cette

marge est de 1 km en Nouvelle-Galles du Sud (Australie ; NSW Government, 1997) et de 5 km (ou à une altitude minimale de 10 m) au Queensland (Australie ; *Coastal Protection and Management Act 1995*). Une limite supérieure peut également être déterminée à partir de projection de niveaux pouvant être atteints par les agents hydrodynamiques marins ou selon différents scénarios/événements déterminés.

Un projet piloté par le LDGIZC est actuellement en branle relativement à la résilience des zones côtières. Celui-ci pourra servir de référence quant à la révision de la largeur de la bande riveraine pour le domaine maritime et de l'adapter en fonction du type de côte et de la dynamique côtière locale.

5. CONCLUSION

La dynamique spécifique au milieu maritime côtier justifie l'application d'une méthode adaptée quant à la détermination de la ligne des hautes eaux telle que définie dans la PPRLPI. La présente étude propose une méthode basée sur des critères éco-géomorphologiques afin de déterminer une limite entre le littoral et la rive pour le domaine maritime.

L'analyse comparative des LHEB et des LG déterminées sur 132 profils réalisés à l'échelle de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent a permis de déterminer que la localisation, le type de côte et l'état de la côte étaient des facteurs déterminants quant à l'altitude et à la position relative entre les deux limites. Dans une optique de gestion des littoraux et de protection des écosystèmes côtiers, la position de chacune des limites par rapport à la mer reste l'information la plus pertinente. La succession végétale sur les côtes de la côte nord du golfe tend à induire une LHEB plus éloignée de la mer que la LG. Le scénario inverse est observé sur la côte sud du golfe alors que la LG est la plus éloignée de la mer. Étant donné la nature des critères éco-géomorphologiques définis, ce dernier scénario implique que la LHEB est positionnée au niveau de la haute-plage dans bien des cas et, donc, atteinte par les houles de tempêtes normales. La position de la LHEB sur les profils de côte peut s'avérer très variable à l'échelle du Québec maritime.

La méthode éco-géomorphologique répond certes à certaines problématiques soulevées dans le milieu lors de la tenue des ateliers avec les intervenants. Elle écarte le besoin d'avoir des connaissances poussées en botanique ou la nécessité d'engager des professionnels ayant de telles compétences. L'utilisation du terme limite géomorphologique (LG) amoindrit la confusion quant aux multiples lignes déterminées sur les littoraux du Québec. Dans l'optique où plusieurs intervenants sont appelés à déterminer ou à utiliser une limite entre le littoral et la rive dans l'application de la PPRLPI, il nous semble que les critères éco-géomorphologiques sont plus évidents à localiser sur le terrain et que la nécessité de détenir de bonnes connaissances en botanique, inhérente à la méthode botanique experte, est évincée. Qui plus est, à la lumière des résultats obtenus, une LG est moins variable latéralement, c'est-à-dire plus linéaire le long de la côte. En se référant à la littérature scientifique, il appert également que les critères éco-géomorphologiques définis dans le cadre de cette étude représentent adéquatement la limite entre l'écosystème marin et l'écosystème terrestre, soit entre la rive et le littoral ; elle est cohérente avec la morphologie et la dynamique intrinsèques aux milieux côtiers maritimes. Notons d'ailleurs qu'elle fournit une méthode adaptée au contexte particulier de l'archipel des Îles-de-la-Madeleine.

Les problématiques à l'origine du projet référaient notamment à la difficulté d'appliquer une réglementation sur la base d'une limite fortement mobile sur le littoral du Saint-Laurent. La position d'une ligne des hautes eaux suivant les critères éco-géomorphologiques proposés dans le présent projet reste certes mobile dans le temps et l'espace étant donné le caractère dynamique des zones

côtières et ce, particulièrement sur les côtes sableuses. Néanmoins, les critères proposés coïncident avec le sommet de l'estran ou de la haute-plage, c'est-à-dire avec le front de l'arrière-plage ou le trait de côte. Tel que souligné par Morton et Speed (1998) dans leur étude, ces critères étant plus éloignés de la mer, permettent d'optimiser la stabilité de la position d'une LG par rapport à un niveau marégraphique ou à une LHEB déterminée au niveau de la haute-plage. La position de ces critères sur les côtes basses répond aux plus hauts niveaux d'eau et de vagues dans des conditions normales (incluant les tempêtes normales). Dans leur étude, Liu et al. (2014c) affirmaient d'ailleurs que le pied d'une dune frontale et la ligne de végétation dense étaient les indicateurs optimaux en gestion des zones côtières puisque ces éléments tiennent compte de la portée des vagues. Dans le cas des falaises, la position de la LG correspond au trait de côte qui constitue aussi la limite supérieure d'influence des agents hydrodynamiques (embruns, jets verticaux) et donc la limite de l'écosystème côtier. Dans cette perspective la face de la falaise devrait donc faire partie du littoral.

La fluctuation de la végétation côtière reste un enjeu dans l'application de la méthode éco-géomorphologique proposée par le LDGIZC dans le cadre de ce projet. La limite entre le littoral et la rive peut difficilement être réduite à une simple ligne de division et doit davantage être considérée comme une frange à l'intérieur de laquelle le rivage de la mer peut évoluer à court terme. Néanmoins, le front de la végétation dense, utilisé comme critère éco-géomorphologique, est conditionné par les plus hauts niveaux d'eau, voire les houles de tempêtes exceptionnelles, et reste davantage pérenne que la végétation éparse, à partir de laquelle la LHEB peut être déterminée. À notre avis, cet enjeu de mobilité se résout par une révision des outils de gestion des zones côtières pour lesquels la limite éco-géomorphologique peut constituer la ligne de base. En ce sens, il serait pertinent de revoir la largeur des bandes riveraines pour le domaine maritime et de débiter une réflexion quant à l'équivalence des systèmes côtiers, notamment des côtes à flèche littorale, par rapport à la protection des écosystèmes et à l'aménagement.

La présente étude s'intéressait également à la méthode hydrologique actuelle également prévue à la PPRLPI (niveau de récurrence 2 ans). Des instruments de mesure ont été installés sur 12 sites le long de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent afin d'évaluer la possibilité d'adapter la méthode hydrologique actuelle en y intégrant notamment l'effet des vagues à la côte afin de refléter concrètement la dynamique côtière. Il ressort que le niveau de récurrence 2 ans est fréquemment surpassé par les niveaux d'eau, même sans considérer la hauteur des vagues à la côte pour certains sites étudiés dans l'estuaire maritime et le golfe du Saint-Laurent. Le niveau de récurrence 2 ans étant incidemment souvent localisé sur le haut estran implique que sa position planimétrique est variable en fonction des changements de la morphologie de la plage. La fréquence de dépassement par les niveaux d'eau moyens et totaux semble liée au marnage le long du Saint-Laurent. La prédominance des marées ou des vagues caractérisant le régime côtier, qui varie selon la localisation, semble donc être un facteur déterminant quant au dépassement du niveau de récurrence 2 ans. Autrement dit, ce niveau statistique sera davantage adéquat

dans les secteurs où le régime côtier est principalement influencé par la marée (milieu macrotidal), soit en amont du Saint-Laurent ; il sera particulièrement inapproprié dans les secteurs où le régime est contrôlé par les vagues, soit en aval du Saint-Laurent (estuaire maritime et golfe).

Le projet visait à évaluer la concordance entre les limites basées sur les méthodes actuelles et celles basées sur les méthodes adaptées par le LDGIZC. Les analyses montrent d'abord que les limites déterminées à l'aide des méthodes botanique experte et éco-géomorphologique répondent, globalement, toutes deux aux mêmes agents environnementaux sur les côtes. Le niveau de récurrence 2 ans ne concorde quant à lui pas du tout avec ces deux limites. La faible correspondance entre la limite botanique et le niveau de récurrence 2 ans, causant des problèmes d'interprétation et un flou légal dans l'application des normes, avait d'ailleurs été souligné dans les problématiques à l'origine du projet. Les niveaux marins totaux mesurés sur des séries temporelles sur 12 sites témoins montrent effectivement une sous-estimation du niveau de récurrence 2 ans par rapport au niveau réellement atteint par le jet de rive sur la côte.

Une modélisation calibrée n'a pas pu être développée dans le cadre du présent projet afin de développer une méthode hydrodynamique côtière permettant d'établir des niveaux de référence statistiques dans l'ensemble du Québec maritime. Nous sommes toutefois en mesure de confirmer la possibilité d'adapter la méthode hydrologique actuelle en y intégrant les hauteurs significatives maximales des vagues mesurées à la côte. En ajoutant ces mesures *in situ* au niveau de récurrence 2 ans statistique actuel, on obtient une bonne concordance entre ce niveau adapté et le niveau marin total mesuré à la côte. Les limites obtenues grâce aux méthodes botanique experte, éco-géomorphologique et hydrodynamique côtière sur les 12 sites d'étude sont bien corrélées entre elles et, donc, représentent bien le niveau marin total mesuré *in situ*. La corrélation semble davantage probante entre la LG et le niveau issu d'une méthode hydrodynamique adaptée.

L'intégration des facteurs inhérents aux changements climatiques dans une politique de gestion des zones côtières est un enjeu des plus actuels considérant notamment le cadre bâti et les écosystèmes localisés en milieu maritime au Québec. À la lumière des résultats obtenus dans le cadre du présent projet, des LG déterminées sur les côtes basses meubles pourraient constituer une ligne de référence à laquelle ajouter des données relatives aux scénarios de prévision relatif aux changements climatiques, soit notamment la hausse prévue du niveau marin et les variations verticales de la croûte terrestre à l'échelle régionale. En effet, l'altitude de la LG est bien corrélée aux niveaux marins totaux mesurés sur les sites instrumentés et pourrait donc servir de base. Cela impliquerait une vaste campagne terrain sur les côtes du Saint-Laurent afin d'y déterminer, de façon systématique, des altitudes de LG officielles à incorporer dans des plans de gestion des zones côtières intégrant les projections climatiques. Cette solution serait applicable à court terme, alors que la période nécessaire pour modéliser l'effet des vagues à la côte à l'échelle de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent s'avèrerait certainement plus longue.

Enfin, un guide d'application de la méthode éco-géomorphologique telle que développée par le LDGIZC a été rédigé en complément au présent rapport. Celui-ci fournit un outil détaillé aux intervenants ayant à déterminer ou à utiliser la limite entre le littoral et la rive le long de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent.

6. RÉFÉRENCES

- Almar, R., Ranasinghe, R., Sénéchal, N., Bonneton, P., Roelvink, D., Bryan, K. R., Marieu, V., et Parisot, J.-P., 2012. Video-Based Detection of Shorelines at Complex Meso-Macro Tidal Beaches. *Journal of Coastal Research*, 28(5), p. 1040–1048.
- AusencoSandwell, 2011. Climate change adaptation guidelines for sea dikes and coastal flood hazard land use - Guidelines for management of coastal flood hazard land use. Préparé pour British Columbia Ministry of Environment, 45 p.
- Baily, B. 2011. Ordnance Survey data collection and mapping of tidal features. *Sheetlines*, 90, p. 4-17.
- Baker, R.F. et Watkins, M., 1991. Guidance notes for the determination of mean high water mark for land title surveys. Rapport publié par le Professional development committee of the New Zealand Institute of Surveyors. Wellington, Nouvelle-Zélande, 12 p. + annexes.
- Batterson, M. et Liverman, D., 2010. Past and future sea-level change in Newfoundland and Labrador: guidelines for policy and planning. *Current Research (2010)*, Newfoundland and Labrador Department of Natural Resources, Geological Survey, Report 10-1, p. 129-141.
- Bernatchez, P., Arsenault, E., Lambert, A., Bismuth, E., Didier, D., Senneville, S., Dumont, D., Caveen, J., Sévigny, C., Beaudry, J. Bandet, M. 2017. Programme de mesure et de modélisation de la morphodynamique de l'érosion et de la submersion côtière dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (MODESCO), Phase II : rapport final. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, mars 2017, 172 p. + annexe.
- Bernatchez P. et Drejza, S., 2015. Réseau de suivi de l'érosion côtière du Québec maritime - Guide pour les utilisateurs. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières et Chaire de recherche en géoscience côtière. Université du Québec à Rimouski, octobre 2015, 52 p.
- Bernatchez, P., Fraser, C., Friesinger, S., Jolivet, Y., Dugas, S., Drejza, S. et 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, UQAR. Rapport de recherche remis au Consortium OURANOS et au FACC, 256 p.

- Bernatchez, P., Fraser, C., Lefavre, D. et Dugas, S., 2011. Integrating anthropogenic factor, geomorphological indicators and local knowledge in the analysis of coastal flooding and erosion hazards. *Oceans and Coastal Management*, 54, p. 621-632.
- Bazoge, A., Lachance D. et Villeneuve, C., 2014. Identification et délimitation des milieux humides du Québec méridional, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction de l'écologie et de la conservation et Direction des politiques de l'eau, 64 p. + annexes
- Bureau de l'arpenteur général du Québec, 2013. Instructions générales d'arpentage. Ministère des Ressources naturelles, Gouvernement du Québec, Québec, 296 p.
- Boak, E.H. et Turner, I.L., 2005. Shoreline definition and detection: a review. *Journal of Coastal Research*, 21(4), p. 688-703.
- Brebner, J., 1991. A study of ship generated waves in the St. Lawrence River. Department of Civil Engineering, Queens University at Kingston, 16 p.
- Briscoe, J., 1983. The use of tidal datums in the law. *Surveying and Mapping*, 43(2), p. 115-121.
- Brock, J. C., et Purkis, S. J., 2009. The emerging role of lidar remote sensing in coastal research and resource management. *Journal of Coastal Research*, p. 1-5.
- Cariolet, J.M., 2011. Quantification du runup sur un plage macrotidale à partir des conditions morphologiques et hydrodynamiques. *Géomorphologie : relief, processus et environnement*, 1, p. 95-108.
- Cariolet, J.M. et Suanez, S., 2013. Runup estimations on a macrotidal sandy beach. *Coastal Engineering*. 74, p. 11–18
- CBCCL Limited, 2009. The 2009 State of Nova Scotia's coast technical report. Government of Nova Scotia, Halifax, Nova Scotia, 245 p.
- Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, 2015. Analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral - Cahier technique. Éditions du Cerema, Bron, France, 70 p.
- Centre d'études techniques maritimes et fluviales, 2013. Reconnaissance de la limite du rivage de la mer - Intérêt et potentialité de critères morpho-sédimentaires et botaniques. Margny Lès Compiègne, France, 198 p.
- Chini, N.; Stansby, P.K. 2012. Extreme values of coastal wave overtopping accounting for climate change and sea level rise. *Coast. Eng.* 65, 27–37.
- Cole, G.M., 2007. Delineation of coastal boundaries using tidal data. *In: Coastal Areas and Land Administration - Building the Capacity 6th FIG Regional Conference*. San José, Costa Rica.
- Coutts, B.J., 1989. Mean high water as a cadastral boundary. *Ocean and Shoreline Management*, 12(4), p. 309-330.

- D'agnolo, F., 1978. Étude d'érosion ; Partie du Fleuve St-Laurent entre Montréal et Sorel. Garde côtière canadienne, ministère des Transports, 23 p.
- Dauphin, D., 2000. Influence de la navigation commerciale et de la navigation de plaisance sur l'érosion des rives du Saint-Laurent dans le tronçon Cornwall - Montmagny. Rapport final. Service du transport maritime, ministère des Transports du Québec, 103 p. + cartes et annexes.
- Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2006a. Shoreline management plan guidance - Volume 1: Aims and requirements. London, Royaume-Uni, 48 p.
- Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2006b. Shoreline management plan guidance - Volume 2: Procedures. London, Royaume-Uni, 77 p.
- Department of Conservation, 2010. New Zealand Coastal Policy Statement 2010. Wellington, Nouvelle-Zélande, 28 p.
- Department of Environment and Heritage Protection, 2016. Development on land under tidal water. Queensland Government. [En ligne] : <http://www.ehp.qld.gov.au/coastal/development/tidal-land/> (consulté le 08 mars 2016)
- Department of Environment, Climate Change and Water NSW, 2010. Coastal risk management guide - Incorporating sea level rise benchmarks in coastal risk assessments. Sydney, New South Wales, Australie, 8 p.
- Didier, D., Bernatchez, P., Augereau, E., Caulet, C., Dumont, D., Bismuth, E., Cormier, L., Floc'h, F. et Delacourt, C., 2017. LiDAR validation of a video-derived beachface topography on a tidal flat. *Remote Sensing*, 9, p. 826-848
- Didier, D., Bernatchez, P., Boucher-Brossard, G., Lambert, A., Fraser, C., Barnett, R.L., et Van-Wierst, S., 2015. Coastal Flood Assessment Based on Field Debris Measurements and Wave Runup Empirical Model. *Journal of Marine Science and Engeneering*, 3, p. 560-590.
- Dionne, J.-C., 1986. Érosion récente des marais intertidaux de l'estuaire du Saint-Laurent, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 40(3), p. 307-323.
- Direction générale de la prévention des risques, 2014. Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, La Défense, France, 169 p.
- Dolan, R., Hayden, B.P., May, P. et May, S.K., 1980. The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. *Shore and Beach*, 48(4), p. 22-29.
- Donnelly, P., 1968. Shore erosion along waterways - navigation versus natural phenomena. Travaux publics Canada, Ottawa, 29 p.

- Drejza, S., Frisinger, 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 changements climatiques : Caractérisation des côtes, dynamique hydrosédimentaire et exposition des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion, Est du Québec, Volume I, 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 p. + annexes.
- Elemental Sustainability Consulting Ltd, 2012. The Municipal climate change action plan assistant - Learning from others. Préparé pour Service Nova Scotia and Municipal Relations Canada-Nova Scotia Infrastructure Secretariat, 56 p.
- Environment Agency, 2011a. Coastal flood boundary conditions for UK mainland and islands. Project: SC060064/TR2: Design sea levels. Bristol, Royaume-Uni, 133 p.
- Environment Agency, 2011b. Coastal flood boundary conditions for UK mainland and islands. Project: SC060064/TR3: Design swell waves. Bristol, Royaume-Uni, 190 p.
- Fraser, C. et Bernatchez, P., 2006. Caractérisation et évaluation des risques d'érosion et de submersion côtière pour le secteur de la pointe Verte, Maria, Québec. Rapport de recherche remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, UQAR, 44 p.
- Gallien, T.W., O'Reilly, W.C., Flick, R.E. et Guza, R.T., 2015. Geometric properties of anthropogenic flood control berms on southern California beaches. *Ocean and Coastal Management*, 105, p. 35-47.
- Garde côtière canadienne, ND. Érosion des rives par le batillage. [Document PDF] :
http://www.marinfo.gc.ca/Doc/Erosion/Erosion_des_berges_Fr.pdf
(consulté le 21 décembre 2017)
- Gibb, J., Sheffield, A. et Foster, G., 1992. A standardised coastal sensitivity index based on an initial framework for physical coastal hazards information. Science & Research Series No. 55, Publié par Department of Conservation, Wellington, Nouvelle-Zélande, 101 p.
- Giles, Philip Thomas, 1990. The morpho-ecological character of coastal sand dunes on the northern tombolo, les Îles-de-la-Madeleine, Quebec. A research paper submitted to the Department of Geography, McMaster University, 65 p.
- Gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2015. Autorisation pour l'aménagement de zones côtières ou de plages sur les terres de la Couronne. Développement de l'énergie et des ressources. [En ligne] :

- http://www2.gnb.ca/content/gnb/fr/services/services_renderer.201195.Autorisation_pour_l'amenagement_de_zones_cotieres_ou_de_plages_sur_les_terres_de_la_Couronne.html (consulté le 12 février 2016).
- Greenfeld, J., 2002. Analytical solution for the amplitude ratio method for determining mean high water in tidal regions. *Journal of Surveying Engineering*, 128(2), p. 61-75.
- Greenshores, 2009. Coastal shore jurisdiction in British Columbia. Issue Sheet October 2009. [Document PDF] : http://www.salishsea.ca/resources/Riparianrights/Greenshores%20JurisdictionIssueSheet_finalVer4.pdf (consulté le 12 février 2016)
- Guariglia, A., Buonomassa, A., Losurdo, A., Saladino, R., Trivigno, M.L., Zaccagnino, A. et Colangelo, A., 2006. A multisource approach for coastline mapping and identification of shoreline changes. *Annals of geophysics*, 49(1), p. 295-304.
- Guilcher, A., 1954. Morphologie littorale et sous-marine. Presses Universitaires de France, Paris, 216 p.
- Guimarães, P.V., Farina, L., Jr, E.T., Diaz-hernandez, G., et Akhmatkaya, E., 2015. Numerical simulation of extreme wave runup during storm events in Tramandaí Beach, Rio Grande do Sul, Brazil. *Coast. Eng.* 95, p. 171–180.
- Hanslow, D.J., 2007. Beach erosion trend measurement: a comparison of trend indicators. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 50, p. 588-593.
- Hick, S.D., 1984. Tide and current glossary. NOAA National Ocean Service. Rockville, MD.
- Holman R.A., et Stanley J., 2007. The history and technical capabilities of Argus. *Coastal Engineering*, 54, p. 477-491.
- Horton R., Little, C., Gornitz, V., Bader, D. et Oppenheimer, M., 2015. New York City Panel on climate change 2015 Report ; Chapter 2: sea level rise and coastal storms. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1336, p. 36-44.
- Intergovernmental Committee on Surveying and Mapping, 2016. Tidal Interface Compendium of Terms. [En ligne] : http://www.icsm.gov.au/tides/tidal_interface.html (consulté le 06 juin 2016).
- Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group II, 2007. Summary for policymakers. *In: Climate change 2007 : Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, p. 7-22.

- Komar, P.D., 1998. Beach processes and sedimentation. Prentice Hall, Inglewood Cliffs.
- Lichvar, R.W., Banks, D.L, Kirchner, W.N. et Melvin, N.C., 2016. The national wetland plant list: 2016 wetland ratings. *Phytoneuron*, 2016-30, p. 1-17
- Liu, H., Sherman, D., et Gu, S. 2007. Automated extraction of shorelines from airborne light detection and ranging data and accuracy assessment based on Monte Carlo simulation. *Journal of Coastal Research*, 23(6), p. 1359-1369.
- Liu, X., Xia, J., Blenkinsopp, C., Arnold, L. et Wright, G., 2014a. High water mark determination based on the principle of spatial continuity of the swash probability. *Journal of Coastal Research*, 30(3), p. 487-499.
- Liu, X., Xia, J., Wright, G. et Arnold, L., 2014b. A state of the art on High Water Mark (HWM) determination. *Ocean & Coastal Management*, 102, p. 178-190.
- Liu, X., Xia, J., Wright, G., Arnold, L. et Liu, Q., 2014c. Multi-criteria decision making on the position of High Water Mark. *Ocean & Coastal Management*, 102, p. 191-199.
- Longuet-Higgins, M.S. et Parkin, D.W., 1962. Sea waves and beach cusps. *The Geographical Journal*, 128(2), p. 194-201.
- Maritime Safety Queensland, 2016. Notes and definitions. Queensland Government. [En ligne] : <http://www.msq.qld.gov.au/Tides/Notes-and-definitions> (consulté le 08 mars 2016).
- Masselink, G. et Short, A.D., 1993. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: A conceptual beach model. *Journal of Coastal Research*, 9, p. 785-800.
- Ministère du développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 1986. Document de travail RA-86-02, Zones inondables – Fleuve Saint-Laurent, Tronçon Grondines – Sainte-Anne-des-Monts : Calcul des niveaux de récurrence 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans. [Document PDF] [ftp://ftp.mddep.gouv.qc.ca/CEHQ/Fleuve%20St-Laurent/Cotes_Saint-Laurent_1986_Grondines-Sainte-Anne-des-Monts%20\(nord\).pdf](ftp://ftp.mddep.gouv.qc.ca/CEHQ/Fleuve%20St-Laurent/Cotes_Saint-Laurent_1986_Grondines-Sainte-Anne-des-Monts%20(nord).pdf)
- Ministère de l'Environnement et des Gouvernements locaux, 2002. Politique de protection des zones côtières pour le Nouveau-Brunswick. [Document PDF] : <http://www2.gnb.ca/content/dam/gnb/Departments/env/pdf/Water-Eau/PolitiqueProtectionZonesCotieres.pdf> (consulté le 05 avril 2016)
- Ministère des Ressources naturelles, 2014. *Politique sur les terres submergées de la Couronne*. Gouvernement du Nouveau-Brunswick. [Document PDF] : <http://www2.gnb.ca/content/dam/gnb/Departments/nr-rn/pdf/fr/Publications/CLM0142004.pdf> (consulté le 12 février 2016).

- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2015a. Guide d'interprétation, Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, Direction des politiques de l'eau, 131 p.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2008, version révisée, 2015b. Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables. Note explicative sur la ligne des hautes eaux : la méthode botanique experte, 9 p. + annexes.
- Ministry for the Environment, 2008. Coastal Hazards and Climate Change: A guidance manual for local government in New Zealand. Seconde édition. Révisée par Ramsay, D. et Bell, R. (NIWA). Préparée pour le Ministry for the Environment, Wellington, Nouvelle-Zélande, 129 p.
- New Zealand Government, ND. Survey of tidal boundaries. [En ligne] : <http://www.linz.govt.nz/kb/339> (consulté le 15 mars 2016)
- Ministry of Environment, Lands and Parks Land and Water Programs Branch, 1995. Riparian rights and public foreshore use in the administration of aquatic Crown land. Occasional paper no. 5. Province of British Columbia, 22 p.
- Ministry of Water, Land and Air Protection, 2004. Flood hazard area land use management guidelines. Province of British Columbia, 72 p.
- Moore, L.J., Ruggiero, P. et List, J.H., 2006. Comparing mean high water and high water line shorelines: should proxy-datum offsets be incorporated into shoreline change analysis? *Journal of Coastal Research*, 22(4), p. 894-905.
- Morton, R.A. et Speed, F.M., 1998. Evaluation of shorelines and legal boundaries controlled by water levels on sandy beaches. *Journal of Coastal Research*, 14(4), p. 1373-1384.
- National Research Council, 1990. Managing coastal erosion. Washington, DC: National Academy Press, 182 p.
- New South Wales Government, 1997. NSW Coastal Policy 1997. 32 p.
- New Zealand Government, 2013. Interim guideline to sea boundaries and the marine and coastal area (Takutai Moana) Act 2011. Wellington, Nouvelle-Zélande, 23 p.
- Nichols, S.E., 1983. Tidal boundary delimitation. Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, 202 p.

- NOAA Office of Coast Survey, 2013. U.S. Maritime limits & boundaries. [En ligne] : <http://www.nauticalcharts.noaa.gov/csdl/mbound.htm> (consulté le 6 janvier 2016).
- Office of Environment and Heritage NSW, 2013. Guidelines for preparing coastal zone management plans. Sydney, New South Wales, Australie, 26 p.
- Olson, P. et Stockdale, E., 2010. Determining the ordinary high water mark on streams in Washington State. Second Review Draft. Washington State Department of Ecology, Shorelands and Environmental Assistance Program, Lacey, WA, Ecology Publication # 08-06-001.
- Pajak, M.J. et Leatherman, S., 2002. The high water line as shoreline indicator. *Journal of Coastal Research*, 18(2), p. 329-337.
- Parliamentary Commissioner for the Environment, 2015. Preparing New Zealand for rising seas: Certainty and uncertainty. [Document PDF] : <http://www.pce.parliament.nz/media/1380/preparing-nz-for-rising-seas-web-small.pdf> (consulté le 30 mars 2016)
- Pêches et Océans Canada, 2016. Patrimoine océanique du Canada. [En ligne] : <http://www.dfo-mpo.gc.ca/oceans/marinezones-zonesmarines/index-fra.html> (consulté le 11 juillet 2016).
- Peterson, P.M., Romaschenko, K., Arrieta, Y.H. et Saarela, J.M., 2014. A molecular phylogeny and new subgeneric classification of *Sporobolus* (Poaceae: Chloridoideae: Sporobolinae). *Taxon*, 63(6), p. 1212-1243.
- Pinot, J.-P., 1998. La gestion du littoral (tome 1 : littoraux tempérés : côtes rocheuses et sableuses ; tome 2 : littoraux tempérés : littoraux vaseux et embouchures). Institut océanographique, Paris, 759 p.
- Quintin, C., Bernatchez, P., et Jolivet, Y., 2013. Impacts de la tempête du 6 décembre 2010 sur les côtes du Bas-Saint-Laurent et de la baie des Chaleurs. Rapport d'analyse : volume I. Présenté au ministère de la Sécurité publique du Québec. Rimouski.
- Rahmstorf, S., 2007. A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science*, 315, p. 368-370.
- Rahmstorf, S., Foster, G., et Cazenave, A., 2012. Comparing climate projections to observations up to 2011. *Environmental Research Letters*, 7(4), 044035.
- Ramsay, D.L., Gibberd, B., Dahm, J. et Bell, R.G., 2012. Defining coastal hazard zones and setback lines. A guide to good practice. National Institute of Water & Atmospheric Research Ltd, Hamilton, Nouvelle-Zélande, 91 p.
- Richards, W. et Daigle, R., 2011. Scenarios and guidance for adaptation to climate change and sea-level rise - NS and PEI Municipalities. Final Report. Préparé pour Atlantic Canada Adaptation Solutions Association, 78 p.

- Robertson, W., Whitman, D., Zhang, K. et Leatherman, S.P., 2004. Mapping shoreline position using airborne laser altimetry. *Journal of Coastal Research*, p. 884-892.
- Ruggiero, P., Kaminsky, G.M. et Gelfenbaum, G., 2003. Linking proxy-based and datum-based shorelines on a high-energy coastline: implications for shoreline change analysis. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 38, p. 57-82.
- Sallenger Jr, A.H., Krabill, W.B., Swift, R.N., Brock, J., List, J., Hansen, M., Holman, R.A., Manizade, S., Sontag, J., Meredith, A. et Morgan, K., 2003. Evaluation of airborne topographic lidar for quantifying beach changes. *Journal of Coastal Research*, p.125-133.
- Senneville, S., St-Onge Drouin, S., Dumont, D., Bihan-Poudec, A.-C., Belemaalem, Z., Corriveau, M., Bernatchez, P., Bélanger, S., Tolszczuk-Leclerc S., et Villeneuve, R., 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, 2013. 384 p.
- Shalowitz, A.L., 1964. Shore and sea boundaries. Publication 10-1, U.S. Department of Commerce, Coast and Geodetic Survey. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 749 p.
- Short, A.D., 1998. Handbook of beach and shoreface morphodynamics. (Edited by). John Wiley, New York, 379 p.
- State of Queensland, 2013a. Coastal management plan. [Document PDF] : <https://www.ehp.qld.gov.au/coastalplan/pdf/coastal-management-plan.pdf> (consulté le 10 mars 2016).
- State of Queensland, 2013b. Coastal hazard technical guide - Determining coastal hazard areas. [Document PDF] : <https://www.ehp.qld.gov.au/coastalplan/pdf/hazards-guideline.pdf> (consulté le 14 mars 2016).
- Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A., et Sallenger Jr., A.H., 2006. Empirical parameterization of setup, swah, and runup. *Coastal Engineering*, 53, p. 573-588.
- Stockdon, H.F., Sallenger Jr, A.H., List, J.H. et Holman, R.A., 2002. Estimation of shoreline position and change using airborne topographic Lidar data. *Journal of Coastal Research*, 18(3), p. 502-513.
- Suanez, S., Cancouët, R., Floc'h, F., Blaise, E., Arduin, F., Filipot, J.-F., Cariolet, J.-M. et Delacourt, C., 2015. Observations and Predictions of Wave Runup, Extreme Water Levels, and Medium-Term Dune Erosion during Storm Conditions. *J. Mar. Sci. Eng.* 3, p. 674–698.
- The Crown Estate, ND. Shoreline management plans - Sea level rise & coastal erosion. [Document PDF] :

http://www.thecrownstate.co.uk/media/5588/shoreline_management_briefing_note.pdf (consulté le 11 décembre 2015)

- Touchette, M., Houde-Poirier, M., Bernatchez, P. et Didier, D., 2017. Méthode de détermination de la ligne des hautes eaux pour le domaine maritime dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans un contexte de changements climatiques (Projet conjoint MDDELCC et MTMDET CC14.1) : Rapport d'étape II. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport d'étape remis au ministère du développement durable, de l'environnement et de la lutte aux changements climatiques et au ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec, mars 2017, 60 p.
- Vermeer, M., et Rahmstorf, S., 2009. Global sea level linked to global temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(51), p. 21527–21532.
- Vousdoukas, M.I., Voukouvalas, E., Annunziato, A., Giardino, A. et Feyen, L., 2016. Projections of extreme storm surge levels along Europe. *Climate Dynamics*, 47(9-10), p. 3171-3190.
- Water Resources Management, 2001. Policy for development in shore water zones. Department of Environment and Conservation. [En ligne] : http://www.env.gov.nl.ca/env/waterres/regulations/policies/shore_water.html (consulté le 12 février 2016)
- Water Resources Management, 2014. Policy for flood plain management. Department of Environment and Conservation. [En ligne] : http://www.env.gov.nl.ca/env/waterres/regulations/policies/flood_plain.html (consulté le 12 février 2016)

Textes législatifs

Convention des Nations Unies sur le droit de la mer du 10 décembre 1982, Vol. 1834, I-31363.

Australie - Nouvelle-Galles du Sud

Coastal Protection Act 1979 No. 13, art. 4

Surveying Regulation 2001, art. 55

Surveyor General's Directions No. 6 Water as a boundary - Procedures, 2004.

Australie - Queensland

Survey and Mapping Infrastructure Act 2003, Part 7, s. 71, art. 1a.

Survey and Mapping Infrastructure Act 2003, Part 7, s. 72.

Survey and Mapping Infrastructure Act 2003, Part 7, s. 76, art. 2-3.

Coastal Protection and Management Act 1995, Part 3, s. 10.

Coastal Protection and Management Act 1995, Part 3A, s. 18A.

Canada - Québec

Code civil du Québec 1991, chapitre 64, article 919.

Canada - Île-du-Prince-Édouard

Planning Act R.S.P.E.I. 1988, Cap. P-8, art. 1(b.2)

Planning Act R.S.P.E.I. 1988, Cap. P-8, art. 1(d.3)

Planning Act R.S.P.E.I. 1988, Cap. P-8, art. 16(1)

Environmental Protection Act R.S.P.E.I. 1988, Cap. E-9, art. 1(a.3)

Canada - Nouvelle-Écosse

Land Surveyors Act S.N.S. 2010, c. 38, subsection 12(1) Land Surveyors Regulations.

Beaches Act R.S.N.S 1989, c. 32, section 13 Beaches Regulations.

France

Code général de la propriété des personnes publiques, art. L.2111-4

Code général de la propriété des personnes publiques, art. L.2111-5

Code général de la propriété des personnes publiques, art. L.2111-6

Nouvelle-Zélande

Resource Management Act 1991, Part 1, s. 2

Marine and Coastal Area (Takutai Moana) Act 2011, Part 1, s. 9

ANNEXE A

QUESTIONNAIRE DISTRIBUE AUX PARTICIPANTS DE L'ATELIER 1

**QUESTIONNAIRE AUPRÈS DES USAGERS DE LA LIGNE DES HAUTES
EAUX (LHE) EN MILIEU MARITIME**

Date : _____

Identification du répondant

Organisme / services : _____

Poste : _____

Nombre d'année en poste : _____

Formation académique : _____

Question 1

Dans quel cadre appliquez-vous la LHE ?

Question 2

A) Laquelle des trois méthodes utilisez-vous ?

1. Botanique
2. Hydrologique (récurrence 0-2 ans)
3. Autre : expliquer quelle méthode

B) Selon vous cette méthode est-elle adéquate(oui ou non) ?

Question 3

Quels sont les problèmes que vous rencontrez lorsque vous avez à déterminer la LHE sur le terrain ?

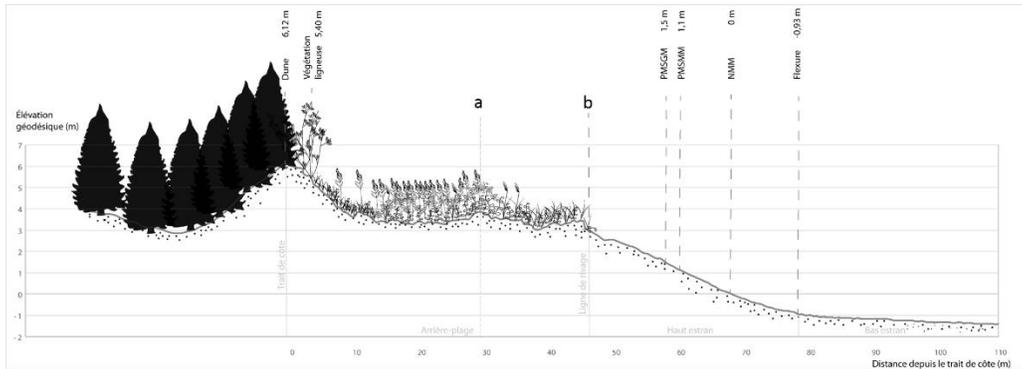
Question 4

Quelles solutions pourraient être envisagées pour améliorer la détermination et l'application de la LHE ?

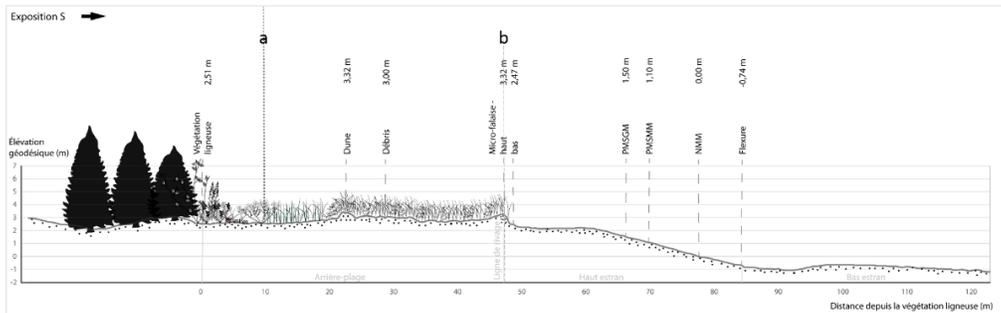
Question 5

Identifiez la LHE sur les 2 profils suivants, choisissez parmi les limites proposées (a ou b) ou proposer une limite qui vous semble la plus adéquate:

MÉTHODE DE DÉTERMINATION DE LA LIGNE DES HAUTES EAUX POUR LE DOMAINE MARITIME DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE



- Ammophile à ligule courte
Ammophila breviligulata
- Gesse maritime
Lathyrus japonicus
- Élyme des sables
Leymus mollis
- Épilobe à feuilles étroites
Epilobium angustifolium
- Framboisier
Rubus idaeus
- Smilacine étoilée
Smilacina stellata
- Aulne rugueux
Alnus rugosa
- Épinette noire
Picea mariana



- Ammophile à ligule courte
Ammophila breviligulata
- Gesse maritime
Lathyrus japonicus
- Élyme des sables
Leymus mollis
- Épilobe à feuilles étroites
Epilobium angustifolium
- Airelle rouge
Vaccinium vitis-idaea
- Myrique de Pennsylvanie
Myrica pensylvanica
- Myrique baumier
Myrica gale
- Épinette noire
Picea mariana
- Aulne rugueux
Alnus rugosa
- Mousses et lichen
- Herbacé

PMSGM : pleine mer supérieure de grande marée

PMSMM : pleine mer supérieure de marée moyenne

NMM : niveau moyen de la mer

Flexure : rupture délimitant la plage (limite entre le haut et le bas estran)

ANNEXE B

**TABLEAU SYNTHÈSE DE LA POSITION VERTICALE RELATIVE
ENTRE LA LG ET LA LHEB SELON LA LOCALISATION, LE TYPE
ET L'ÉTAT DE LA CÔTE**

Type de côte	Estuaire moyen				Estuaire maritime				Golfe - côte nord				Golfe - côte sud				Baie des Chaleurs				N
	N	Méd. LG (m)	N	Méd. LHEB (m)	N	Méd. LG (m)	N	Méd. LHEB (m)	N	Méd. LG (m)	N	Méd. LHEB (m)	N	Méd. LG (m)	N	Méd. LHEB (m)	N	Méd. LG (m)	N	Méd. LHEB (m)	
Terrasse de plage					14	3,37	14	3,22	32	3,03	32	2,95	11	3,38	11	3,00	2	2,07	2	2,05	59
Actif					8	3,67	8	3,34	17	3,32	17	3,20	6	3,43	6	3,12	1	1,95	1	2,05	32
Végétalisé					6	3,21	6	3,06	15	2,77	15	2,47	5	3,07	5	2,82	1	2,18	1	2,05	27
Terrasse de plage (dune bordière)					1	4,80	1	5,53	4	4,29	4	2,57									5
Actif									2	4,46	2	3,87									2
Végétalisé					1	4,80	1	5,53	2	4,03	2	2,47									3
Flèche (extérieur)					6	3,19	6	2,89	5	3,56	5	2,94	6	1,94	6	2,13	7	2,15	7	2,02	24
Actif					2	3,38	2	3,66	4	2,97	4	2,74	2	2,04	2	1,93	6	2,16	6	2,14	14
Végétalisé					4	3,19	4	2,85	1	4,16	1	5,78	4	1,85	4	2,74	1	1,88	1	1,91	10
Flèche (intérieur)					5	2,63	5	2,63	5	2,37	5	2,45	3	1,41	3	1,20	8	1,24	8	1,52	21
Actif									3	2,42	3	2,54					4	NaN	4	1,74	7
Végétalisé					5	2,63	5	2,63	2	1,99	2	1,94	3	1,41	3	1,20	4	1,24	4	1,22	14
Marais maritime	5	4,49	5	3,19	9	3,11	9	3,07	1	3,60	1	2,40	3	1,00	3	NaN	9	1,48	9	1,25	27
Actif	3	5,72	3	4,59	1	6,04	1	2,56									1	2,02	1	NaN	5
Végétalisé	2	4,49	2	3,19	8	3,03	8	3,10	1	3,60	1	2,40	3	1,00	3	NaN	8	1,38	8	1,54	22
Falaise	1	10,02	1	2,27	3	12,54	3	3,36	4	6,09	4	3,75	4	4,98	4	3,19					12
Actif	1	10,02	1	2,27	3	12,54	3	3,36	2	5,24	2	NaN	1	4,60	1	2,86					7
Végétalisé									2	6,19	2	3,75	3	5,36	3	3,52					5
Rocheux sans falaise					1	4,20	1	4,20													1
Artificialisé	1	5,26	1	NaN	12	4,62	12	4,47	5	3,87	5	3,37	5	4,06	5	3,65	1	2,35	1	2,65	24
Total général	7	4,93	7	3,09	51	3,64	51	3,11	56	3,22	56	2,94	32	3,17	32	2,82	27	1,84	27	1,74	173

ANNEXE C

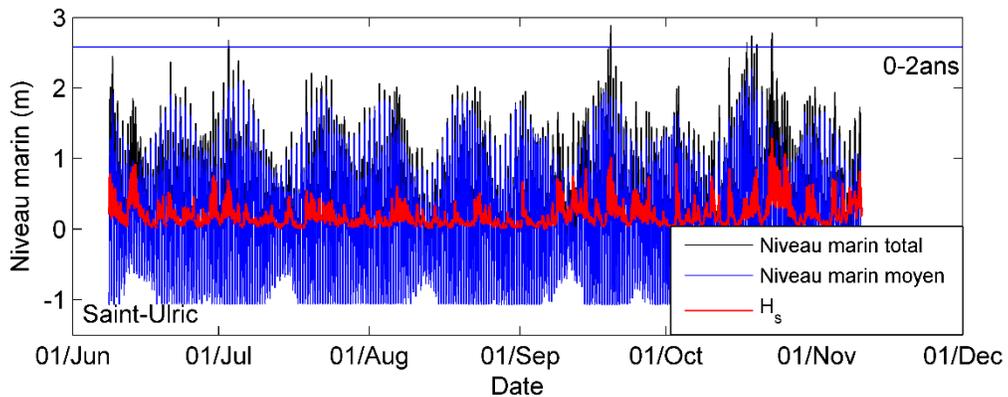
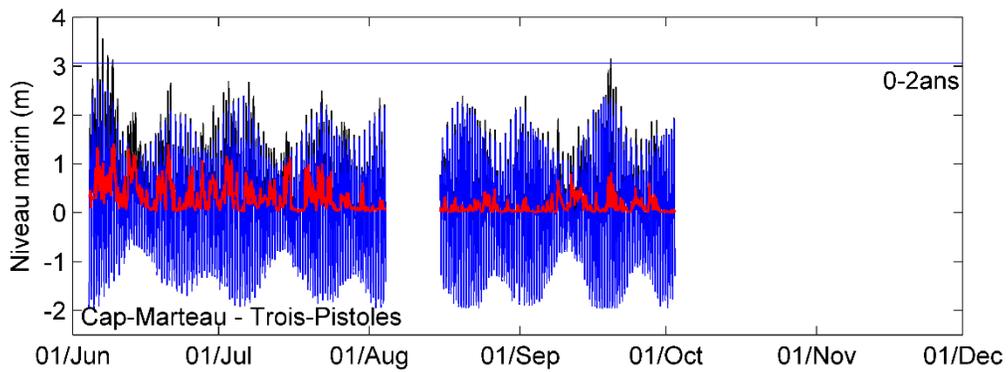
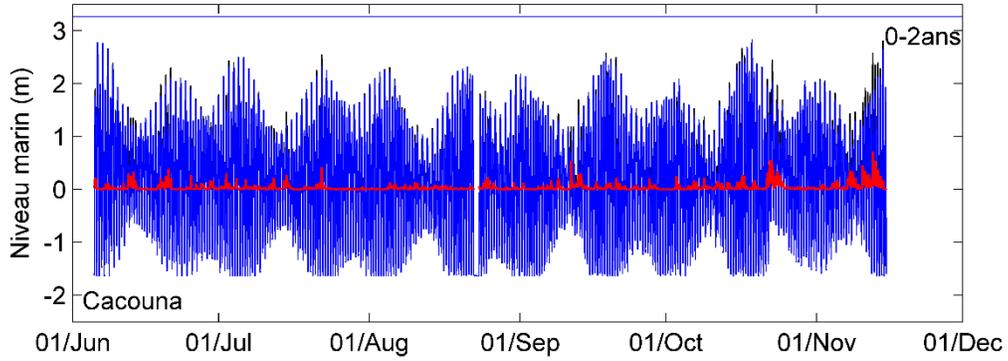
**TABLEAU SYNTHÈSE DE LA POSITION HORIZONTALE RELATIVE
ENTRE LA LG ET LA LHEB SELON LA LOCALISATION, LE TYPE
ET L'ÉTAT DE LA CÔTE**

Type de côte	Estuaire moyen				Estuaire maritime					Golfe - côte nord				
	N		Médiane (m)		N			Médiane (m)		N			Médiane (m)	
	LG > LHEB	LHEB > LG	LG > LHEB	LHEB > LG	LG = LHEB	LG > LHEB	LHEB > LG	LG > LHEB	LHEB > LG	LG = LHEB	LG > LHEB	LHEB > LG	LG > LHEB	LHEB > LG
Terrasse de plage					1	6	7	1,91	3,18	6	8	16	8,17	11,63
Actif					1	3	4	2,10	4,53	5	3	8	22,84	12,03
Végétalisé						3	3	0,97	2,02	1	5	8	6,48	10,28
Terrasse de plage (DB)							1		13,04		2	2	13,90	9,58
Actif												2		9,58
Végétalisé							1		13,04		2		13,90	
Flèche (extérieur)					1	1	4	5,87	4,47			4		14,62
Actif					1		1		6,39			3		11,33
Végétalisé						1	3	5,87	2,54			1		17,90
Flèche (intérieur)					4	1		53,36		2		2		7,54
Actif										1		2		7,54
Végétalisé					4	1		53,36		1				
Marais maritime	4		4,40		2	4	2	19,12	55,09		1		2,71	
Actif	2		10,46			1		15,82						
Végétalisé	2		4,40		2	3	2	22,42	55,09		1		2,71	
Falaise	1		13,13			1		18,70			2		5,08	
Actif	1		13,13			1		18,70						
Végétalisé											2		5,08	
Rocheux					1									
Artificialisé					6	3	1	7,85	7,16	2	2		7,36	
Total général	5	0	5,10	-	15	16	15	6,86	6,39	10	15	24	8,23	11,53

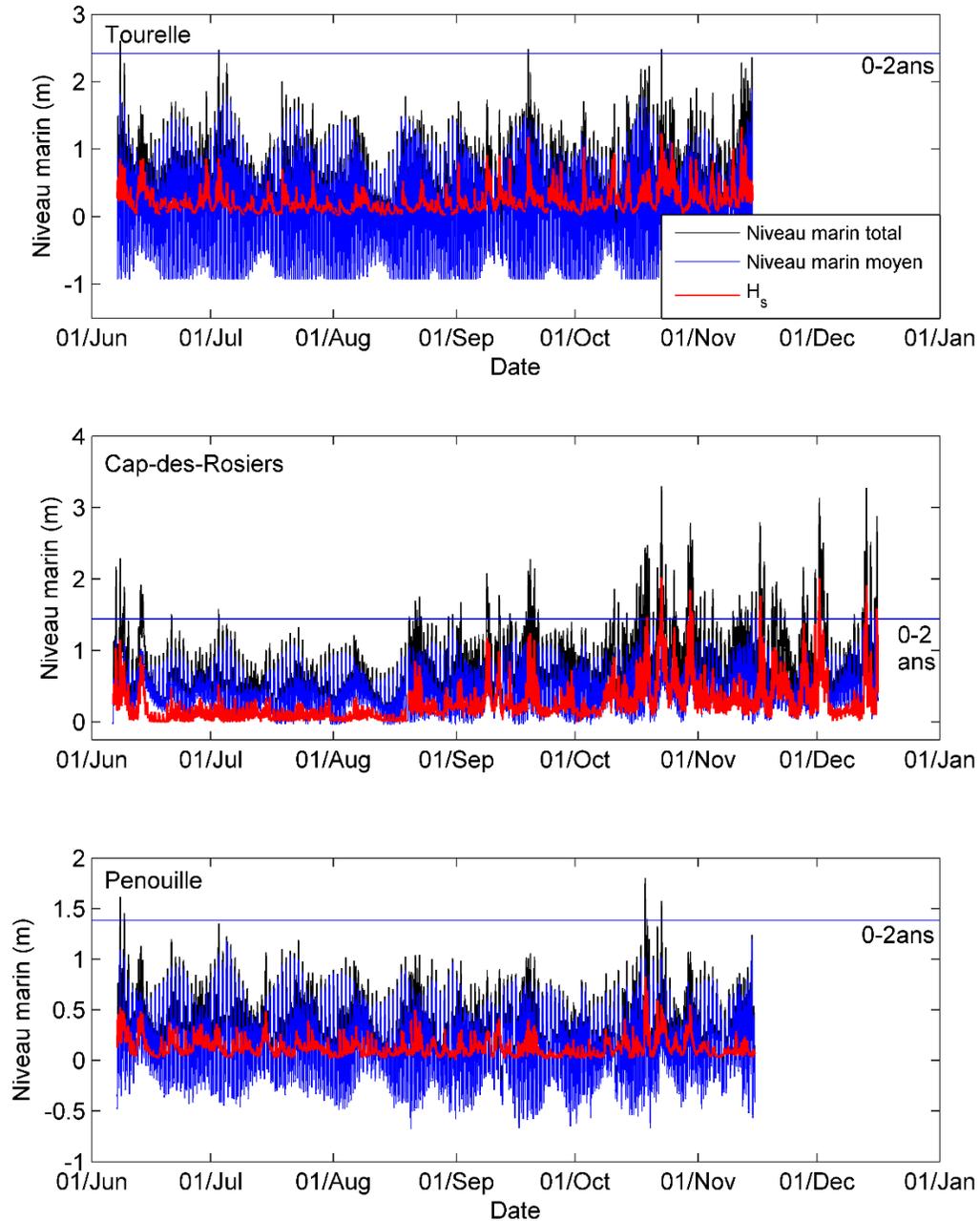
Type de côte	Golfe - côte sud					Baie des Chaleurs				
	N			Médiane (m)		N			Médiane (m)	
	LG = LHEB	LG > LHEB	LHEB > LG	LG > LHEB	LHEB > LG	LG = LHEB	LG > LHEB	LHEB > LG	LG > LHEB	LHEB > LG
Terrasse de plage	2	8		3,07			1	1	0,79	1,61
Actif	2	4		2,56				1		1,61
Végétalisé		4		4,14			1		0,79	
Terrasse de plage (DB)										
Actif										
Végétalisé										
Flèche (extérieur)			4	3,78		2	1	18,64	3,06	
Actif			2	2,32		1	1	34,84	3,06	
Végétalisé			2	5,18		1		2,44		
Flèche (intérieur)	2	1		1,66		3	1	2,64		
Actif										
Végétalisé	2	1		1,66		3	1	2,64		
Marais maritime						1	4	2	2,70	4,46
Actif										
Végétalisé						1	4	2	2,70	4,46
Falaise		4		2,40						
Actif		1		3,23						
Végétalisé		3		1,65						
Rocheux										
Artificialisé		1	2	0,9	6,86			1		11,78
Total général	4	14	6	2,97	3,78	4	8	5	2,54	3,06

ANNEXE D

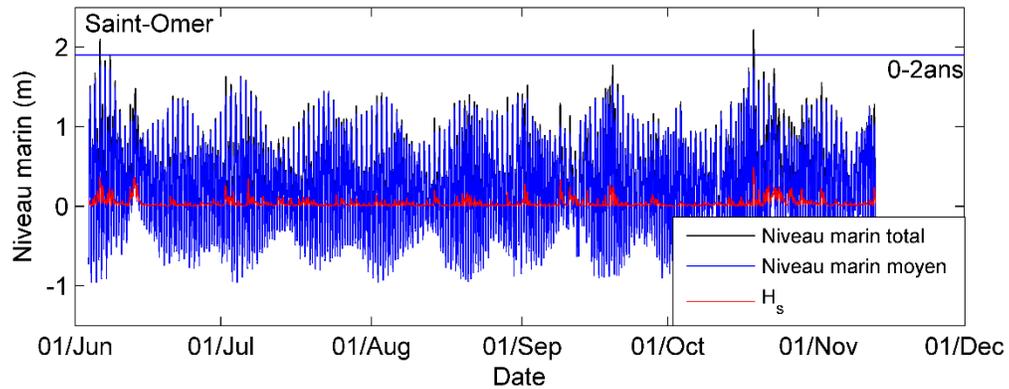
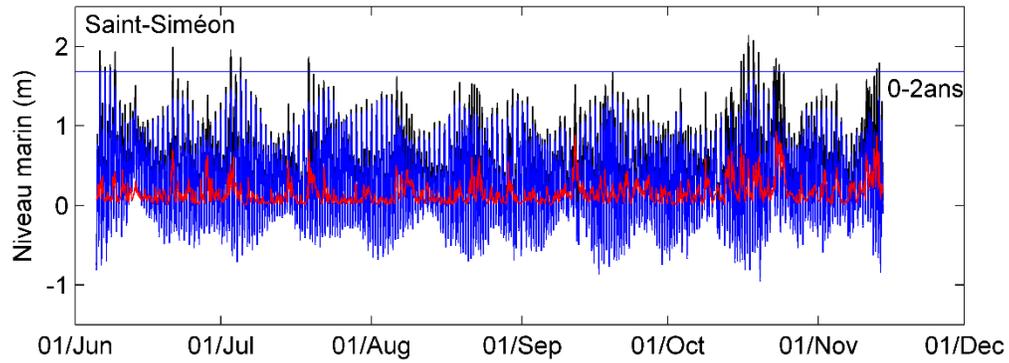
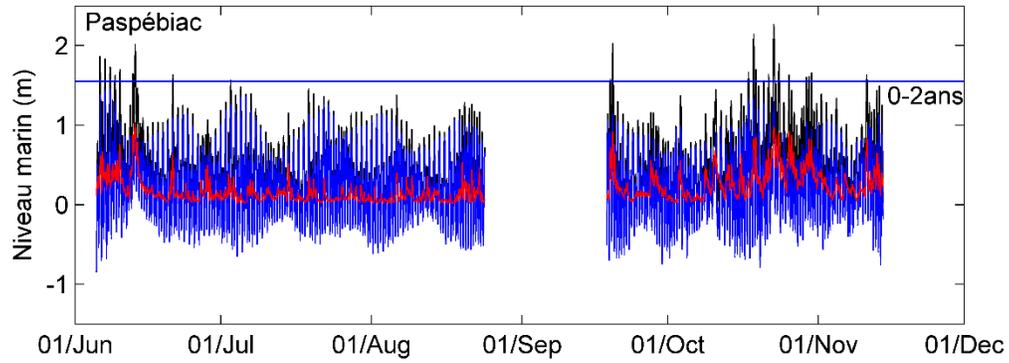
**SERIES TEMPORELLES DE NIVEAUX D'EAU ET DE VAGUES AUX
CAPTEURS SUR LES SITES A L'ETUDE**



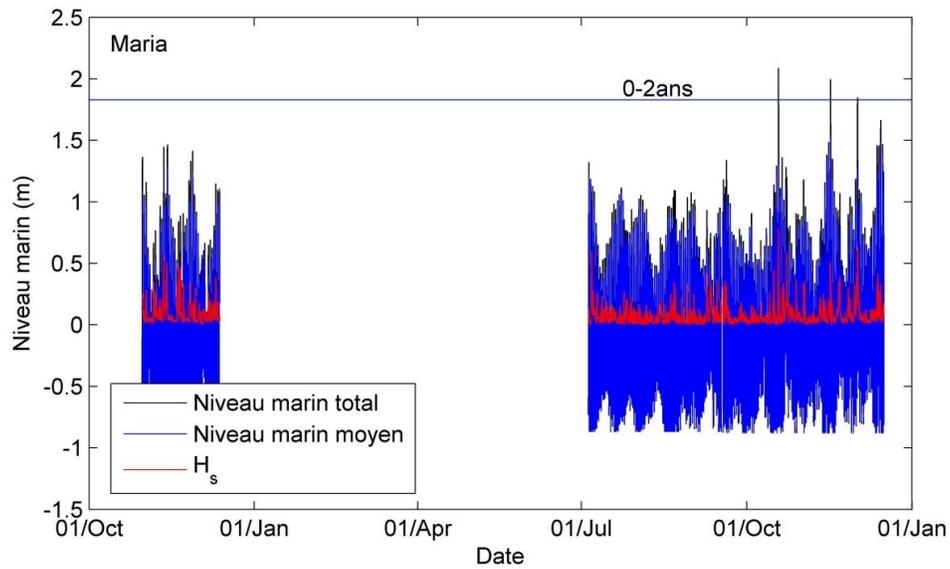
Niveaux marins moyens (η) et totaux ($\eta + H_s$) (m) observés en 2016 aux capteurs des profils types du Bas-Saint-Laurent (référentiel géodésique). À noter que le marnage diffère d'un site à l'autre. Le niveau de récurrence 2 ans (0-2ans) est identifiée par une ligne horizontale bleue.



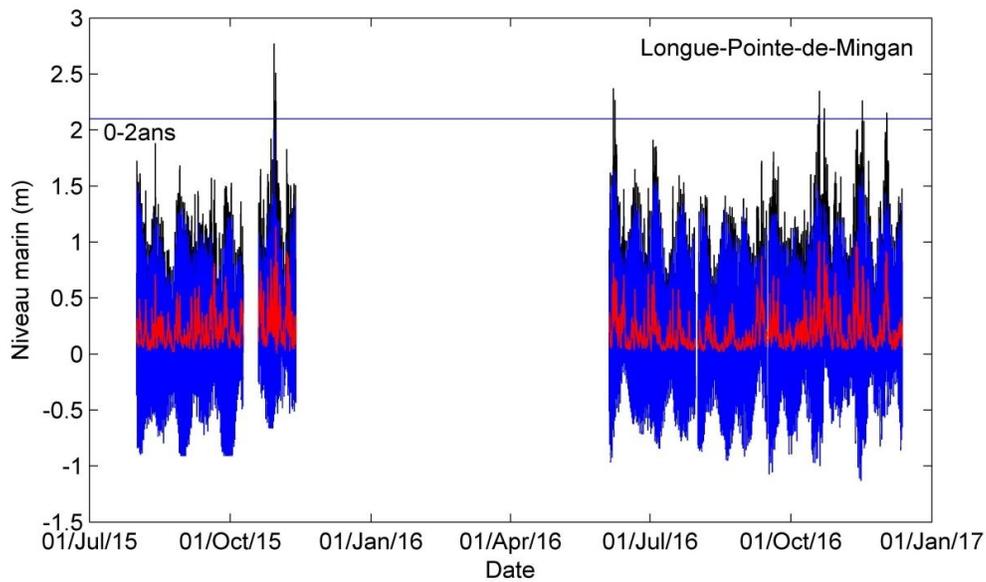
Niveaux marins moyens (η) et totaux ($\eta + H_s$) (m) observés en 2016 aux capteurs des profils types de la Haute-Gaspésie et Côte-de-Gaspé (référentiel géodésique). À noter que le marnage diffère d'un site à l'autre. Le niveau de récurrence 2 ans (0-2ans) est identifiée par une ligne horizontale bleue.



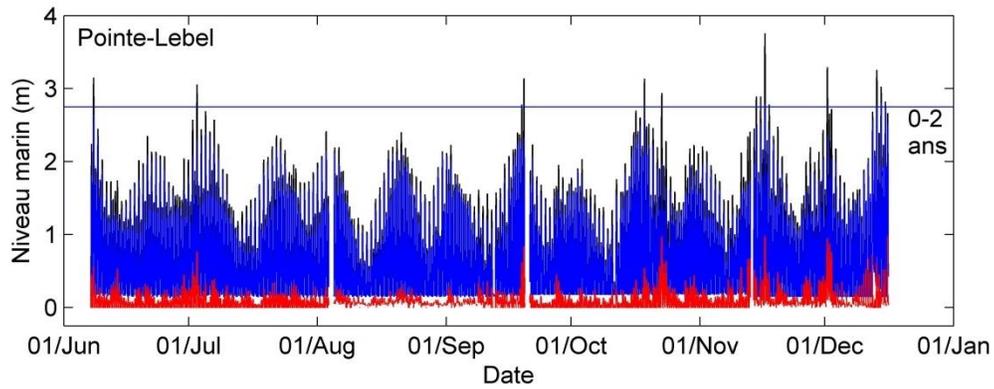
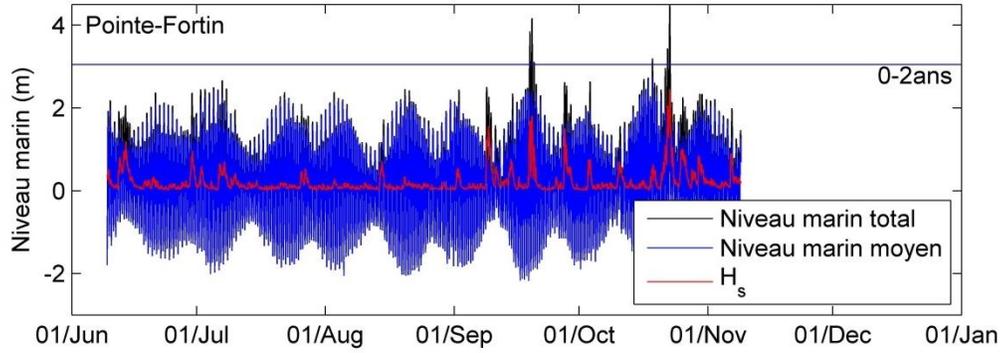
Niveaux marins moyens (η) et totaux ($\eta + H_s$) (m) observés en 2016 aux capteurs des profils types de la baie des Chaleurs (référentiel géodésique). À noter que le marnage diffère d'un site à l'autre mais que les axes verticaux présentent la même variabilité. Le niveau de récurrence 2 ans (0-2ans) est identifiée par une ligne horizontale bleue.



Niveaux marins moyens (η) et totaux ($\eta + H_s$) (m) observés d'octobre 2015 à décembre 2016 au capteur d'estran du profil type de Maria (baie des Chaleurs) (référentiel géodésique). Le niveau de récurrence 2 ans (0-2ans) est identifiée par une ligne horizontale bleue.



Niveaux marins moyens (η) et totaux ($\eta + H_s$) (m) observés d'octobre 2015 à décembre 2016 au capteur d'estran du profil type de Longue-Pointe-de-Mingan (référentiel géodésique). Le niveau de récurrence 2 ans (0-2ans) est identifiée par une ligne horizontale bleue.



Niveaux marins moyens (η) et totaux ($\eta + H_s$) (m) observés de juin 2015 à décembre 2016 aux capteurs des profils types de la Côte-Nord (référentiel géodésique). À noter que le marnage diffère d'un site à l'autre. Le niveau de récurrence 2 ans (0-2ans) est identifiée par une ligne horizontale bleue.