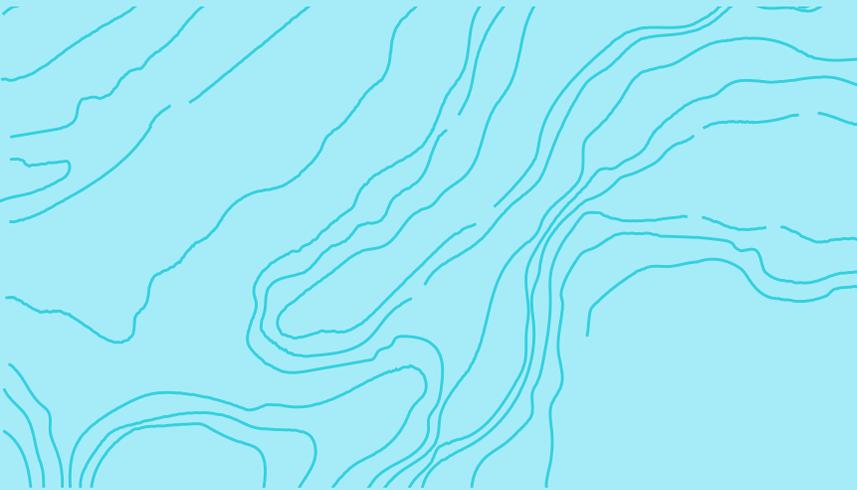




projet
résilience
côtière



Modélisation de l'effet de la hausse du niveau de la mer sur les marais maritimes



Laboratoire de dynamique
et de gestion intégrée
des zones côtières

Université du Québec
à Rimouski

Septembre
2021



Projet Résilience côtière

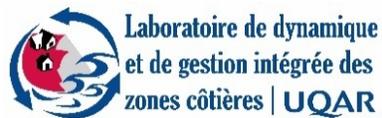
Modélisation de l'effet de la hausse du niveau de la mer sur les marais maritimes

Présenté au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques



Sous la direction de
Pascal Bernatchez, Ph. D.

Septembre 2021



ÉQUIPE DE RÉALISATION

Direction scientifique

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

<https://ldgizc.uqar.ca>

Coordination du projet Résilience côtière

Susan Drejza, M. Sc. Géographie, professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR

Christian Fraser, M. Sc. Océanographie, Géomorphologue, professionnel de recherche, LDGIZC, UQAR

Analyse et rédaction

François Savoie-Ferron, B.Sc. Développement durable et zone côtière, professionnel de recherche, LDGIZC, UQAR.

Maryne Drouet, M.Env., Géographie, professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR

Chargés de projet au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC)

Guillaume Jeanmoye-Turcotte, Géomorphologue, M. Sc. Géogr., M. Sc. Eau, DEH

Sarah Aubé-Michaud, Géomorphologue, M. Sc. Géogr., DEH

Francis Bourret, Biologiste, M. Sc, DAEMH

Jean-Denis Bouchard, Géologue, M. Sc., DEH

Référence complète

Savoie-Ferron, F., Drouet, M., Drejza, S., Fraser, C., Marie, G. et P. Bernatchez (2021) *Modélisation de l'effet de la hausse du niveau de la mer sur les marais maritimes*, 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 l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, septembre 2021, 105 p.

Photographies de la page de couverture :

Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, UQAR, septembre 2017

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le Gouvernement du Québec qui a financé ce projet via le PACC 2013-2020 -mesure 2.6



AVERTISSEMENT

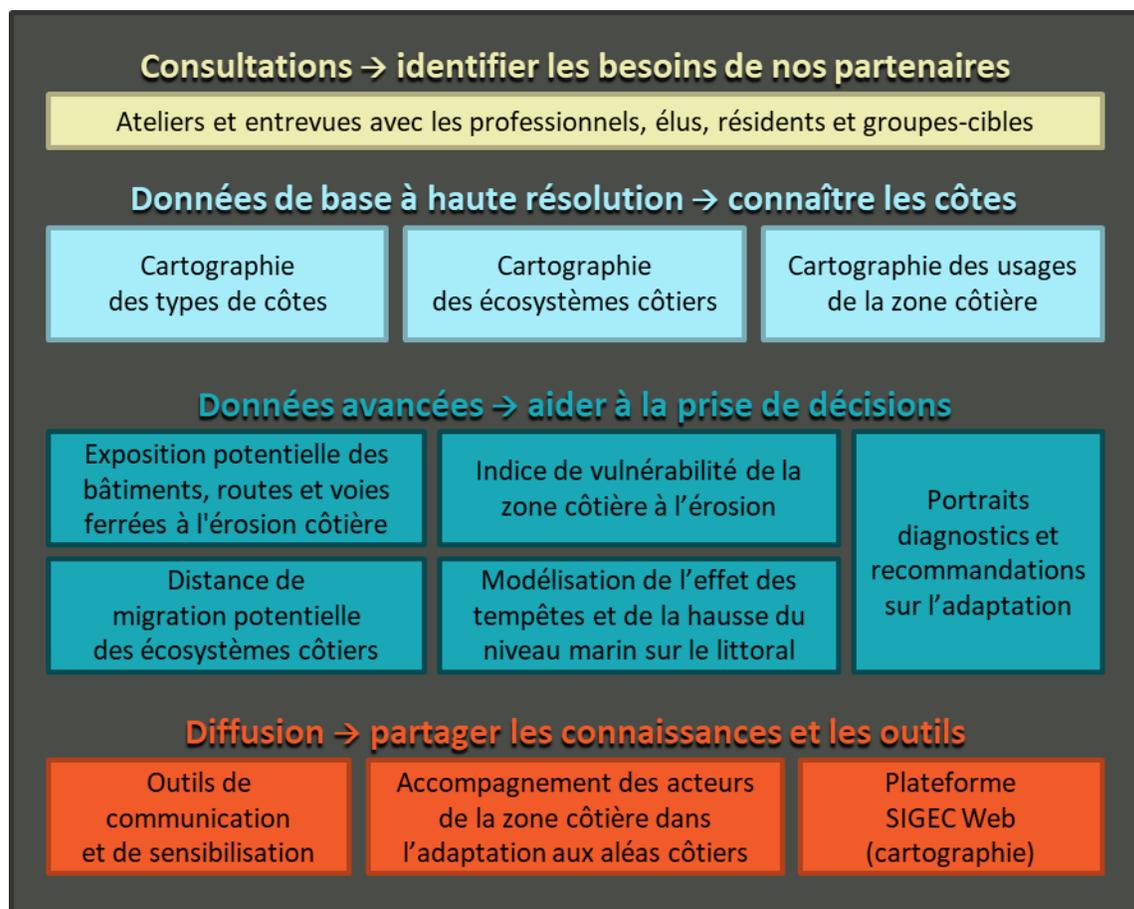
La présente étude a été réalisée à la demande du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC), sous la responsabilité de la Direction de l'expertise hydrique. Elle a été financée par le Fonds vert dans le cadre du Plan d'action sur les changements climatiques (PACC) 2013-2020 du gouvernement du Québec.

Le MELCC n'est pas responsable de l'exactitude, de l'actualité et de la fiabilité du contenu de ce rapport. Les points de vue exprimés dans ce rapport émanent des auteurs et ne coïncident pas nécessairement avec ceux du ministère mentionné ci-haut.

AVANT-PROPOS

Le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) de l'Université du Québec à Rimouski a mis en œuvre un projet de recherche-action intitulé « **Projet Résilience côtière : développement d'outils d'adaptation à l'érosion côtière pour les municipalités du Québec maritime** ». Ce projet, financé par le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, s'est déroulé de janvier 2017 à décembre 2021. Afin de répondre aux nombreux besoins exprimés lors d'une vaste consultation avec les acteurs de la zone côtière, douze chantiers ont été mis en œuvre dans quatre thématiques : consultations, données de base, données avancées et diffusion.

Les résultats globaux sont présentés dans le rapport synthèse du projet, disponible sur le site web du LDGIZC (<https://ldgizc.ugr.ca/Web/projets/projet-resilience-cotiere#realisations>).



Pour plus de renseignements, consulter la page web du [projet Résilience côtière](#).

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	3
AVERTISSEMENT.....	3
AVANT-PROPOS.....	4
ACRONYMES ET ABBRÉVIATIONS.....	7
LISTE DES FIGURES.....	8
LISTE DES TABLEAUX.....	11
LISTE DES ANNEXES.....	12
1. Introduction.....	13
1.1 Contexte de l'étude.....	13
1.2 Problématique.....	13
1.3 Objectifs.....	14
1.4 Territoire à l'étude.....	14
1.4.1 Îles-de-la-Madeleine (IDLM).....	16
1.4.2 Nouvelle.....	17
1.4.3 Saint-Siméon-de-Bonaventure (Saint-Siméon).....	19
1.4.4 Penouille.....	20
1.4.5 Rimouski.....	21
1.4.6 Kamouraska.....	22
1.4.7 Montmagny.....	23
1.4.8 Sainte-Anne-de-Beaupré.....	24
2. Méthodologie.....	25
2.1 Présentation du modèle.....	25
2.2 Données utilisées en intrant pour SLAMM (<i>File Setup</i>).....	26
2.2.1 <i>DEM File</i> (elevation).....	26
2.2.2 <i>SLAMM Categories</i>	26
2.2.3 <i>SLOPE File</i>	27
2.3 Données utilisées en intrant pour SLAMM (<i>Parameters</i>).....	32
2.3.1 Hausse du niveau marin.....	32
2.3.2 Ajustement isostatique.....	33
2.3.3 Données Marégraphiques.....	33

2.3.4	Données d'érosion.....	34
2.3.5	Données d'accrétion.....	34
2.4	Calibration du modèle.....	35
2.5	Cartes de variation de surface de marais.....	35
2.6	Simulation du démantèlement des aboiteaux de Kamouraska.....	35
3.	Résultats.....	36
3.1	Iles-de-la-Madeleine (IDL).....	36
3.2	Nouvelle.....	42
3.3	Saint-Siméon-de-Bonaventure (Saint-Siméon).....	48
3.3.1	Modélisation du marais de St-Siméon avec le modèle isostatique NAD83v70VG.....	54
3.4	Penouille.....	55
3.5	Rimouski.....	62
3.6	Kamouraska.....	68
3.6.1	Réponse du marais de Kamouraska à une simulation de démantèlement des aboiteaux.....	74
3.7	Montmagny.....	78
3.8	Sainte-Anne-de-Beaupré (SAB).....	84
3.9	Comparaison intermarais.....	90
4.	Limites de la méthode.....	93
4.1	Difficulté à valider le modèle.....	93
4.2	Manque de données d'accrétion.....	93
4.3	Modélisation d'érosion.....	93
4.4	Autocyclicité hydrosédimentaire.....	94
4.5	Absence de données d'écoulement des eaux.....	94
4.6	Délimitation arbitraire de la limite de l'influence des vagues.....	94
5.	Conclusion.....	95
6.	Références.....	96
7.	Annexes.....	100

ACRONYMES ET ABBRÉVIATIONS

EGSL	Estuaire et golfe du Saint-Laurent
GES	Gaz à effet de serre
GIA	Ajustement glacio-isostatique
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC en anglais)
IDLM	Îles-de-la-Madeleine
LDGIZC	Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
PACC	Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques
CMIP5	Projet de comparaison de modèles couplés — phase 5
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i>
SAB	Sainte-Anne-de-Beaupré
SLAMM	<i>Sea Level Affecting Marshes Model (logiciel de modélisation)</i>
SROCC	<i>Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate</i>
St-Siméon	Saint-Siméon-de-Bonaventure
ZC	Zéro des cartes

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation des marais maritimes modélisés à partir de SLAMM.....	15
Figure 2 : Photographie oblique de la partie ouest du marais du Bassin aux Îles-de-la-Madeleine (© LDGIZC, 2017).....	16
Figure 3 : Localisation des marais modélisés à Nouvelle	17
Figure 4 : Photographie oblique du marais à l’embouchure de la rivière Nouvelle (© LDGIZC, 2017)	18
Figure 5 : Photographie oblique du marais de St-Siméon-de-Bonaventure (© LDGIZC, 2017)	19
Figure 6 : Photographie oblique du marais de Penouille dans le Parc National de Forillon (© LDGIZC, 2017)	20
Figure 7 : Photographie oblique de la partie ouest du marais de Sacré-Cœur à Rimouski (© LDGIZC, 2017).....	21
Figure 8 : Photographie oblique de la partie ouest du marais de la baie de Kamouraska (© LDGIZC, 2017).....	22
Figure 9 : Photographie oblique du marais à l’est de Montmagny (© LDGIZC, 2017).....	23
Figure 10 : Photographie oblique du marais à l’ouest de l’embouchure de la rivière Sainte-Anne à Beaupré (© LDGIZC, 2017)	24
Figure 11 : Conversion d’écosystème côtier en réponse à la hausse du niveau marin (Warren Pinnacle Inc., 2014)	25
Figure 12 : Représentation du quadrillage effectué par SLAMM (Warren Pinnacle Inc. 2014)	26
Figure 13 : Schéma des étapes de création de l’intrant DEM File.....	26
Figure 14 : Schéma des étapes de création de l’intrant SLAMM Categories (NWI).....	27
Figure 15 : Schéma des étapes de création de l’intrant Slope File	27
Figure 16 : Évolution de la surface du marais des Îles-de-la-Madeleine selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC	36
Figure 17 : Évolution de la surface du marais des Îles-de-la-Madeleine selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC	37
Figure 18 : Représentation cartographique des écosystèmes du marais de Bassin aux Îles-de-la-Madeleine en 2019.....	37
Figure 19 : Représentation cartographique de l’évolution de la surface du marais des Îles-de-la-Madeleine en 2055 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC	38
Figure 20 : Représentation cartographique de l’évolution de la surface du marais des Îles-de-la-Madeleine en 2100 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC	39
Figure 21 : Représentation cartographique de l’évolution de la surface du marais des Îles-de-la-Madeleine en 2055 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC.....	40
Figure 22 : Représentation cartographique de l’évolution de la surface du marais des Îles-de-la-Madeleine en 2100 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC.....	41
Figure 23 : Évolution de la surface des marais de Nouvelle selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC	43

Figure 24 : Évolution de la surface des marais de Nouvelle selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC	43
Figure 25 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface des marais de l'estuaire de la rivière Nouvelle en 2055 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC	44
Figure 26 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface des marais de l'estuaire de la rivière Nouvelle en 2100 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC	45
Figure 27 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface des marais de l'estuaire de la rivière Nouvelle en 2055 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC.....	46
Figure 28 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface des marais de l'estuaire de la rivière Nouvelle en 2100 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC.....	47
Figure 29 : Évolution de la surface du marais de St-Siméon selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC.....	49
Figure 30 : Évolution de la surface du marais de St-Siméon selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC	49
Figure 31 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de St-Siméon en 2055 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC	50
Figure 32 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de St-Siméon en 2100 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC	51
Figure 33 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de St-Siméon en 2055 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC	52
Figure 34 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de St-Siméon en 2100 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC.....	53
Figure 35 : Comparaison de l'évolution de la surface du marais de St-Siméon selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC en fonction des modèles isostatiques ICE-6G (VM5a) et NAD83v70VG.....	54
Figure 36 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de St-Siméon en 2100 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC en fonction modèle isostatique ICE-6G (VM5a) et NAD83v70VG.....	55
Figure 37 : Évolution de la surface du marais de Penouille selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC.....	56
Figure 38 : Évolution de la surface du marais de Penouille selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC.....	57
Figure 39 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Penouille en 2055 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC	58
Figure 40 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Penouille en 2100 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC	59
Figure 41 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Penouille en 2055 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC.....	60
Figure 42 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Penouille en 2100 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC.....	61
Figure 43 : Évolution de la surface du marais de Rimouski selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC.....	62

Figure 44 : Évolution de la surface du marais de Rimouski selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC	63
Figure 45 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Rimouski en 2055 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC	64
Figure 46 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Rimouski en 2100 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC	65
Figure 47 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Rimouski en 2055 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC	66
Figure 48 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Rimouski en 2100 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC	67
Figure 49 : Évolution de la surface du marais de Kamouraska selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC	68
Figure 50 : Évolution de la surface du marais de Kamouraska selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC	69
Figure 51 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Kamouraska en 2055 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC	70
Figure 52 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Kamouraska en 2100 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC	71
Figure 53 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Kamouraska en 2055 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC	72
Figure 54 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Kamouraska en 2100 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC	73
Figure 55 : Comparaison de l'évolution de la surface totale du marais de Kamouraska suite au démantèlement des aboiteaux selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5	74
Figure 56 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Kamouraska suite au démantèlement des aboiteaux.....	75
Figure 57 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Kamouraska suite au démantèlement des aboiteaux en 2055 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC	76
Figure 58 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Kamouraska suite au démantèlement des aboiteaux en 2100 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC	77
Figure 59 : Évolution de la surface du marais de Montmagny selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC	78
Figure 60 : Évolution de la surface du marais de Montmagny selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC	79
Figure 61 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Montmagny en 2055 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC	80
Figure 62 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Montmagny en 2100 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC	81
Figure 63 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Montmagny en 2055 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC	82

Figure 64 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Montmagny en 2100 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC	83
Figure 65 : Évolution de la surface du marais de Sainte-Anne-de-Beaupré selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC.....	85
Figure 66 : Évolution de la surface du marais de Sainte-Anne-de-Beaupré selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC	85
Figure 67 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Sainte-Anne-de-Beaupré en 2055 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC.....	86
Figure 68 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Sainte-Anne-de-Beaupré en 2100 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC.....	87
Figure 69 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Sainte-Anne-de-Beaupré en 2055 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC	88
Figure 70 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Sainte-Anne-de-Beaupré en 2100 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC	89
Figure 71 : Variation (%) de la surface totale du marais et du schorre supérieur par rapport au marais actuel. La comparaison est effectuée en 2055 et 2100 selon les valeurs médianes et supérieures des scénarios RCP 8.5 du GIEC pour les sites des IDLM, Nouvelle, St-Siméon et Penouille. Il est à noter que l'échelle verticale des IDLM est différente du reste des sites.....	91
Figure 72 : Variation (%) de la surface totale du marais et du schorre supérieur par rapport au marais actuel. La comparaison est effectuée en 2055 et 2100 selon les valeurs médianes et supérieures des scénarios RCP 8.5 du GIEC pour les sites de Rimouski, Kamouraska, Montmagny et SAB.	92

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Synthèse des marais maritimes modélisés à partir de SLAMM. Les variations isostatiques proviennent principalement du modèle ICE-6G(VM5a).	15
Tableau 2 : Conversion des noms et codes des écosystèmes cartographiés en noms des catégories équivalentes dans le logiciel SLAMM. Les écosystèmes ont été préalablement identifiés dans le chantier Cartographie des écosystèmes côtiers du Québec maritime du projet Résilience (Jobin et al., 2021).....	28
Tableau 3 : Tableau des projections de la hausse régionale du niveau de la mer (m) pour les sites modélisés avec SLAMM pour l'horizon 2055 et 2100. Les projections sont tirées des limites médianes (Médian) et supérieures (Supérieur) du scénarios RCP 8.5 du GIEC.	32
Tableau 4 : Taux d'accrétion et types de datation utilisée dans SLAMM par site d'étude. Le détail des valeurs d'accrétion utilisées est disponible dans l'annexe 1	34

LISTE DES ÉQUATIONS

Équation 1 : Conversion ZC en CGVD28	34
--	----

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Tableau des intrants utilisées dans les modélisations SLAMM.....	100
Annexe 2 : Cartes d'évolution de la surface du marais de St-Siméon modélisé à l'aide du modèle NAD83v70VG selon les valeurs médianes et supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC et selon les horizons 2055 et 2100.....	102

1. Introduction

1.1 Contexte de l'étude

Ce document présente une des composantes du **Projet Résilience côtière** mené par le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) de l'UQAR. Il s'insère ainsi dans ce vaste projet ayant pour objectif le développement d'outils répondant aux besoins des communautés côtières du Québec Maritime. (voir <https://ldgizc.uqar.ca/Web/projets/projet-resilience-cotiere>).

Ce rapport présente une modélisation et une analyse de l'impact de la hausse du niveau marin anticipé sur les marais maritimes. La modélisation de l'effet des tempêtes hivernales sur différentes plages sableuses a aussi été réalisée dans le cadre de ce projet (Caulet *et al.*, 2021).

1.2 Problématique

La hausse du niveau marin a des conséquences majeures sur l'ensemble des écosystèmes côtiers. Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), le niveau moyen des eaux devrait augmenter de 0,5 m à 1,2 m d'ici 2100 dans le cas où la température mondiale augmenterait de 1,5 °C comparé à aujourd'hui (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2018). Cette hausse pourrait potentiellement affecter la végétation des écosystèmes dans les océans de manière générale, étant donné que ceux-ci contiennent 25 % de la végétation totale de la planète, dont la majorité se limite aux régions côtières (Jeffrey & Mantoura, 1997). De plus, les océans contiennent des espèces qui possèdent une plus grande diversité phylogénétique (c.-à-d. couvrant une portion plus grande de l'arbre phylogénétique) que les espèces terrestres (UNESCO, 2017), et il est donc urgent de préserver les écosystèmes qui les constituent.

Parmi les écosystèmes côtiers d'importance écologique, les marais maritimes sont d'importants habitats pour plusieurs espèces évoluant en zone côtière, jouant notamment un rôle de zone tampon face aux tempêtes (Yang, 2009). Les marais peuvent s'ajuster à la montée des eaux en migrant vers les terres si l'espace y est propice ou en s'élevant verticalement (selon l'apport de sédiments) (Bernatchez et Quintin, 2016). La présence d'obstacles physiques vers les terres comme le développement urbain des côtes ou des falaises peut ainsi empêcher la migration du marais et créer un phénomène de coincement côtier venant aggraver les effets de la hausse du niveau marin (Nicholls *et al.*, 2018 ; Linhoss *et al.*, 2015).

De manière générale, les marais réduisent les effets des tempêtes et des inondations sur la côte (Rezaie *et al.*, 2020) et augmentent ainsi la résilience socio-économique des populations locales (Gedan *et al.*, 2010). Il est donc primordial d'étudier les divers impacts que la hausse du niveau marin a sur les marais maritimes afin de prévenir d'éventuels désastres écologiques et d'atténuer les impacts négatifs sur les communautés humaines vivant en zone côtière.

1.3 Objectifs

Ce projet a pour objectif de modéliser la conversion et l'évolution des marais maritimes face à la hausse du niveau marin en utilisant le logiciel SLAMM (*Sea Level Affecting Marshes Model*) (voir méthodologie). Différents scénarios de hausse du niveau marin pour 2055 et 2100 sont modélisés, basés sur les prévisions pour 2055 et 2100 du GIEC (Oppenheimer *et al.*, 2019). Il s'agira de déterminer quel(s) effet(s) chaque scénario peut avoir sur le gain ou la perte de superficie des marais maritimes. Les variations verticales de la croûte terrestre (relèvement isostatique ou subsidence) seront prises en compte dans le calcul de la hausse relative du niveau marin pour chaque secteur de l'EGSL. Les résultats obtenus permettront d'évaluer la sensibilité des marais maritimes à une hausse du niveau marin, ainsi que de pouvoir localiser les habitats les plus vulnérables, en tenant compte des spécificités locales et des changements climatiques appréhendés.

1.4 Territoire à l'étude

Les marais maritimes modélisés ont été choisis en fonction de la disponibilité des données de taux d'accrétion mesurés in situ. Comme l'accrétion des marais maritimes est peu étudiée à l'échelle du Québec maritime et il existe peu de données dans la littérature scientifique. Les marais choisis ont par conséquent fait l'objet d'études antérieures ou bien de campagnes de carottage effectuées par le LDGIZC.

Sur chaque site, le choix de la zone à modéliser a été déterminé de façon à refléter les taux d'accrétion utilisés. Lorsqu'un site contenait des marais avec des dynamiques et des taux d'accrétions distincts, les sites ont été subdivisés en sous-sites. En tout, 8 sites ont été étudiés (figure 1 et tableau 1). Les sections qui suivent décrivent brièvement chacun des sites d'étude.

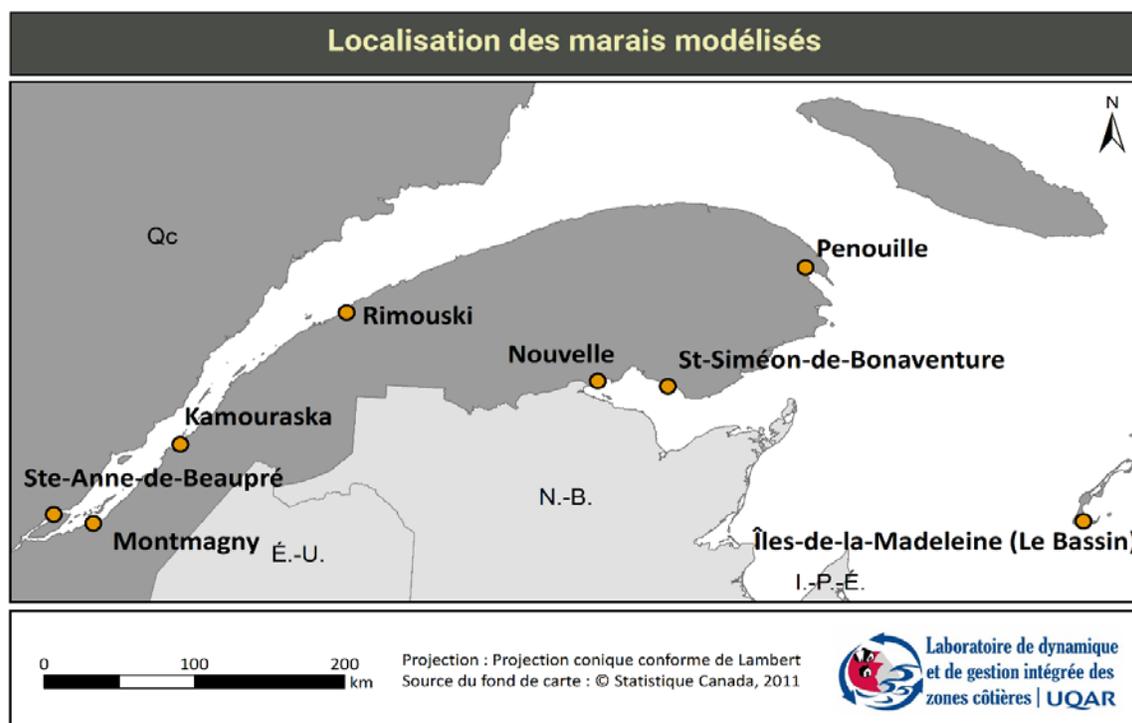


Figure 1 : Localisation des marais maritimes modélisés à partir de SLAMM.

Tableau 1 : Synthèse des marais maritimes modélisés à partir de SLAMM. Les variations isostatiques proviennent principalement du modèle ICE-6G(VM5a).

Site	Superficie modélisée (ha)	Recouvrement par le schorre supérieur (%)	Marnage moyen (m)	Variation isostatique (mm/an)
Îles-de-la-Madeleine	1	86,3	0,6	-3,7
Nouvelle	110	81,1	1,9	-2,5
Saint-Siméon	13	98,0	1,3	-2,7/-0,39 (NAD83v70VG)*
Penouille	23	35,6	1,6	-2,5
Rimouski	90	26,8	3,0	-0,5
Kamouraska	110	50,2	4,1	-0,06
Montmagny	591	15,0	4,8	+0,4
Sainte-Anne-de-Beaupré	457	27,7	5,0	+0,8

* Le marais de Saint-Siméon a également été modélisé en utilisant les valeurs du modèle isostatique NAD83v70VG développé par Ressources naturelles Canada (Robin et al., 2020).

1.4.1 Îles-de-la-Madeleine (IDLM)

Le marais choisi aux IDLM est situé dans la lagune du Bassin situé dans la partie méridionale de l'archipel. Protégé par un cordon littoral, il est situé à l'extrémité nord de la lagune. Le schorre supérieur de *Spartina patens* est également colonisé par des *Schoenoplectus* spp. et le *Juncus gerardii*. Le schorre inférieur est majoritairement composé de *Spartina alterniflora* (Barnett *et al.*, 2017). La surface totale du marais modélisé fait environ un hectare (0,01 km²) et est composée à 86,3 % de schorre supérieur. L'extrémité terrestre du marais est composée d'un marécage arbustif d'eau douce sans apport fluvial. Le secteur est soumis à une marée diurne d'un régime microtidale avec un marnage moyen 0,6 m (Service hydrographique Canadien, 2019).



Figure 2 : Photographie oblique de la partie ouest du marais du Bassin aux Îles-de-la-Madeleine (© LDGIZC, 2017)

1.4.2 Nouvelle

Le secteur modélisé à Nouvelle est situé dans le barachois de la rivière Nouvelle dans la baie de Tracadigache. Le secteur comprend deux marais (figure 3) : le marais à l'embouchure de la rivière Nouvelle est caractérisé par de nombreux chenaux de marée (Figure 4 : Photographie oblique du marais à l'embouchure de la rivière Nouvelle (© LDGIZC, 2017) et le marais situé derrière la flèche littorale sud-ouest est caractérisé par de nombreuses mares et marelles ainsi que de nombreux lobes de tempêtes. Le secteur comprend également un marécage d'eau douce située en amont de la rivière. Les deux marais sont composés d'un schorre inférieur étroit à *Spartina alterniflora* et d'un schorre supérieur à *Spartina patens* en association avec le *Juncus* spp., *Carex paleacea* ainsi que d'une herbaçaie salée dominée entre autres par la *Spartina pectinata*, la *Solidago sempervirens*, l'*Achillea millefolium* et le *Sonchus arvensis* (Quintin, 2010). La superficie totale des marais à Nouvelle est d'environ 110 hectares (1,1 km²), dont 81,1 % sont constitués de schorre supérieur. Le barachois de la rivière Nouvelle est soumis à une marée mixte semi-diurne de régime microtidal avec un marnage moyen de 1,9 m (Service hydrographique du Canada, 2019).

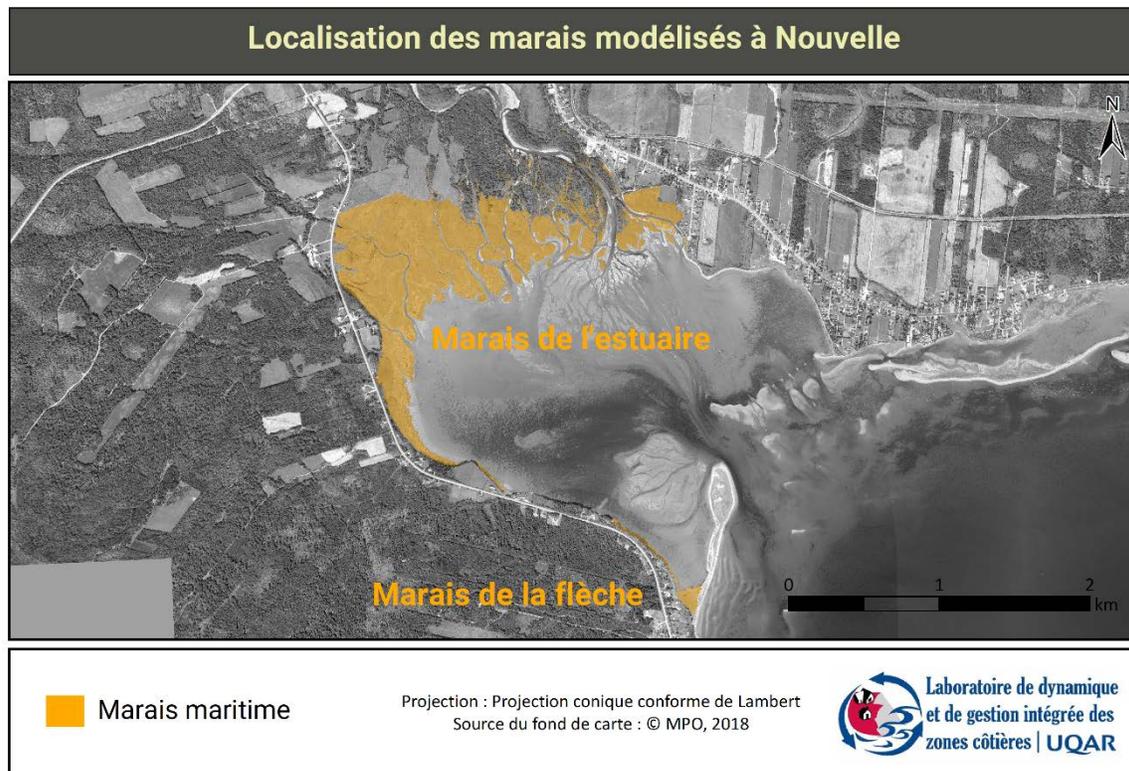


Figure 3 : Localisation des marais modélisés à Nouvelle



Figure 4 : Photographie oblique du marais à l'embouchure de la rivière Nouvelle (© LDGIZC, 2017)

1.4.3 Saint-Siméon-de-Bonaventure (Saint-Siméon)

Le marais est localisé derrière la flèche de St-Siméon-Est. Il est séparé en deux par la route de l'île. Le marais est caractérisé par l'érosion du schorre supérieur (Réseau de suivi de l'érosion du LDGIZC, données internes) ainsi qu'une quasi-absence de schorre inférieur. D'une superficie d'environ 13 hectares (0,13 km²), 98 % de sa surface est constitué de schorre supérieur. Le schorre supérieur de *Spartina patens* est également composé de *Juncus* spp., de *Schoenoplectus* spp. et de *Glaux maritima*. La *Spartina alterniflora* et *Salicornia depressa* occupe le schorre inférieur. L'espace de transition entre le domaine terrestre et maritime est majoritairement occupé par la *Myrica gale* (Barnett *et al.*, 2019). La route 132 est située approximativement à 100 m du fond de marais. Le marais est soumis à une marée mixte semi-diurne de régime microtidale avec un marnage moyen de 1,3 m (Service hydrographique du Canada, 2019).



Figure 5 : Photographie oblique du marais de St-Siméon-de-Bonaventure (© LDGIZC, 2017)

1.4.4 Penouille

Le marais est localisé derrière la presqu'île de Penouille situé dans la baie de Gaspé. D'une superficie de 23 hectares (0,23 km²), il est dominé par un schorre inférieur, correspondant à 64,4 % de sa surface totale. Le marais est relativement stable et l'érosion est mineure (Bernatchez et al, 2013). Le schorre inférieur de *Spartina alterniflora* est également composé de *Plantago maritima* et de *Glaux maritima*. Le schorre supérieur de *Spartina Patens* et de *Juncus gerardii* est également composé de *Carex paleacea* et *Potentilla anserina*. Le marais est soumis à une marée mixte semi-diurne microtidale avec un marnage moyen de 1,6 m (Service hydrographique du Canada, 2019).



Figure 6 : Photographie oblique du marais de Penouille dans le Parc National de Forillon (© LDGIZC, 2017)

1.4.5 Rimouski

Le marais modélisé de Sacré-Cœur à Rimouski est compris entre la plage du Rocher Blanc à l'ouest et la plage de Nazareth à l'est. Le marais est caractérisé par la présence de nombreuses marelles dans le schorre supérieur et une érosion de son secteur est par la transgression d'un lobe de tempête (Comité ZIP du Sud-de-l'Estuaire, 2013). Le secteur modélisé s'étend sur environ 90 hectares (0,9 km²), composé à 73,2 % de schorre inférieur. Le marais est soumis à une marée de type semi-diurne mesotidale avec un marnage moyen de 3 m (Service hydrographique du Canada, 2019).



Figure 7 : Photographie oblique de la partie ouest du marais de Sacré-Cœur à Rimouski (© LDGIZC, 2017)

1.4.6 Kamouraska

Le marais est situé dans la baie de Kamouraska, depuis la pointe face aux îles Bare jusqu'au Motel Cap Blanc. Le marais a été anthropisé par la construction d'aboteaux en 1937 et en 1980 venant ainsi réduire l'étendue de son schorre supérieur. Un microtalus d'érosion du schorre supérieur est présent à l'ouest de la baie. La surface modélisée représente environ 110 hectares (1,1 km²), dont 50,2 % sont composés de schorre supérieur. Le marais, à l'est, est principalement composé de *Spartina alterniflora*, de *Atriplex prostrata*, de *Scirpus maritimus*, de *Spartina patens* et de *Solidago sempervirens* (Joubert et Bachand, 2012). Le marais est soumis à une marée semi-diurne macrotidale avec un marnage moyen de 4,1 m (Service hydrographique du Canada, 2019).



Figure 8 : Photographie oblique de la partie ouest du marais de la baie de Kamouraska (© LDGIZC, 2017)

1.4.7 Montmagny

Le marais modélisé à Montmagny s'étend de la rivière Vincelotte à Cap-Saint-Ignace à l'est jusqu'au chemin Montée 395 à l'ouest. Avec environ 591 hectares (5,91 km²) de superficie, dont 85 % de schorre inférieur, il correspond à l'un des plus vastes complexes de marais du Québec. Il est caractérisé par une érosion généralisée du schorre supérieur résultant en une microfalaise de 40 à 180 cm de hauteur (Dionne, 2004). Le marais inférieur est composé principalement de *Schoenoplectus americanus*, de *Zizania aquatica* et de *Sagittaria* spp.. À l'instar des schorres supérieurs de l'estuaire maritime, le couvert végétal est diversifié et comprend une multitude d'espèces (Dionne, 2004). Le marais est soumis à une marée semi-diurne de régime macrotidale avec un marnage moyen d'environ 4,8 m (Service hydrographique du Canada, 2019).

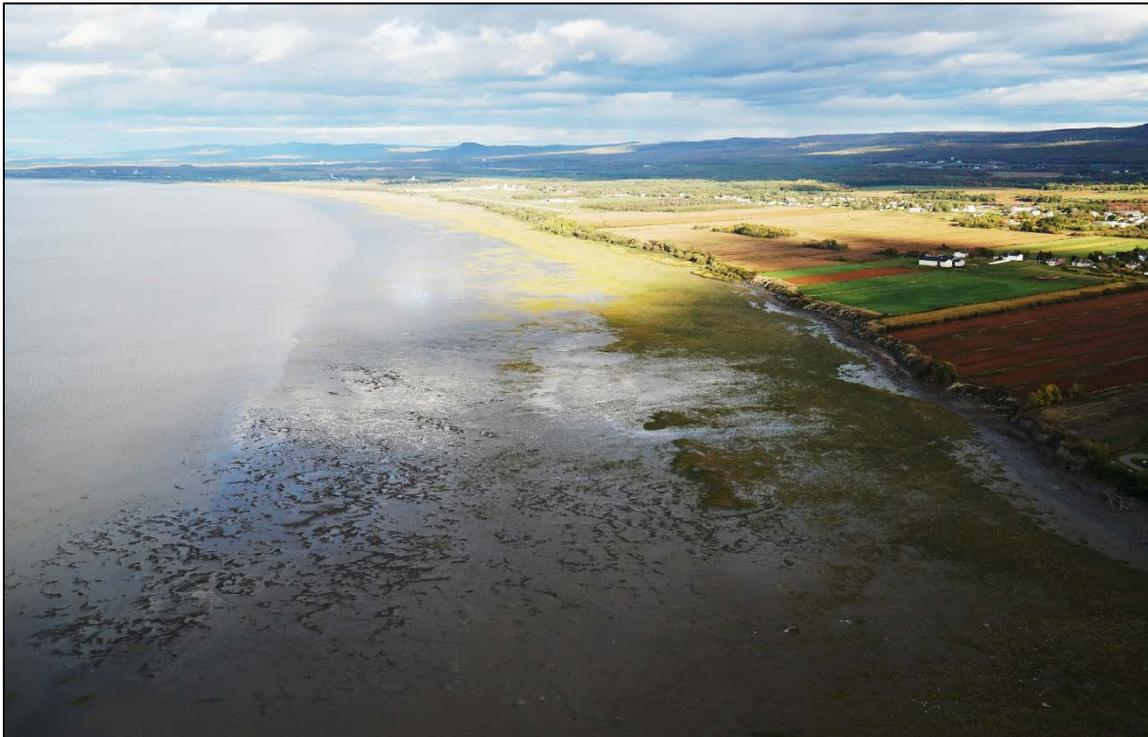


Figure 9 : Photographie oblique du marais à l'est de Montmagny (© LDGIZC, 2017)

1.4.8 Sainte-Anne-de-Beaupré

Le marais Sainte-Anne-de-Beaupré (SAB) s'étend de Château-Richer jusqu'à la pointe le Petit Cap à l'intérieur de la Réserve nationale de faune du Cap-Tourmente. Le marais est d'une superficie de 457 hectares (4,57 km²), dont 72,3 % sont constitués de schorre inférieur. Le secteur entre le quai et la rivière Sainte-Anne est caractérisé par une érosion généralisée du schorre supérieur, provoquant une microfalaise de 75 à 200 cm de hauteur (Dionne, 2004). La limite terrestre du marais salé correspond à un marécage arboré et arbustif. Le marécage est adossé sur du remblai supportant la route 138 et le cadre bâti. Le marais inférieur est composé principalement de *Schoenoplectus americanus*, de *Zizania aquatica* et de *Sagittaria* spp.. Comme le marais de Montmagny, le couvert végétal du schorre supérieur est diversifié et comprend une multitude d'espèces (Dionne, 2004). Le marais est soumis à une marée semi-diurne de régime macrotidale avec un marnage moyen d'environ 5 m (Service hydrographique du Canada, 2019).

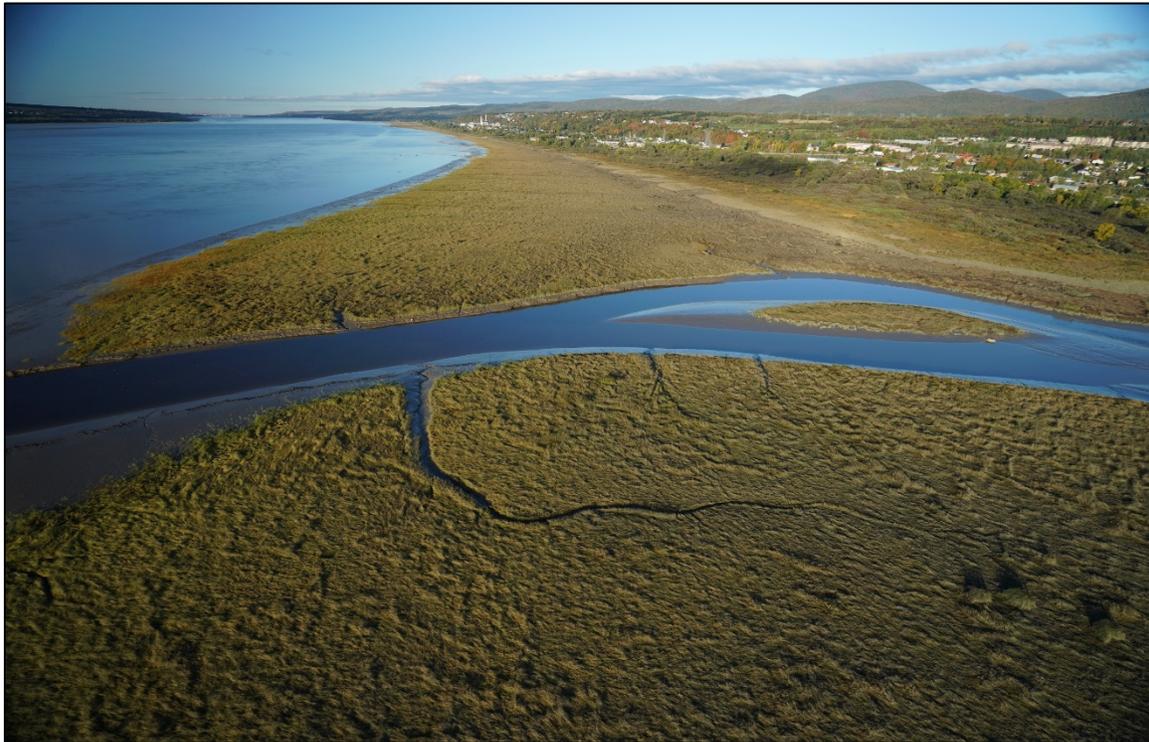


Figure 10 : Photographie oblique du marais à l'ouest de l'embouchure de la rivière Sainte-Anne à Beaupré (© LDGIZC, 2017)

2. Méthodologie

2.1 Présentation du modèle

La modélisation a été réalisée à partir du logiciel [SLAMM](#) (*Sea Level Affecting Marshes Model*), version 6.7. Cette application est reconnue comme un outil efficace pour prédire l'évolution des marais maritimes dans un contexte de hausse du niveau marin (Warren Pinnacle Inc., 2014). À partir d'arbres décisionnels intégrant des composantes géométriques et qualitatives, SLAMM permet de produire des cartes de répartition spatiale des écosystèmes sur plusieurs échelles de temps. Il réalise la simulation de six processus primaires, dont les phénomènes d'inondation, d'accrétion, d'érosion, de saturation du sol, de salinité et de migration de cordon littoral par débordements de tempête (c.-à-d. *overwash* en anglais). Il classe un territoire d'étude en 26 catégories, dérivées du *National Wetlands Inventory*s (Warren Pinnacle Inc., 2014). De manière générale, le modèle permet d'effectuer des simulations avec les données projetées du GIEC sur la hausse du niveau marin ou à des taux fixes.

Le modèle SLAMM n'est pas un modèle hydrodynamique, mais modélise la conversion d'écosystème selon le principe d'état d'équilibre de la distribution verticale de ces écosystèmes par rapport au niveau marin (figure 11). En effet, le modèle suppose que les milieux humides côtiers occupent un espace relatif à leurs fréquences d'inondation en fonction du marnage d'un site d'étude. La variation de ces espaces est ensuite modélisée en fonction de la hausse du niveau marin projetée et ajustée selon certains paramètres venant affecter l'élévation du marais, comme les taux d'accrétions et les variations verticales de la croûte terrestre.

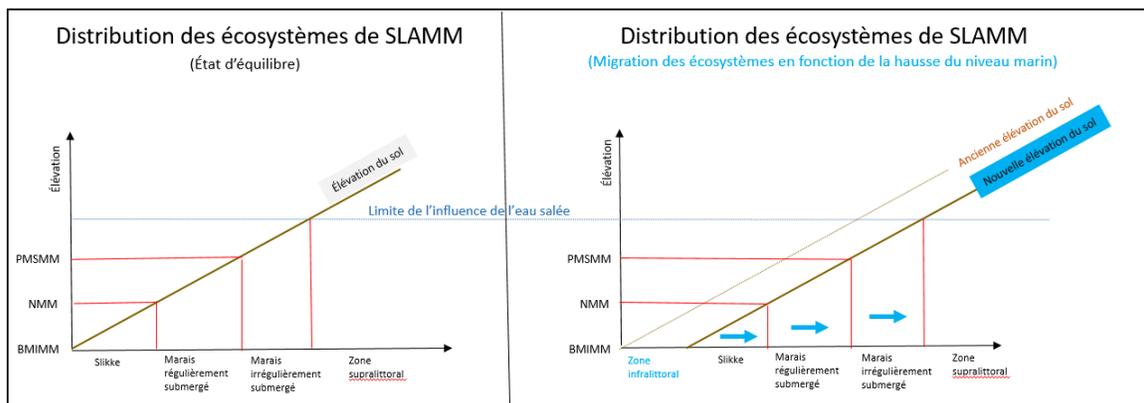


Figure 11 : Conversion d'écosystème côtier en réponse à la hausse du niveau marin (traduit de Warren Pinnacle Inc., 2014)

Le modèle SLAMM sépare le site d'étude en plan quadrillé (grille) où chaque cellule est modélisée indépendamment. Ainsi, chaque cellule se voit assigner une valeur d'élévation par rapport au référentiel de marée, une valeur de pente et une classe d'écosystème (figure 12). Dans un contexte de hausse du niveau marin, la conversion d'une classe d'écosystème est effectuée lorsque 1) la fréquence d'inondation maximale d'une classe d'une cellule est atteinte et 2) la cellule est connectée à la mer directement ou par une/des cellules connectées.

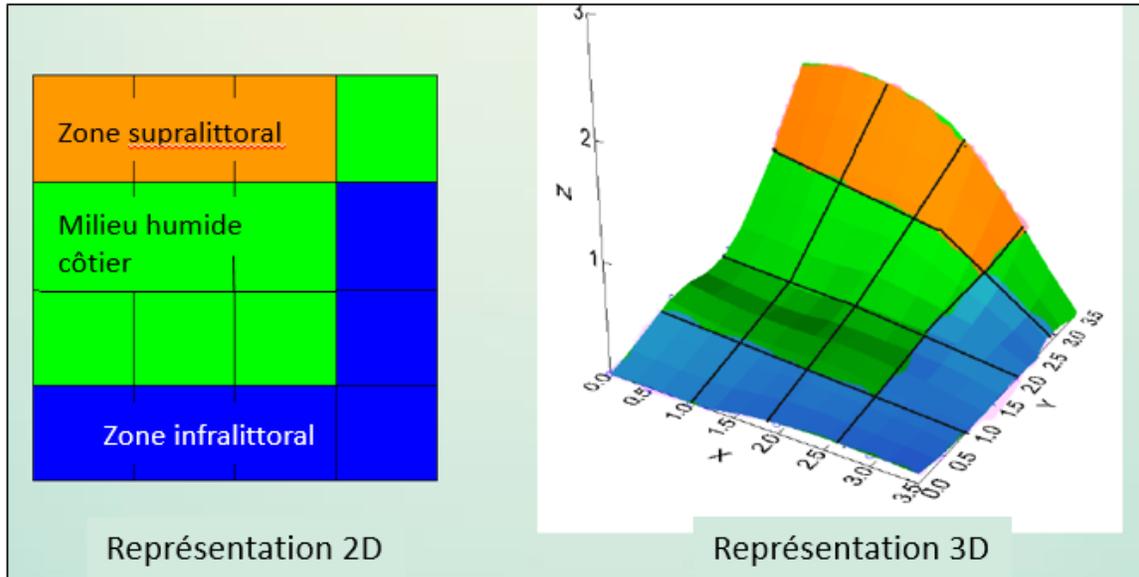


Figure 12 : Représentation du quadrillage effectué par SLAMM (traduit de Warren Pinnacle Inc. 2014)

2.2 Données utilisées en intrant pour SLAMM (*File Setup*)

Trois intrants surfaciques sont nécessaires à la génération des modèles sur SLAMM pour chaque marais : l'élévation de marais, les différentes caractérisations des écosystèmes présents dans le marais et la pente du marais. Ces intrants subissent diverses étapes de traitement afin d'avoir les mêmes dimensions (c.-à-d. même nombre de lignes et de colonnes). Les intrants sont nommés en anglais pour refléter le titre des intrants du logiciel.

2.2.1 Fichier d'élévation (*DEM File*)

Le premier type de fichier nécessaire est donc le fichier d'élévation (*Digital Elevation Model* ou DEM) de la zone d'étude. Ce fichier est dérivé de données LiDAR et il est ensuite converti en format ASCII (format compatible avec SLAMM) à l'aide du logiciel ArcGIS. Les unités sont en mètres.



Figure 13 : Schéma des étapes de création de l'intrant DEM File

2.2.2 Catégories d'écosystèmes (*SLAMM Categories*)

Le deuxième type de fichier est le fichier de la caractérisation des écosystèmes côtiers générés par l'équipe du chantier sur la cartographie des écosystèmes côtiers du projet Résilience côtière

(Jobin *et al.* 2021). Il s'agit d'un shapefile de polygones, dont chacun représente un écosystème côtier (avec un géosystème associé). Pour être utilisé dans SLAMM, un code correspondant aux catégories classiques de SLAMM est assigné pour chaque géosystème (tableau 2). Une validation visuelle est ensuite effectuée pour l'ensemble des catégories. Ainsi, après les étapes de traitement, le fichier contenant les codes des catégories de SLAMM peut être converti en format ASCII comme le fichier d'élévation.



Figure 14 : Schéma des étapes de création de l'intrant SLAMM Categories (NWI)

2.2.3 Fichier de pente (*SLOPE File*)

Un fichier de pente est nécessaire pour calculer la connectivité hydrologique entre les différentes cellules. Ce fichier est un raster dérivé du DEM dans lequel la pente est générée à partir de la différence d'élévation entre les pixels juxtaposés. Le fichier de pente est converti en format ASCII avec ArcGIS de la même manière que les deux intrants présentés précédemment. Les unités du fichier sont en degrés.



Figure 15 : Schéma des étapes de création de l'intrant Slope File

Tableau 2 : Conversion des noms et codes des écosystèmes cartographiés en noms des catégories équivalentes dans le logiciel SLAMM. Les écosystèmes ont été préalablement identifiés dans le chantier Cartographie des écosystèmes côtiers du Québec maritime du projet Résilience (Jobin et al., 2021).

Catégories SLAMM	Code SLAMM	Description	Définition
<i>Developed Dry Land OR Undeveloped Dry Land</i>	1 OU 2	Colline rocheuse	Relief généralement modéré et relativement peu étendu qui s'élève au-dessus d'une plaine ou d'un plateau.
		Complexe deltaïque	Vaste delta quaternaire mis en place à l'embouchure d'une rivière lorsque le niveau était plusieurs mètres au-dessus de l'actuel.
		Cordon littoral	Forme de relief oblongue construite suite à l'accumulation de sédiments par les vagues sans être attachée à la côte.
		Côte accore rocheuse	Côte rocheuse élevée et coupée presque verticalement à la surface de la mer le long de laquelle les profondeurs augmentent rapidement.
		Côte artificielle	Côte qui constitue un remblai dans la zone côtière.
		Côte rocheuse sans falaise	Côte rocheuse sans falaise et à pente douce possédant parfois des écueils rocheux.
		Dune	Forme de relief construite avec des sédiments meubles par la dynamique éolienne.
		Falaise meuble	Escarpement de dépôts non consolidés (argiles, limons, sables, graviers, galets, blocs).
		Falaise meuble à base rocheuse	Escarpement de dépôts non consolidés (argiles, limons, sables, graviers, galets, blocs) dont la base est constituée de roche consolidée sur moins de la moitié de la hauteur.
		Falaise rocheuse	Escarpement de roche consolidée.
		Falaise rocheuse à sommet meuble	Escarpement rocheux surmonté d'un dépôt meuble sur moins de la moitié de la hauteur et qui influence le mode de recul de la falaise.
		Flèche littorale	Accumulation de sable ou de gravier qui s'attache à la côte et qui s'étire généralement parallèlement à celle-ci ; l'extrémité est libre.
		Plaine	Surface étendue, généralement de basse altitude, peu accidentée et de faible dénivellation.
Plateau	Vaste étendue de terrain, élevée et relativement uniforme, délimitée par des versants et souvent bordée par une falaise côtière.		

Catégories SLAMM	Code SLAMM	Description	Définition
		Terrasse de plage	Accumulation de sable ou de gravier littoral formée d'un replat généralement végétalisé qui est très rarement submergé par les marées.
		Terrasse de plage dunifiée	Terrasse de plage dont la surface est remaniée par l'action du vent.
		Tombolo	Accumulation basse de sables ou de graviers qui relie la côte à un îlot souvent rocheux ou deux îlots rocheux entre eux.
		Tombolo dunifié	Tombolo dont la surface est remaniée par l'action du vent.
		Tourbière	Les tourbières sont des milieux humides dans lesquels de la tourbe se forme et s'accumule avec le temps à partir de plantes mortes.
		Versant	Bordure côtière d'un relief important avec une pente plus ou moins forte et non reliée à l'évolution côtière.
		Non déterminé	Non déterminé.
<i>Inland-Fresh Marsh</i>	5	Marécage	Étendue de terrain imprégnée ou recouverte d'eau douce et occupée par une végétation surtout arbustive.
<i>Tidal Creek</i>	18	Chenal fluvial	Chenal creusé et maintenu par le courant d'eau douce d'une rivière.

Catégories SLAMM	Code SLAMM	Description	Définition
<i>Estuarian Open Water</i>	19	Écueil	Rocher ou amoncellement de roches à fleur d'eau sur le bas estran ou dans la zone infralittorale.
<i>Estuarine Beach</i>	12	Bas estran meuble	Bas estran dont le substrat principal est meuble.
		Batture	Vaste bas estran meuble à très faible pente.
		Delta	Accumulation de sédiments par un cours d'eau à son embouchure. Comprends souvent un chenal principal et des chenaux secondaires.
		Delta de marée	Accumulation sédimentaire aux extrémités d'une passe.
		Lagune	Étendue d'eau salée/saumâtre séparée de la mer par un cordon ou une flèche littorale et avec laquelle elle communique par un étroit passage.
<i>Irregularly Flooded Marsh</i>	20	Schorre supérieur	Partie la plus élevée du marais, recouverte à marée haute seulement dans les marées de vives eaux.
<i>Not used</i>	21	Non déterminé	Non déterminé.
<i>Ocean Beach</i>	10	Bas estran meuble	Bas estran dont le substrat principal est meuble.
		Batture	Vaste bas estran meuble à très faible pente.
		Delta	Accumulation de sédiments par un cours d'eau à son embouchure. Comprends souvent un chenal principal et des chenaux secondaires.
		Delta de marée	Accumulation sédimentaire aux extrémités d'une passe.
		Plage	Accumulation littorale de faible pente et constituée de sédiments allant du sable au bloc.
<i>Open Ocean</i>	17	Écueil	Rocher ou amoncellement de roches à fleur d'eau sur le bas estran ou dans la zone infralittorale.
		Infralittoral meuble	Zone infralittorale dont le substrat principal est meuble.
		Infralittoral rocheux	Zone infralittorale dont le substrat principal est rocheux.
<i>Regularly Flooded Marsh</i>	8	Schorre inférieur	Partie inférieure du marais, recouverte à chaque marée haute.
<i>Rocky Intertidal</i>	14	Bas estran rocheux	Bas estran dont le substrat principal est le socle rocheux.
		Écueil	Rocher ou amoncellement de roches à fleur d'eau sur le bas estran ou dans la zone infralittorale.
		Haut estran rocheux	Haut estran dont le substrat principal est le socle rocheux.

Catégories SLAMM	Code SLAMM	Description	Définition
		Platier	Estran rocheux à très faible pente, dont la surface est relativement plane.
<i>Tidal Creek</i>	18	Chenal estuarien	Portion d'un chenal creusé et maintenu par le courant d'eau douce d'une rivière dont l'eau salée est présente à marée haute.
<i>Tidal Flat</i>	11	Batture	Vaste bas estran meuble à très faible pente.
		Slikke	Type de batture non végétalisée ou peu végétalisée et constituée de vase (ou sablo-vaseux). Elle est associée et contigüe au schorre inférieur ou supérieur.
		Vasière	Type de batture non végétalisée ou peu végétalisée et constituée de vase.
<i>Tidal Fresh Marsh</i>	6	Marécage intertidal	Portion du haut estran pouvant être inondé aux pleines mers supérieures de grandes marées.

2.3 Données utilisées en intrant pour SLAMM (*Parameters*)

Le tableau des paramètres utilisés pour chaque site se trouve dans l'annexe 1.

2.3.1 Hausse du niveau marin

2.3.1.1 Hausse historique du niveau marin

Dans SLAMM, les paramètres de hausse historique et eustatique sont utilisés pour calculer l'apport isostatique dans les variations du niveau marin relatif en effectuant leurs différences. La valeur d'ajustement isostatique est ensuite ajoutée aux différents scénarios de hausse du niveau marin.

Pour cette étude où les scénarios utilisés incluent préalablement l'ajustement isostatique, les valeurs de hausse historique et eustatique du niveau marin ont été hypothétiquement définies comme identiques, sachant cependant que cela n'est pas le cas. Cette manière de faire a simplement permis de ne pas répéter le calcul d'ajustement isostatique dans les différents scénarios de hausse du niveau marin.

2.3.1.2 Scénario de hausse du niveau marin

Les scénarios de hausse du niveau marin ont été calculés à l'aide des projections extraites du *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (SROCC), produit par le GIEC en 2019 (Oppenheimer *et al.*, 2019). Les scénarios du GIEC ont ensuite été raffinés à l'aide du modèle d'ajustement isostatique ICE-6G (VM5a) de Peltier *et al.* (2015). Les valeurs utilisées sont indiquées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Tableau des projections de la hausse régionale du niveau de la mer (m) pour les sites modélisés avec SLAMM pour l'horizon 2055 et 2100. Les projections sont tirées des limites médianes (Médian) et supérieures (Supérieur) du scénarios RCP 8.5 du GIEC.

	2055 — Médian	2055 — Supérieur	2100 — Médian	2100 — Supérieur
Nouvelle	0,310	0,664	0,785	1,429
Saint-Siméon	0,327	0,681	0,815	1,459
Penouille	0,313	0,667	0,792	1,436
Rimouski	0,246	0,572	0,673	1,285
Kamouraska	0,219	0,545	0,627	1,239
Montmagny	0,190	0,516	0,578	1,190
SAB	0,162	0,489	0,532	1,143
IDLM	0,366	0,673	0,870	1,461

Pour cette étude, les scénarios de hausse du niveau marin sont basés sur le RCP 8.5 (*Representative Concentration Pathway*) développé par le GIEC dans le cadre de la phase 5 (CMIP5) du projet d'intercomparaison de modèles couplés du Programme mondial de recherche

sur le climat (Cubasch *et al.*, 2013). Les différents scénarios RCP représentent les scénarios futurs d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et permettent de modéliser la réponse du niveau marin aux changements climatiques. Le RCP 8.5 correspond au scénario le plus pessimiste d'émissions de GES du GIEC en proposant une hausse constante des GES jusqu'à la fin du siècle. Le RCP 8.5 a été choisi, car plusieurs rapports démontrent que les valeurs de hausse du niveau marin en 2100 pourraient surpasser les valeurs maximales prédites par le GIEC (Horton *et al.*, 2020 ; Garner *et al.*, 2018). Les prévisions de hausse du niveau marin ont été générées pour les horizons 2055 et 2100 avec une estimation médiane et des limites supérieures du modèle pour chaque horizon.

Au Québec maritime, il y a une grande variabilité des taux de variation verticale de la croûte terrestre liée à l'ajustement glacio-isostatique (GIA). Pour obtenir des scénarios de hausse du niveau marin plus précis, les projections du SROCC — avec une résolution spatiale grossière de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ degrés — ont été raffinées pour refléter davantage les conditions de chaque site. Pour ce faire, le signal de GIA du modèle SROCC a été effacé pour ensuite être remplacé par les valeurs du modèle ICE-6G de Peltier, disponible à une résolution plus fine de $0,2^{\circ} \times 0,2^{\circ}$ degré.

2.3.2 Ajustement isostatique

Comme le Québec maritime est situé près du centre des anciennes masses de glace, il existe un grand gradient dans les taux de variation de la croûte terrestre. Plusieurs modèles estiment les variations de la croûte terrestre liées à l'ajustement isostatique. Pour le Québec maritime, les valeurs entre les différents modèles sont hétérogènes et peuvent aller d'un relèvement isostatique de 4 mm par an à un enfoncement de 4 mm par an (Bernatchez *et al.*, 2020). Cette étude a utilisé le modèle global ICE-6G (VM5a) (Peltier *et al.*, 2015), car c'est celui utilisé dans le SROCC. Le marais de Saint-Siméon a également été modélisé en utilisant les valeurs d'un autre modèle isostatique : le modèle NAD83v70VG développé par Ressources naturelles Canada (Robin *et al.*, 2020) car l'étude de Barnett *et al.* (2019) prétend que les valeurs de ce modèle sont plus précises pour ce marais en particulier. Les différentes modélisations à St-Siméon permettent donc de saisir l'importance du taux d'ajustement isostatique dans la réponse d'un marais à la hausse du niveau marin. Les taux d'ajustement isostatique utilisés pour chaque marais sont disponibles dans le tableau 1.

2.3.3 Données Marégraphiques

Le modèle SLAMM suppose que l'espace occupé par les différents milieux humides côtiers est régi par leurs fréquences d'inondations par la mer. Les données marégraphiques sont donc nécessaires pour définir la distribution verticale des écosystèmes de chaque site d'étude. L'ensemble des données marégraphiques sont tirées des données fournies par le Service hydrographique Canadien.

2.3.3.1 Conversion zéro des cartes à géodésique

La conversion du zéro des cartes (ZC) en datum géodésique est effectuée pour ramener les différents niveaux d'eau au même système géodésique que les modèles numériques de terrain.

Pour cette étude le zéro des cartes, défini par le Service hydrographique du Canada est converti en CGVD28 et exprimé en mètre au-dessus du niveau moyen des mers selon l'équation 1.

Équation 1 : Conversion ZC en CGVD28

$$\text{Conversion ZC en CGVD28} = \text{MTL}(\text{ZC}) - \text{MTL}(\text{CGVD28})$$

2.3.3.2 Limite de l'influence de l'eau salée

SLAMM définit le *salt elevation* comme l'élévation où l'influence de la mer sur les écosystèmes commence à diminuer. Ce niveau correspond généralement au niveau d'eau atteint par la mer tous les 30 jours et se retrouve entre la pleine mer supérieure de grande marée (PMSGM) et la pleine mer supérieure de marée moyenne (PMSMM). Lorsqu'un site se trouvait à proximité d'une station marégraphique, le paramètre *salt elevation* a été calculé en effectuant une analyse d'intervalle de récurrence des données quotidiennes de niveau d'eau du Service hydrographique du Canada (disponible en ligne : www.qc.dfo-mpo.gc.ca/tides). Lorsque les données quotidiennes de niveau d'eau *in situ* étaient indisponibles, le paramètre *salt elevation* a été défini comme une valeur légèrement inférieure à la PMSGM et ensuite calibrée avec SLAMM en modélisant les écosystèmes à partir d'un temps zéro (section 2.4).

2.3.3.3 Marnage utilisé comme intrant

Le *Great Diurnal Tide Range* correspond au marnage de marée moyenne, c'est-à-dire la différence entre la marée moyenne de pleine mer supérieure et la marée moyenne de basse mer inférieure.

2.3.4 Données d'érosion

SLAMM offre la possibilité d'entrer des taux d'érosion dans le modèle (*marsh erosion*). Par contre, l'érosion du modèle SLAMM peut seulement être activée sur les cellules du schorre supérieur juxtaposées à une cellule d'eau libre donc une fois le schorre inférieur complètement disparu. Ce paramètre ne reflète pas la dynamique d'érosion des marais maritimes du Québec où le schorre supérieur peut être en érosion même lorsqu'il y a présence du schorre inférieur (Dionne, 2004). L'érosion n'a donc pas été intégrée à cette étude.

2.3.5 Données d'accrétion

Les données d'accrétion utilisées pour les simulations SLAMM ont été récupérées dans la littérature et à partir de mesures terrain effectuées par LDGIZC. De manière générale, les données de taux d'accrétion ayant été obtenues par une datation au plomb P^{210} , un isotope radioactif, ont été priorisées. Cette datation est davantage utilisée pour des datations récentes d'environ 0 à 150 ans (Appleby, 2001). Lorsque cela n'a pas été possible, la datation au carbone C^{14} ou en dendrochronologie a été employée. Le tableau 4 indique quelle méthode a été utilisée pour chacun des marais. Finalement, dans les sites où les données d'accrétion du schorre inférieur étaient manquantes, les taux d'accrétion du schorre supérieur ont été utilisés.

Tableau 4 : Taux d'accrétion et types de datation utilisée dans SLAMM par site d'étude. Le détail des valeurs d'accrétion utilisées est disponible dans l'Erreur ! Source du renvoi introuvable..

Site d'étude	Taux d'accrétion (mm/an)	Type de datation utilisée	Source
Iles-de-la-Madeleine	1	plomb P ²¹⁰	Barnett <i>et al.</i> (2017)
Nouvelle	3,1 – 7,02	Dendrochronologie et carbone C ¹⁴	Quintin (2010)
Saint-Siméon	0,95	plomb P ²¹⁰	Barnett <i>et al.</i> (2019)
Penouille	0,93 – 1,05	plomb P ²¹⁰	Bernatchez <i>et al.</i> (2020)
Rimouski	1,6	carbone C ¹⁴	LDGIZC (Données internes non publiées)
Kamouraska	2,3	plomb P ²¹⁰	Hatvany (2002)
Montmagny	2,5 – 3	carbone C ¹⁴	Dionne (2004)
Sainte-Anne-de-Beaupré	2,5 – 3,5	carbone C ¹⁴	Dionne (2004)

2.4 Calibration du modèle

La calibration du modèle est effectuée dans une étape appelée le « temps zéro » qui modélise les écosystèmes sans hausse du niveau marin. Cette étape permet de valider le modèle d'élévation numérique, les polygones d'écosystèmes et les différents paramètres marégraphiques.

En utilisant le modèle d'élévation numérique, les paramètres marégraphiques et les limites d'élévation définis pour chaque écosystème, SLAMM modélise les différentes classes d'écosystèmes réparties sur le site d'étude. Cette modélisation est effectuée lors du « temps zéro » correspondant à l'année d'acquisition du modèle d'élévation numérique. Suite à la modélisation, une comparaison entre les surfaces des classes d'écosystèmes utilisés comme intrant et celles modélisées est effectuée.

La modélisation du « temps zéro » permet ainsi de repérer les incongruités dans les intrants et les paramètres ainsi que de raffiner le modèle à l'aide de l'ajustement des limites d'élévations de chaque écosystème.

2.5 Cartes de variation de surface de marais

Les cartes présentant les variations de surface des marais modélisés ont été créées à l'aide du logiciel Arcmap 10.7 de ESRI. Elles ont été créées en soustrayant les résultats des surfaces modélisés par SLAMM en 2055 et 2100 à celles modélisées au temps zéro.

2.6 Simulation du démantèlement des aboiteaux de Kamouraska

La réponse potentielle du marais au démantèlement des aboiteaux a pu être modélisée en modifiant l'élévation du modèle numérique de terrain à l'aide du logiciel Arcmap 10.7 de ESRI et de l'outil Raster Calculator. L'élévation originale de l'aboteau a ainsi été remplacée à celle du terrain avoisinant de sorte à simuler son démantèlement. La réponse est évaluée au moment du démantèlement et à l'horizon 2055 et 2100 selon la hausse prédite par les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5.

3. Résultats

3.1 Iles-de-la-Madeleine (IDL M)

Les résultats de la modélisation du marais de Bassin aux IDLM présentent une augmentation généralisée de sa surface. L'accroissement de la surface du marais est plus marqué et constant dans les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 où sa surface totale connaît une augmentation de 534 % en passant de 1,4 hectare en 2018 à 9,2 hectares en 2100 (figure 17). Les résultats de la modélisation à l'aide des valeurs médianes du scénario RCP 8.5 présentent une légère augmentation de l'ensemble des surfaces du marais en 2055 suivi d'une forte augmentation en 2100 (figure 16) attribuer à un gain de schorre supérieur (figure 19). La figure 18 présente la répartition du marécage arbustif d'eau douce en 2019. Les différentes cartes de variation de la surface de marais illustrent donc la conversion graduelle du marécage arbustif en marais maritime.

La réponse du marais des IDLM aux différentes hausses de niveau marin est intéressante. Bien que le marais présente un taux d'accrétion moyen de 1 mm/an (tableau 4) et est sujet à connaître une forte hausse du niveau marin (tableau 3), les résultats de la modélisation indiquent une augmentation généralisée de sa surface. Cette augmentation est rendue possible en raison de l'absence d'obstacle venant empêcher la migration de marais vers les terres et de la présence d'une grande zone humide de basse élévation à l'arrière du marais (figure 2 et figure 18). Ces facteurs permettent ainsi au marais de migrer vers les terres lors d'une hausse du niveau marin relatif.

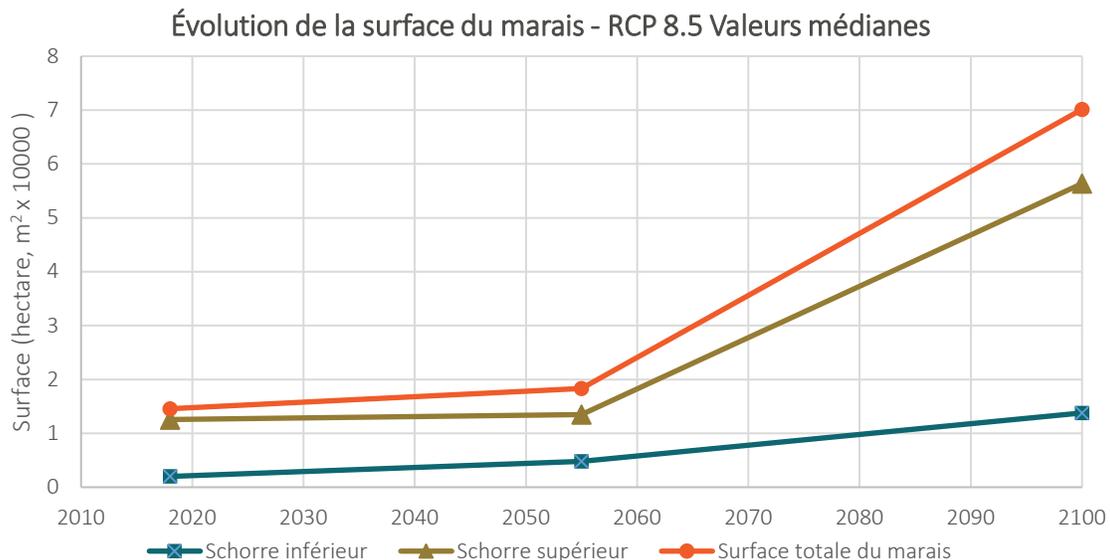


Figure 16 : Évolution de la surface du marais des Îles-de-la-Madeleine selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

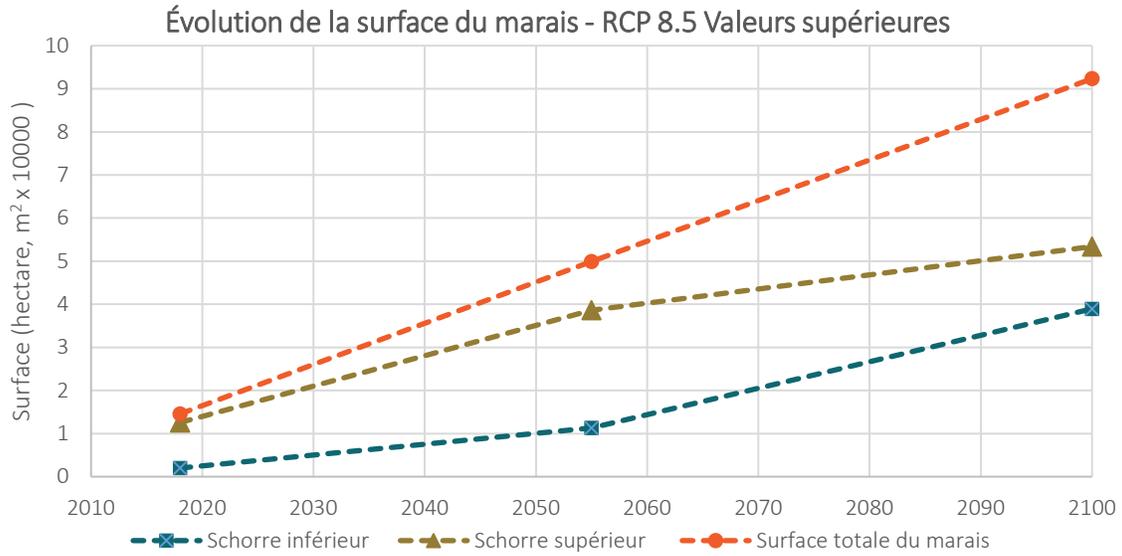


Figure 17 : Évolution de la surface du marais des îles-de-la-Madeleine selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

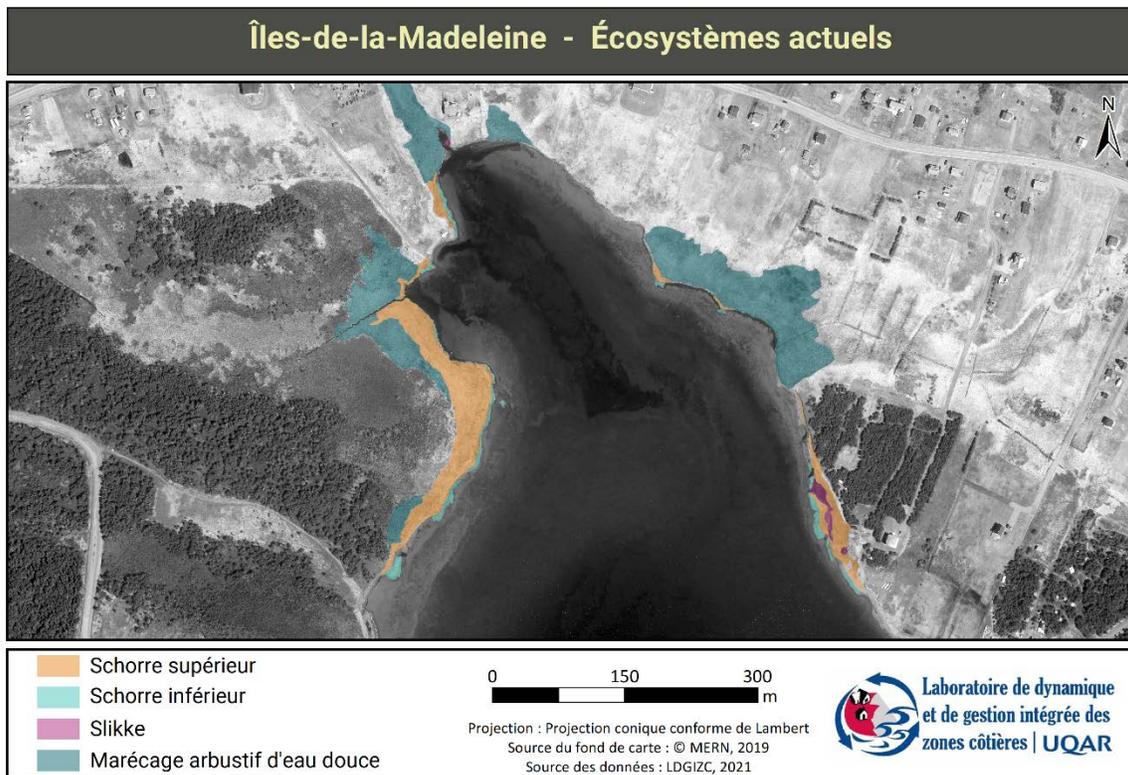


Figure 18 : Représentation cartographique des écosystèmes du marais de Bassin aux îles-de-la-Madeleine en 2019

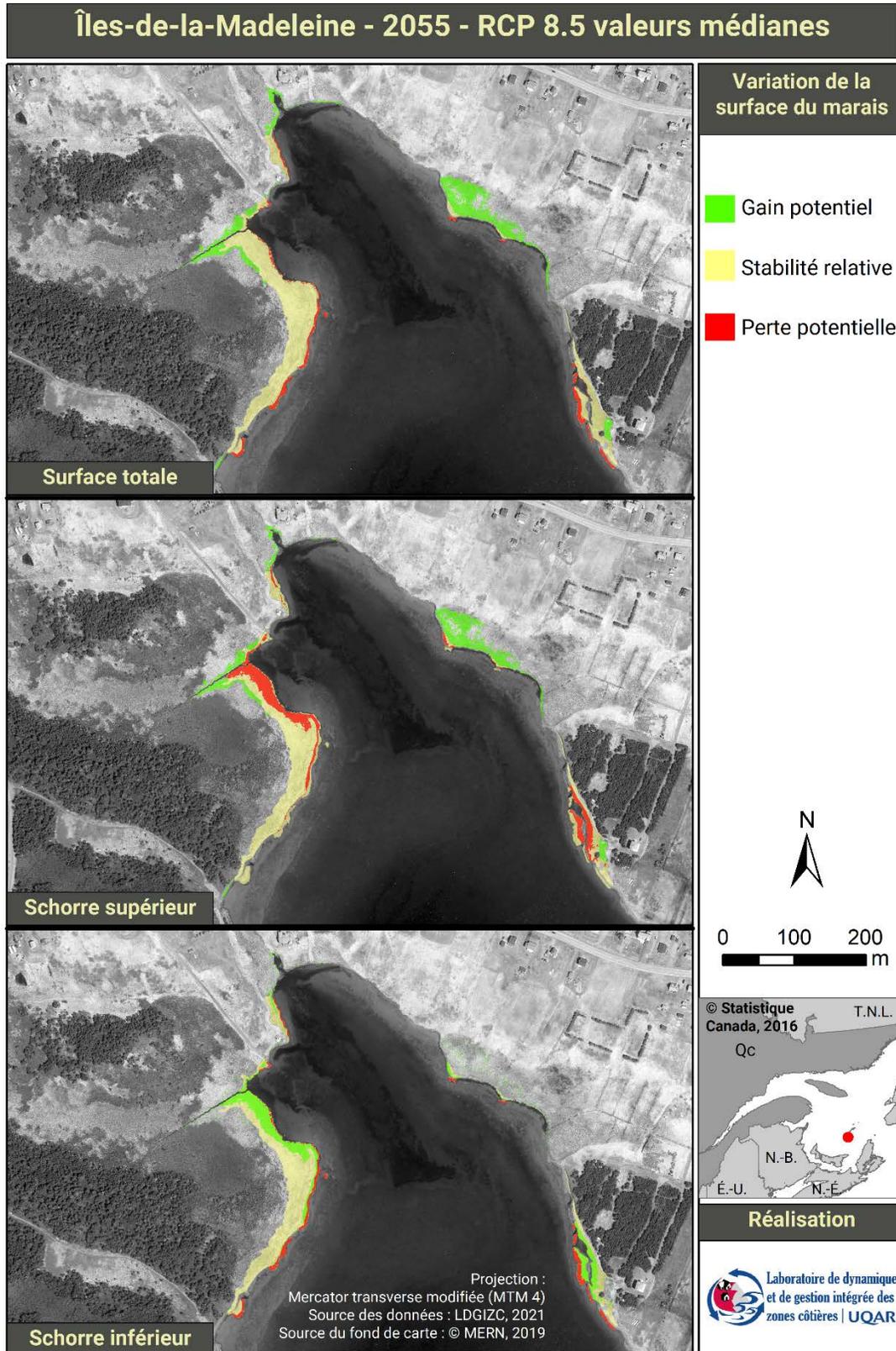


Figure 19 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais des îles-de-la-Madeleine en 2055 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

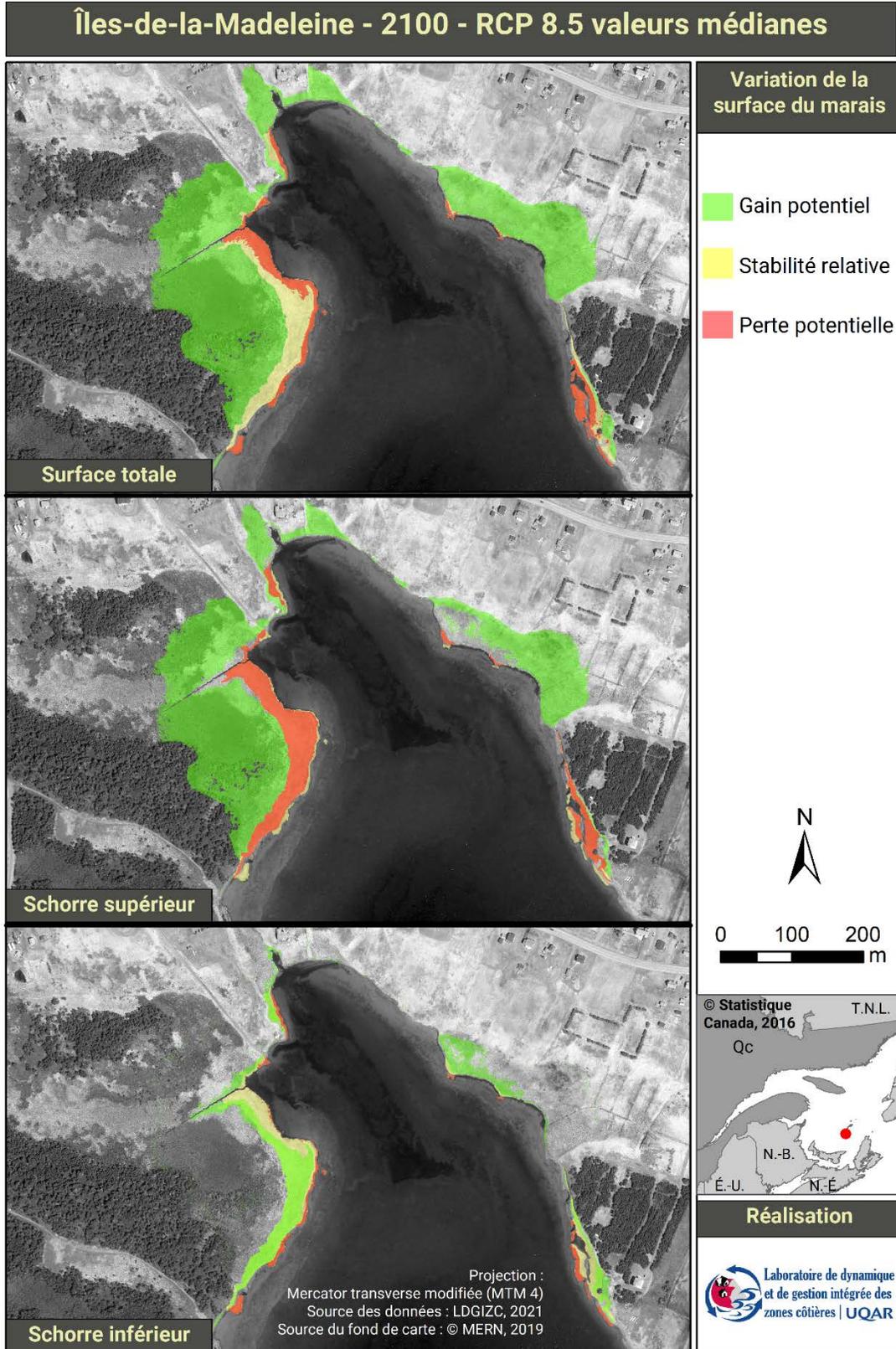


Figure 20 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais des Îles-de-la-Madeleine en 2100 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

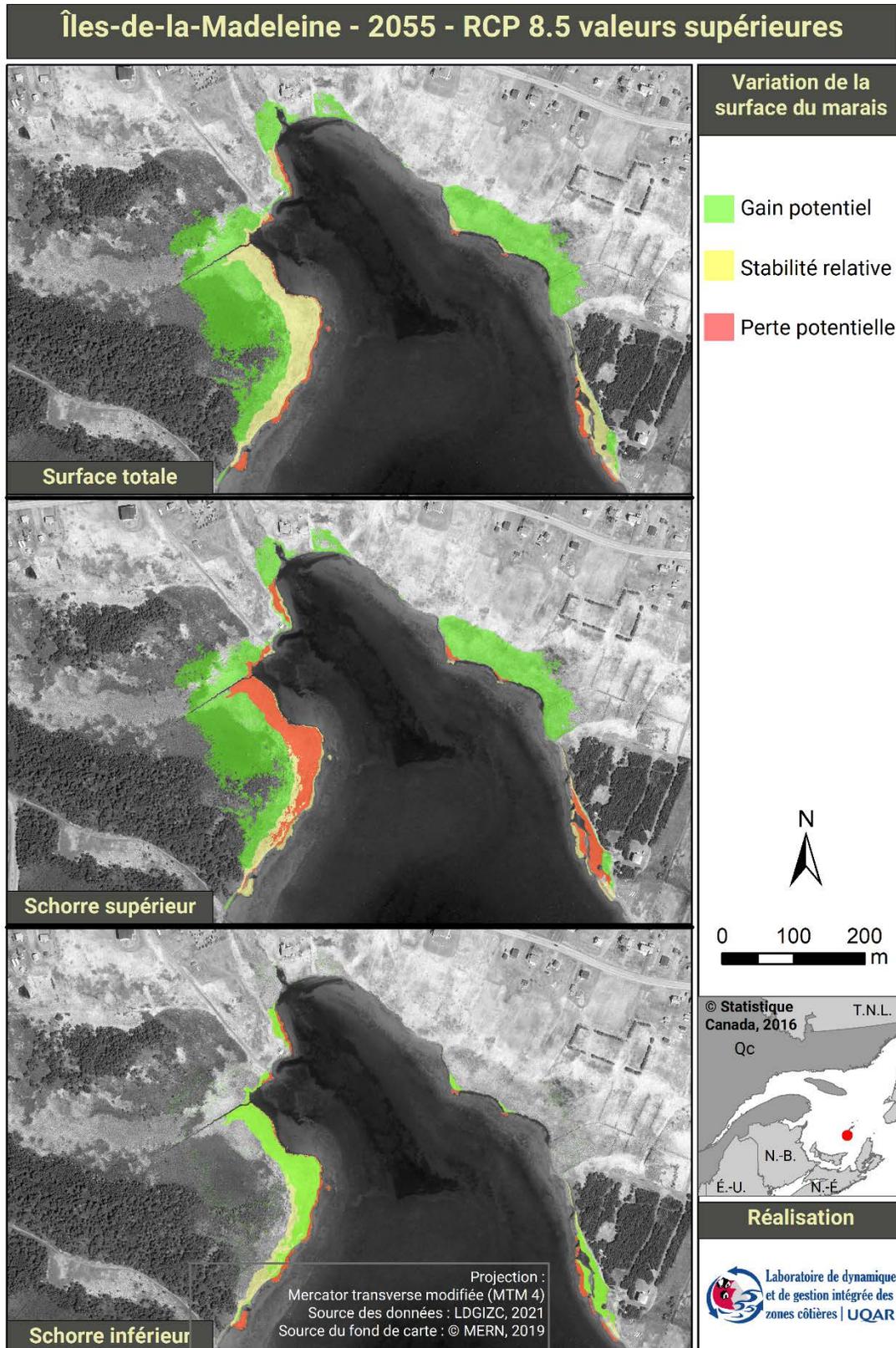


Figure 21 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais des Îles-de-la-Madeleine en 2055 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

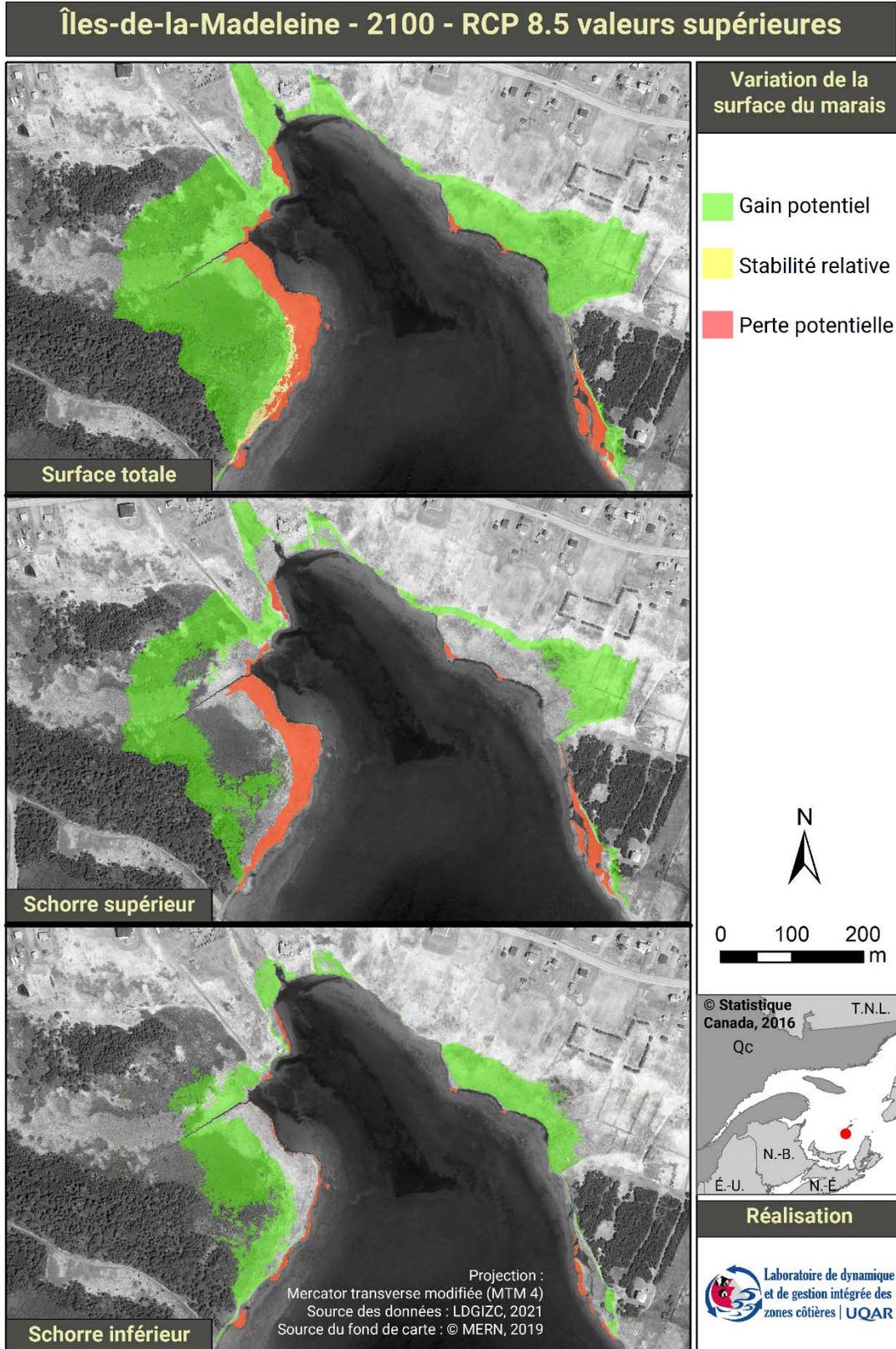


Figure 22 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais des Îles-de-la-Madeleine en 2100 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

3.2 Nouvelle

Les résultats de la modélisation des marais de l'estuaire de la rivière Nouvelle présentent une légère augmentation de la surface totale autant avec les hausses prédites par les valeurs médianes que supérieures du scénario RCP 8.5 (figure 23 et figure 24). Par contre, la hausse prédite en 2100 par les valeurs supérieures du scénario occasionne une grande diminution de la surface du schorre supérieur au profit du schorre inférieur (figure 24 et figure 28).

L'augmentation de la surface des marais de Nouvelle est principalement causée par la migration du marais de l'estuaire vers l'amont de la rivière (figure 25 à 28). Cette migration est possible en raison de fort taux d'accrétion du marais (7,02 mm/an) (tableau 4) ainsi qu'à une grande distance de migration potentielle causée par l'absence de contrainte comme des routes ou des falaises. Il est à noter que le modèle n'inclut pas les données de variations de la salinité causées par l'apport d'eau douce en amont du marais de l'estuaire. La non-intégration de ces données cause ainsi une plus grande incertitude concernant l'évolution du marais en amont de l'estuaire.

La réponse du marais de la flèche aux différentes hausses de la mer est illustrée dans les cartes de variation des surfaces de marais. Les résultats des modélisations indiquent que la majeure partie du schorre supérieur du marais situé derrière la flèche disparaît en 2055 selon les valeurs supérieures du RCP 8.5 (figure 27) et en 2100 selon les valeurs médianes du RCP 8.5 (figure 26). Par contre, la modélisation n'inclut pas l'érosion du marais par lobes de sédiments qui peuvent transgresser la flèche lors des événements de tempêtes. À cet endroit, Bernatchez et al. (2012) ont mesuré des taux de reculs entre 0,5 à 1,9 m/an entre 1934 et 2007. On peut donc s'attendre à la disparition complète du marais dans les prochaines décennies.

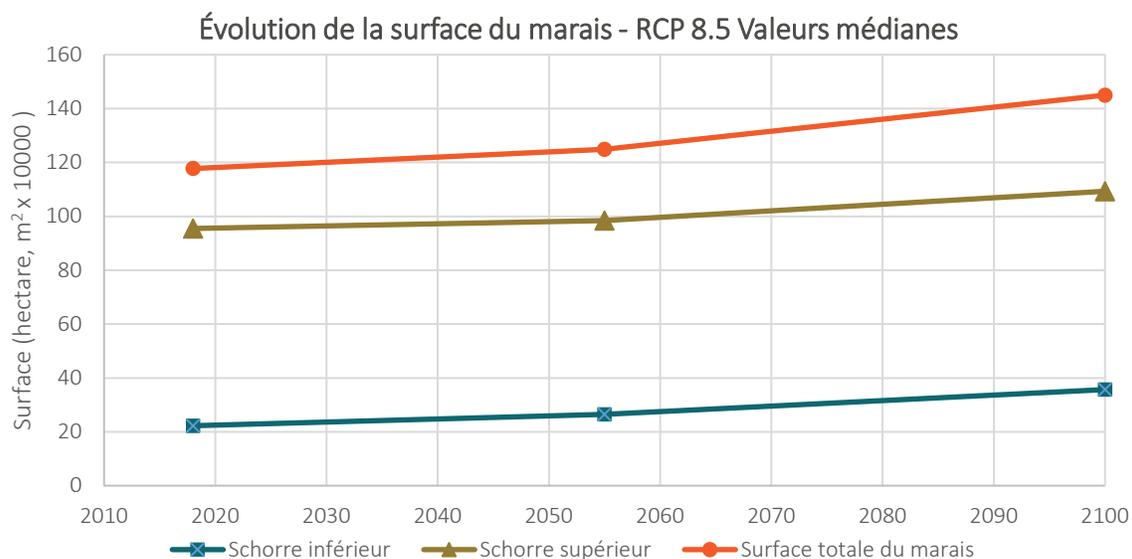


Figure 23 : Évolution de la surface des marais de Nouvelle selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

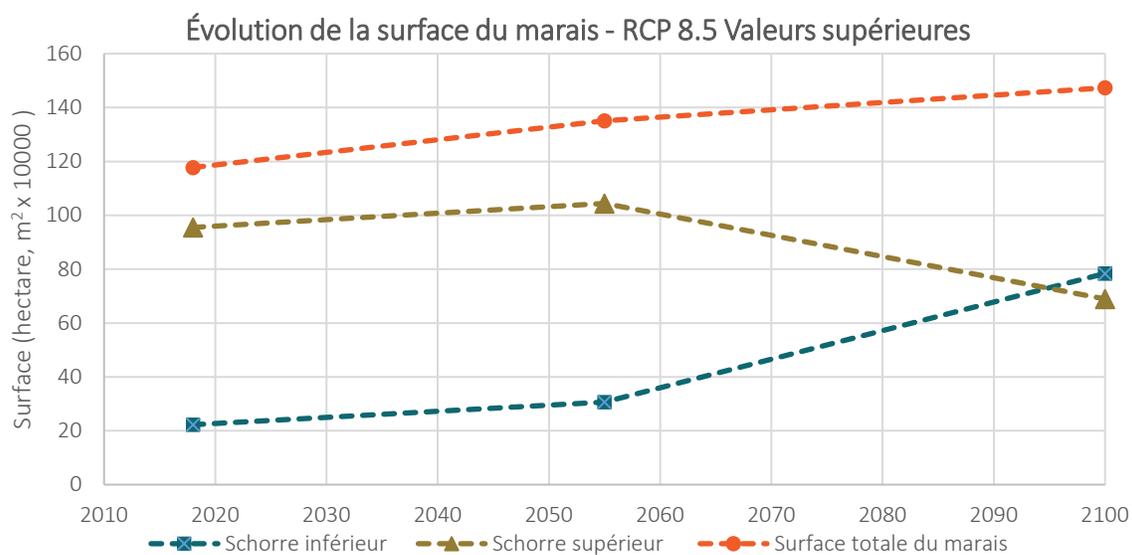


Figure 24 : Évolution de la surface des marais de Nouvelle selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

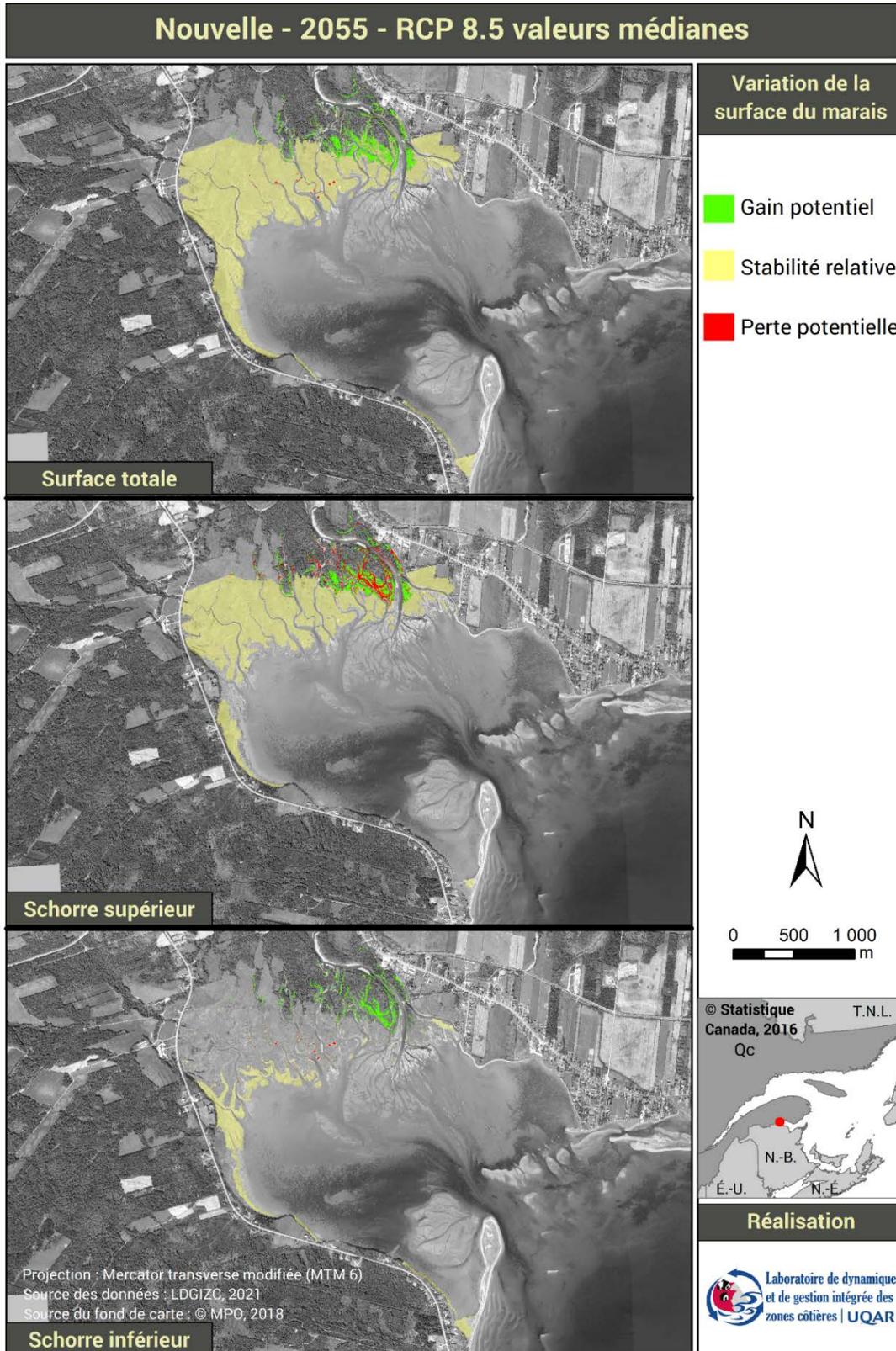


Figure 25 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface des marais de l'estuaire de la rivière Nouvelle en 2055 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

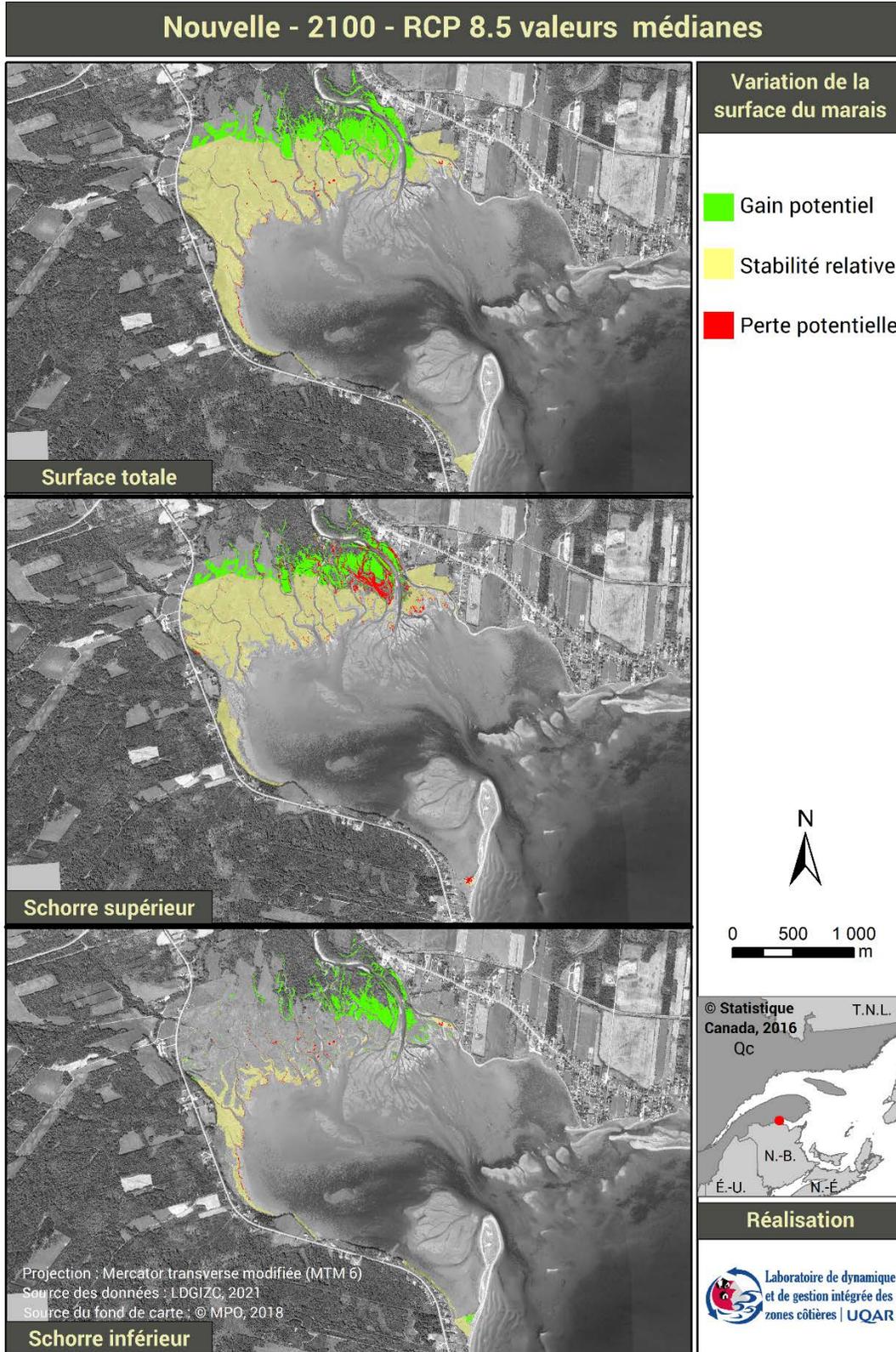


Figure 26 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface des marais de l'estuaire de la rivière Nouvelle en 2100 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

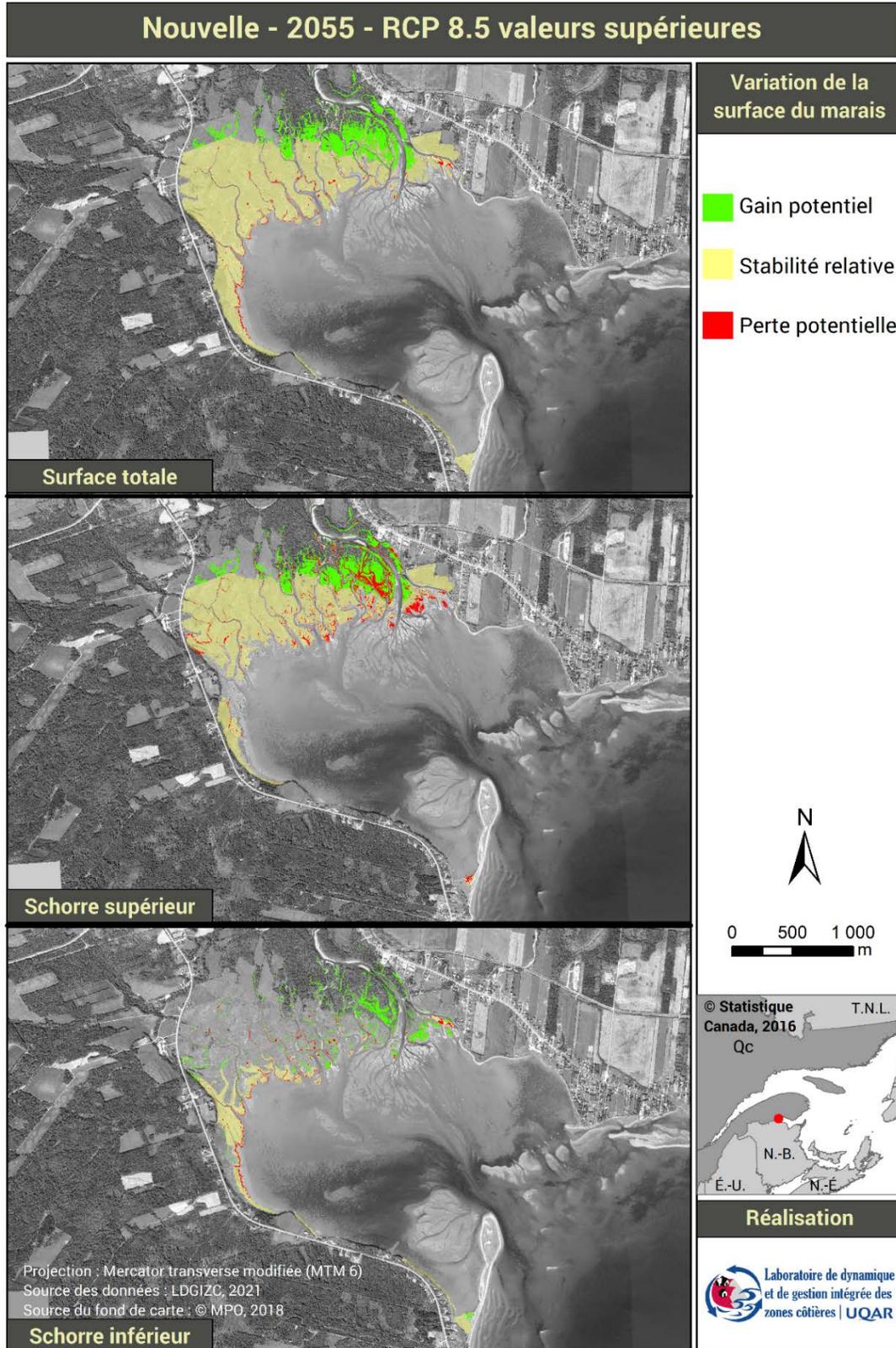


Figure 27 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface des marais de l'estuaire de la rivière Nouvelle en 2055 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

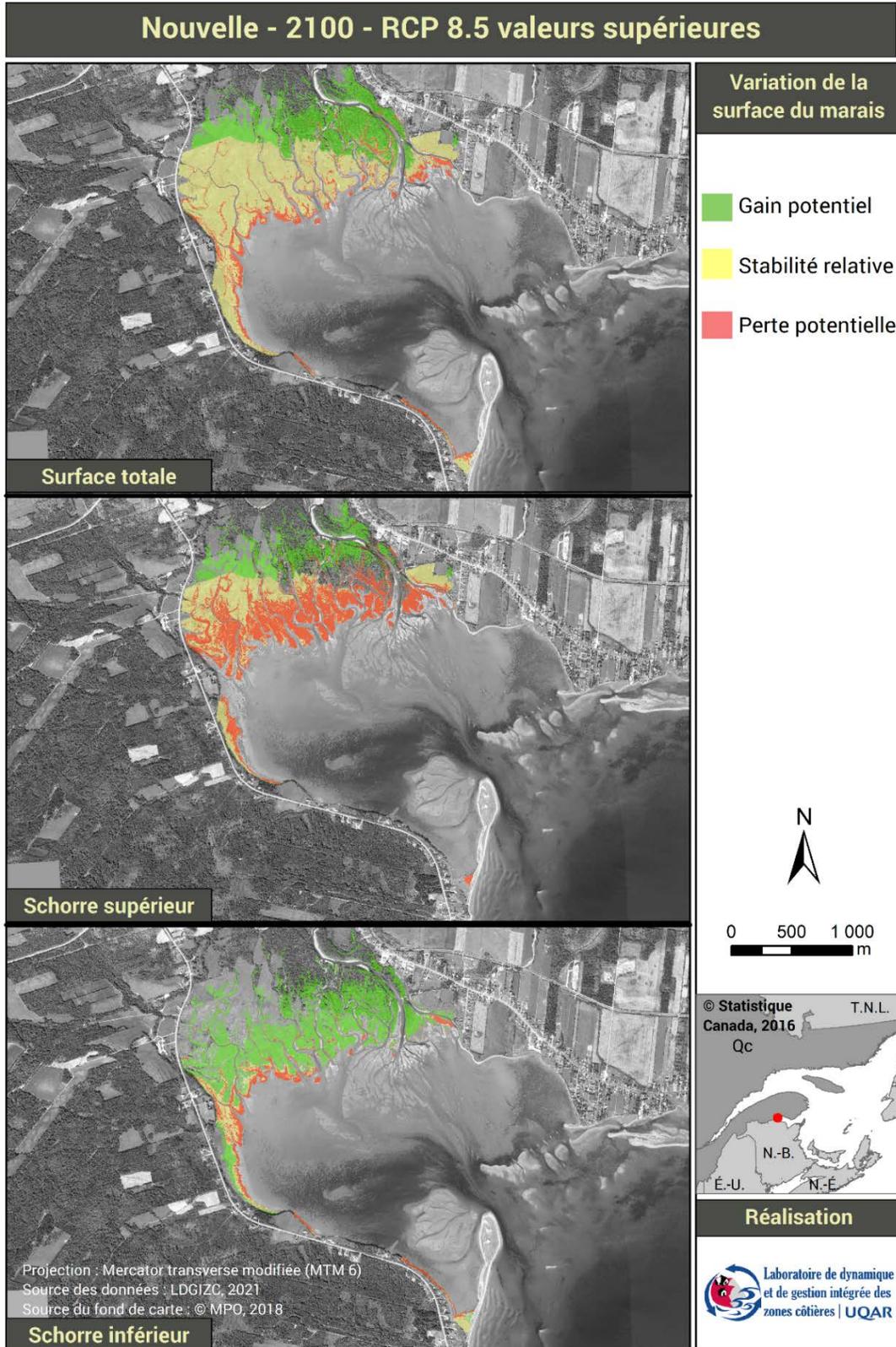


Figure 28 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface des marais de l'estuaire de la rivière Nouvelle en 2100 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

3.3 Saint-Siméon-de-Bonaventure (Saint-Siméon)

Les résultats de la modélisation du marais de St-Siméon indiquent une légère augmentation de sa surface totale en 2100. Soit un accroissement de 36 % pour les hausses prédites par les valeurs médianes (figure 29) et de 7 % pour les hausses prédites par les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 (figure 30). Par contre on remarque une forte diminution du schorre supérieur au profit du schorre inférieur pour tous les horizons de temps à l'exception du niveau prédit en 2055 par les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 (figure 30). La carte des valeurs supérieures en 2100 (figure 34) indique la perte de l'entièreté de la surface occupée par le schorre supérieur en 2018. De plus, bien que l'érosion n'ait pas été prise en compte pour cette étude, on peut s'attendre à une érosion du marais d'environ 40 cm/an à l'ouest (Réseau de suivi de l'érosion du LDGIZC, données internes) et un ensablement à l'ouest par les lobes de sédiments qui transgressent la flèche littorale. Il est à noter que la légère démarcation rectiligne orienté est-ouest au centre du marais (figure 33 et figure 34) est causée par un décalage d'élévation d'environ 15 cm dans le modèle d'élévation numérique utilisé.

Les résultats de la modélisation illustrent l'effet du coincement côtier sur le marais de Saint-Siméon. La route 132 et le cadre bâti au nord et le camping et la flèche littorale au sud limitent la distance de migration potentielle du marais. Ce phénomène est illustré par la stabilité relative du marais en 2055 (figure 29) qui n'atteint pas encore les différentes contraintes physiques (figure 31). Une fois les contraintes atteintes, l'état du marais se détériore se traduisant par la diminution de sa surface totale ainsi qu'une diminution du schorre supérieur (figure 31 à 34).

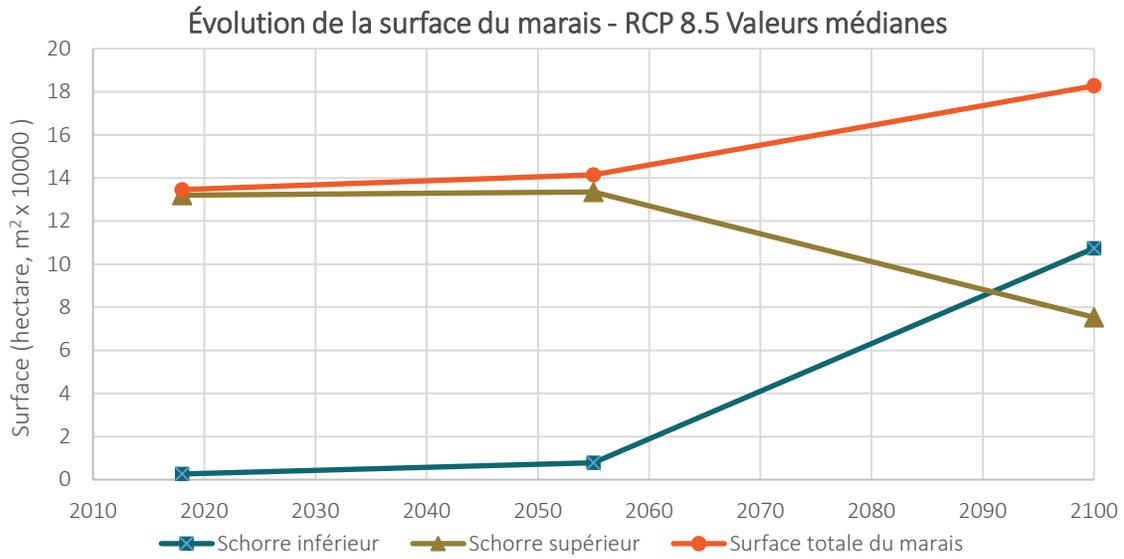


Figure 29 : Évolution de la surface du marais de St-Siméon selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

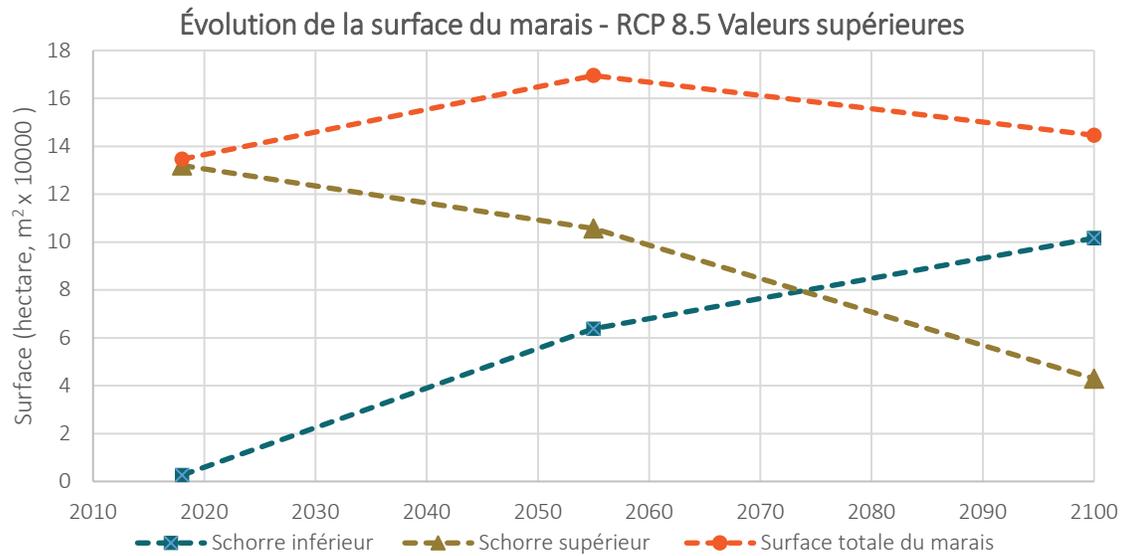


Figure 30 : Évolution de la surface du marais de St-Siméon selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

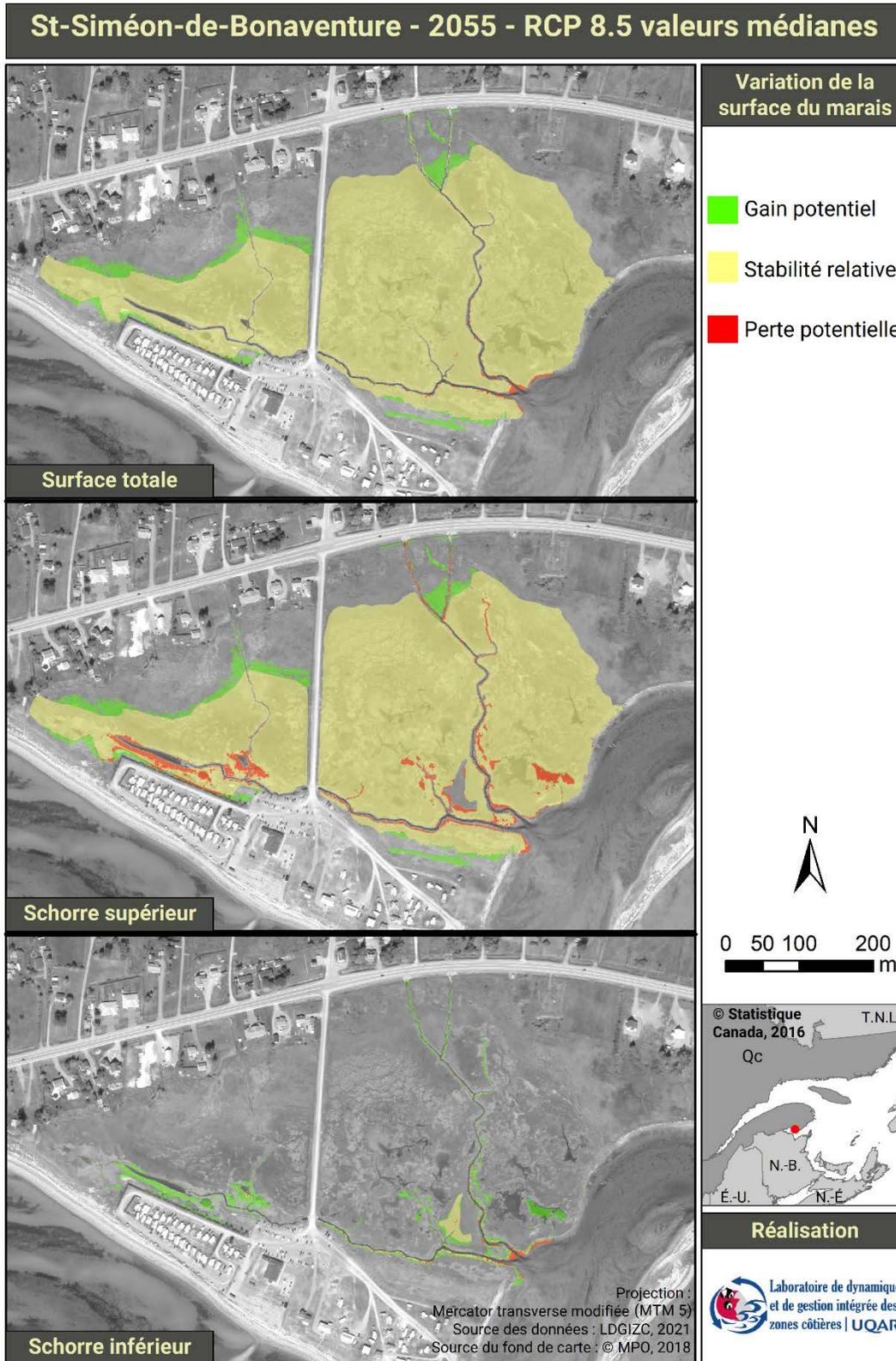


Figure 31 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de St-Siméon en 2055 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

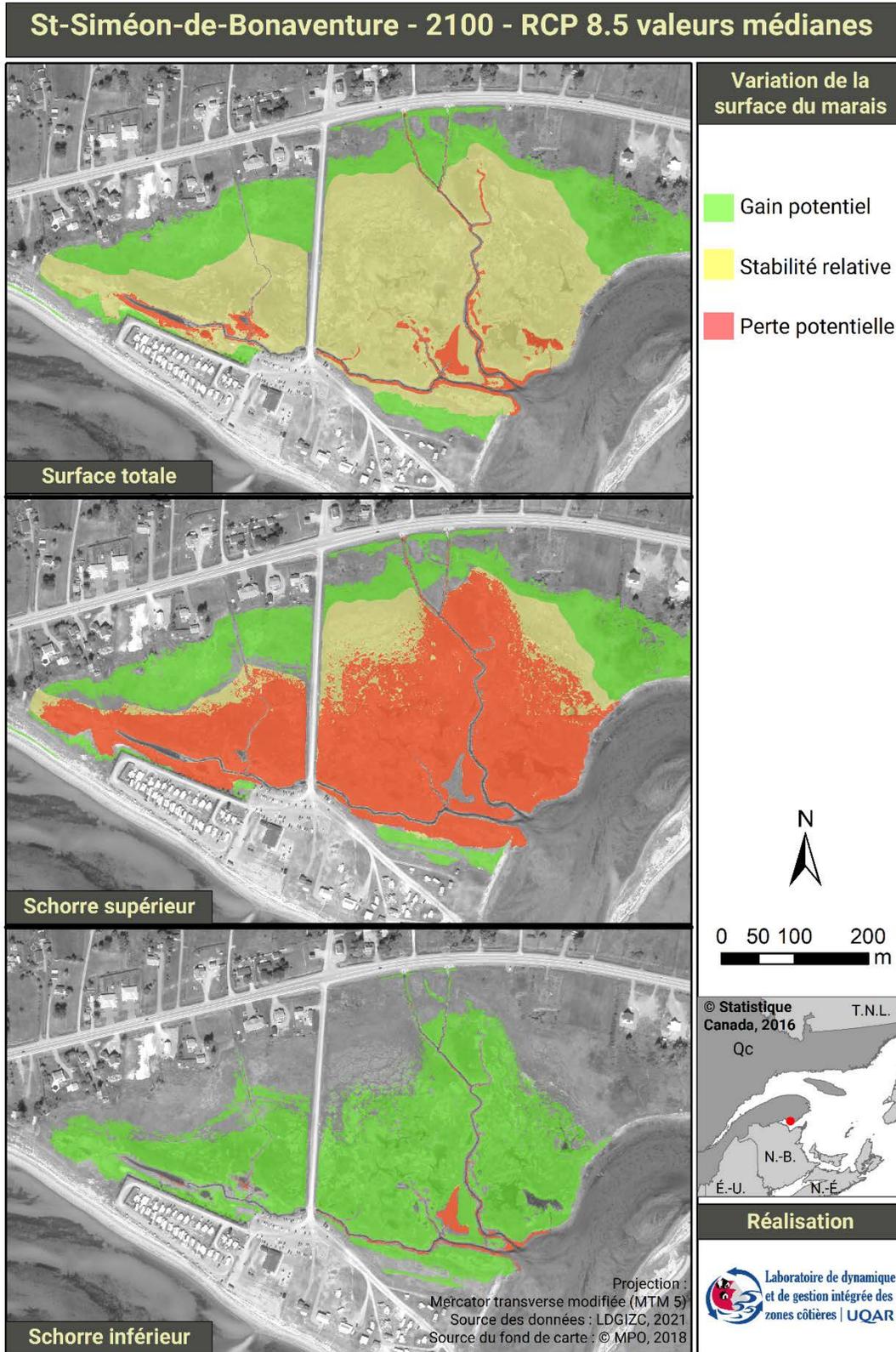


Figure 32 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de St-Siméon en 2100 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

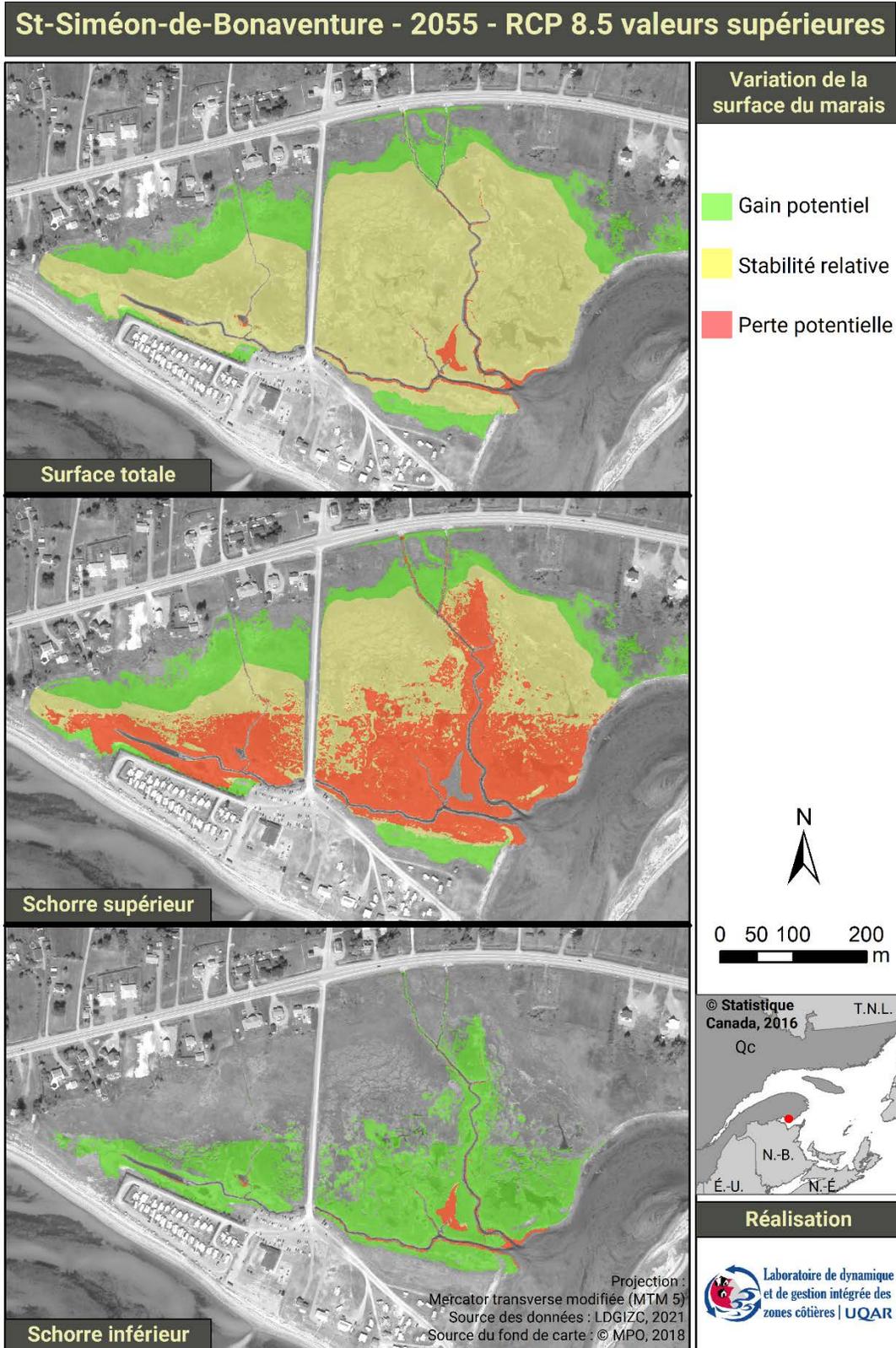


Figure 33 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de St-Siméon en 2055 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC.

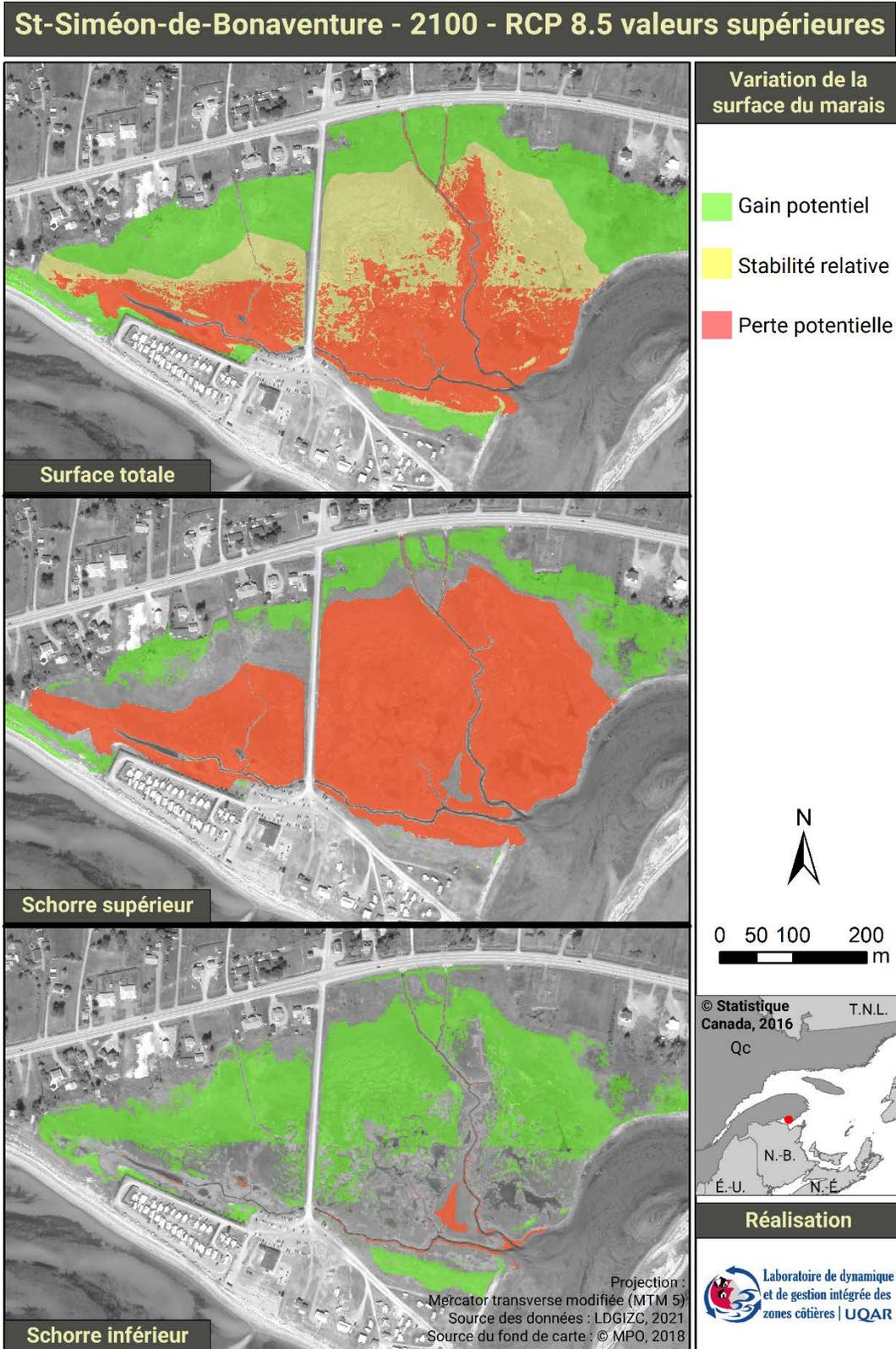


Figure 34 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de St-Siméon en 2100 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

3.3.1 Modélisation du marais de St-Siméon avec le modèle isostatique NAD83v70VG

La réponse des marais du Québec maritime à la hausse du niveau marin est fortement influencée par les variations isostatiques. À St-Siméon, le modèle isostatique NAD83v70VG développé par Ressources naturelles Canada (Robin et al., 2020) suggère un enfoncement de la croûte terrestre à un taux de 0,39 mm/an en comparaison à un taux de 2,7 mm/an suggéré par le modèle ICE-6G (VM5a) de Peltier et al. (2015). En appliquant ces taux à un même scénario de hausse du niveau marin, cette divergence entraîne une différence de 1,4 cm pour l'horizon 2055 et de 22,1 cm pour l'horizon 2100.

Dans le cas du marais de St-Siméon, le taux plus faible suggéré par le modèle NAD83v70VG permet au marais d'augmenter sa superficie continuellement jusqu'en 2100 (figure 35 et figure 36) entre autres en raison d'une plus grande surface occupée par le schorre inférieur. En 2100, le modèle ICE-6G indique une augmentation de la surface du marais de 7 % en comparaison au modèle NAD83v70VG qui indique une augmentation de 32 % (figure 35). L'ensemble des cartes d'évolution de la surface du marais de St-Siméon modélisé à l'aide du modèle NAD83v70VG sont disponibles à l'annexe 2.

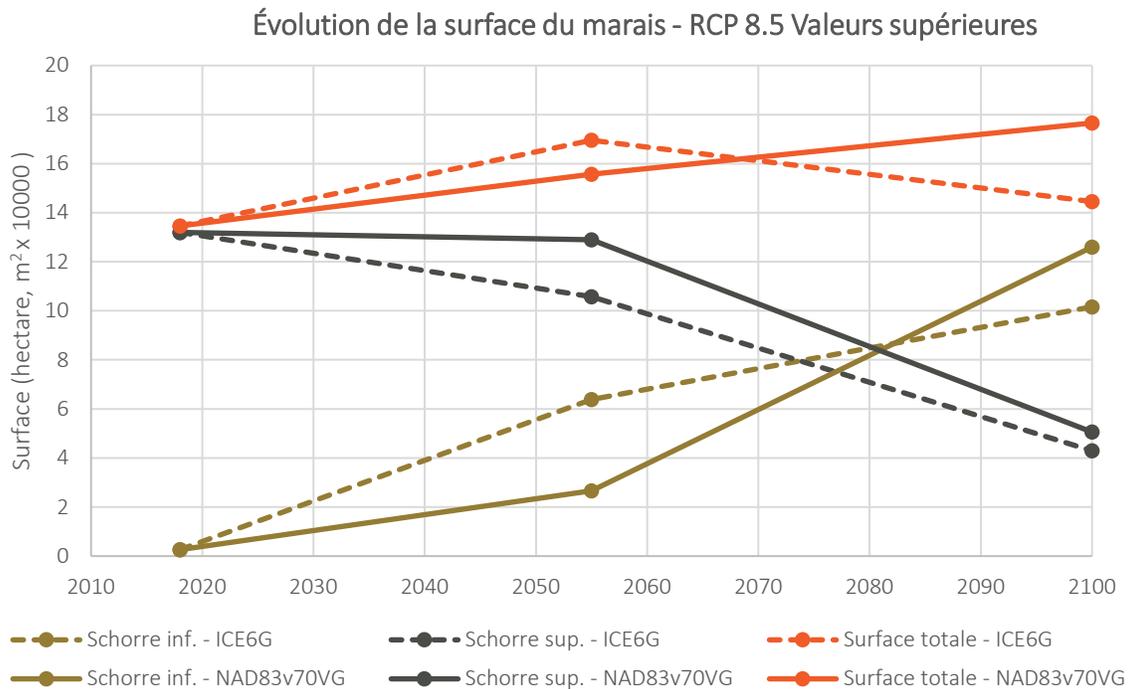


Figure 35 : Comparaison de l'évolution de la surface du marais de St-Siméon selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC en fonction des modèles isostatiques ICE-6G (VM5a) et NAD83v70VG.

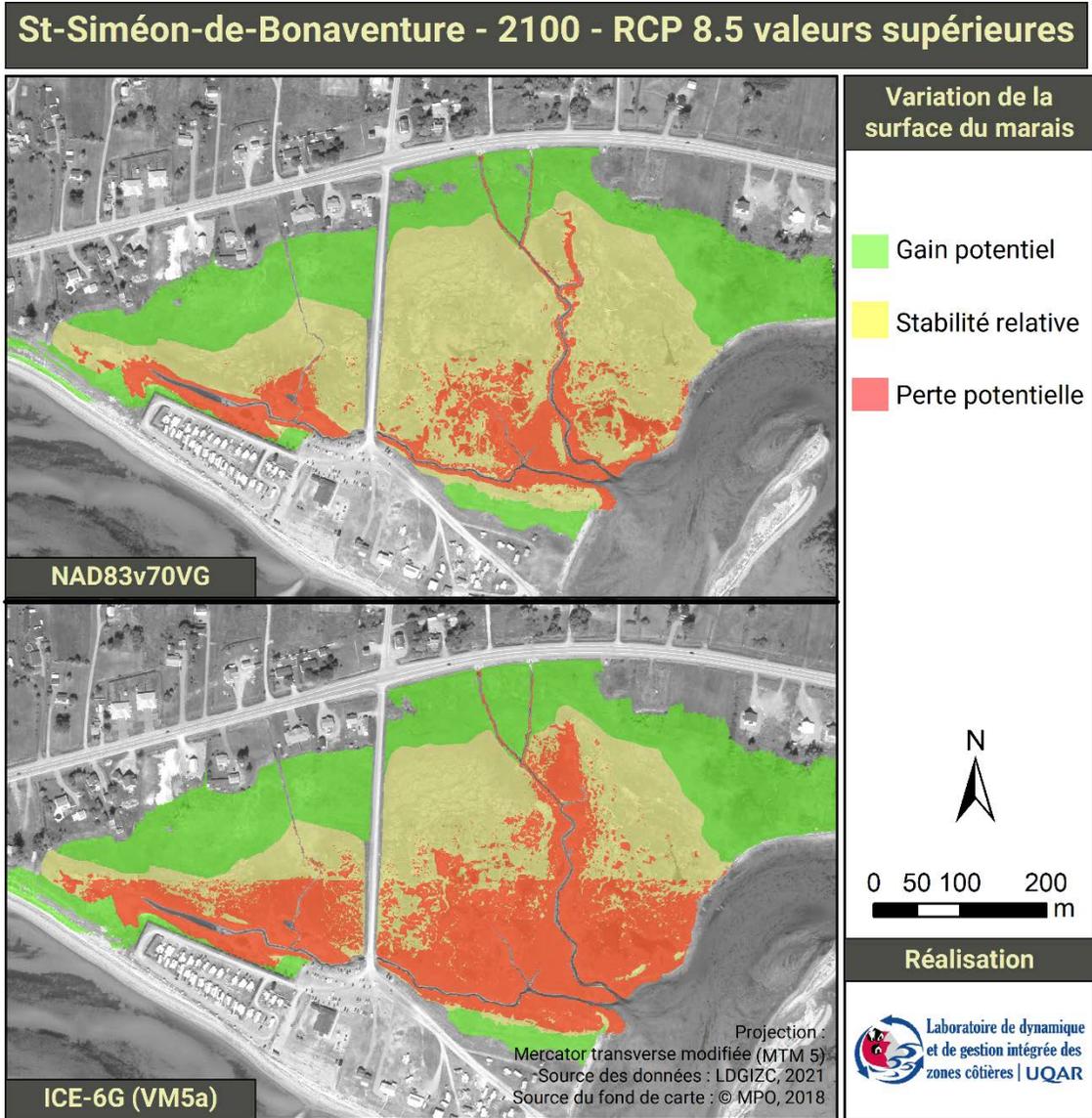


Figure 36 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de St-Siméon en 2100 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC en fonction modèle isostatique ICE-6G (VM5a) et NAD83v70VG.

3.4 Penouille

Les résultats de la modélisation du marais de Penouille à une hausse prédite par les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 indiquent une diminution de 23 % de sa surface totale en 2055 suivis d'une stabilisation en 2100 (figure 37). On remarque par contre une constante diminution du schorre inférieur sur l'ensemble du marais (figure 39).

Les résultats des valeurs supérieures du scénario présentent une forte diminution de 37 % de la surface totale du marais en 2055 correspondant à une perte moyenne de 0,21 hectare par année (figure 38). Cette diminution de la surface totale est associée à une diminution de schorre inférieur sur l'ensemble du site (figure 41). La perte de surface de 2055 est suivie par une forte

augmentation en 2100 venant atteindre des valeurs légèrement inférieures aux valeurs initiales de 2018. Cette augmentation de la surface est liée à un accroissement de la surface du schorre supérieur.

La réponse de marais de Penouille à la hausse du niveau marin est relativement homogène, peu importe les valeurs du scénario RCP 8.5 utilisées. Les niveaux d'eau atteints en 2055 entraînent la perte de schorre inférieur au nord du site d'étude (figure 39 et figure 41). Cette perte est accentuée par la présence d'une falaise au nord du marais limitant ainsi sa capacité à migrer dans les terres. Les niveaux d'eau plus élevés de l'horizon 2100 permettent au marais de migrer vers l'intérieur de la flèche littorale comme présenté dans les cartes des figure 40 et figure 42.

Il est à noter que les résultats de la modélisation de 2100 des valeurs supérieures du scénario RCP possèdent une plus grande incertitude en raison de la délimitation manuelle de l'influence des vagues sur le marais. Bien que la délimitation tracée en utilisant les données d'élévations, elle demeure arbitraire. Cette délimitation peut être observée par la limite rectiligne du gain de schorre supérieur apparent au centre et à l'extrémité nord-ouest de la flèche dans la figure 42. Il est à noter que la limite rectiligne au centre a été tracée sur le bourrelet de l'ancienne piste d'atterrissage dont le sommet culmine à un peu plus de 3 m (Bernatchez et *al.*, 2013).

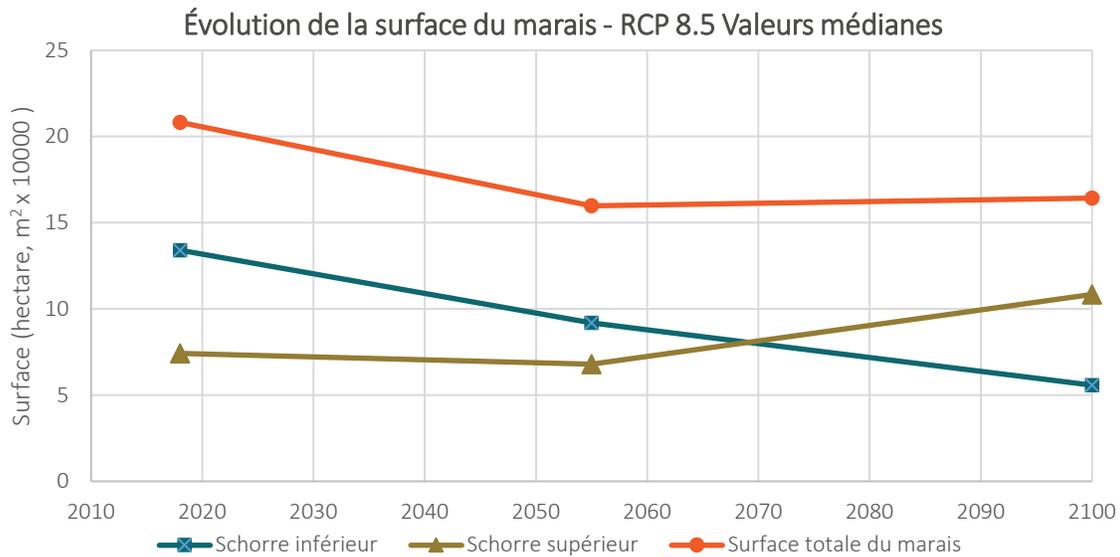


Figure 37 : Évolution de la surface du marais de Penouille selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

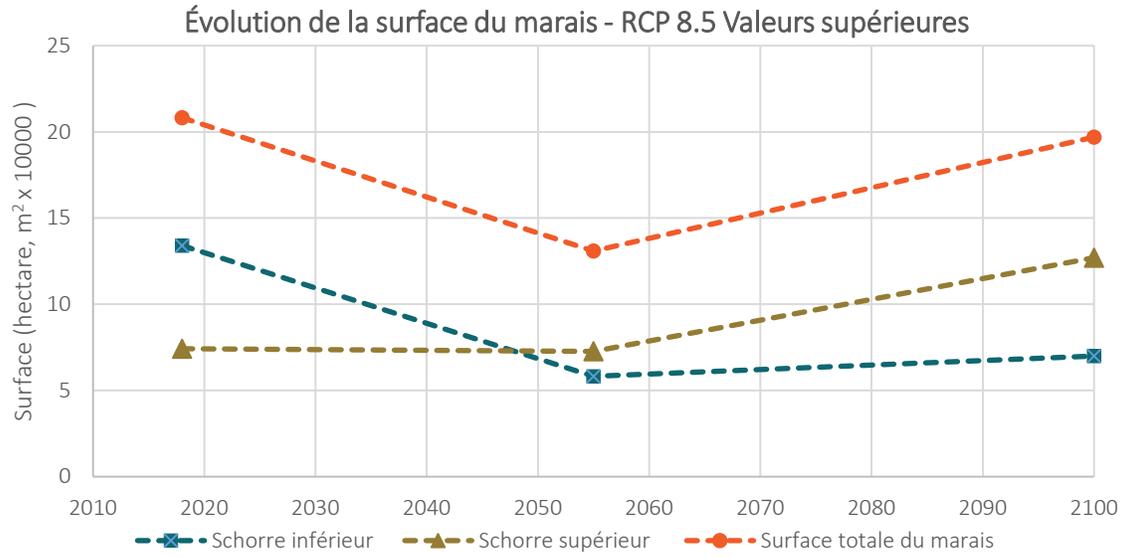


Figure 38 : Évolution de la surface du marais de Penouille selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

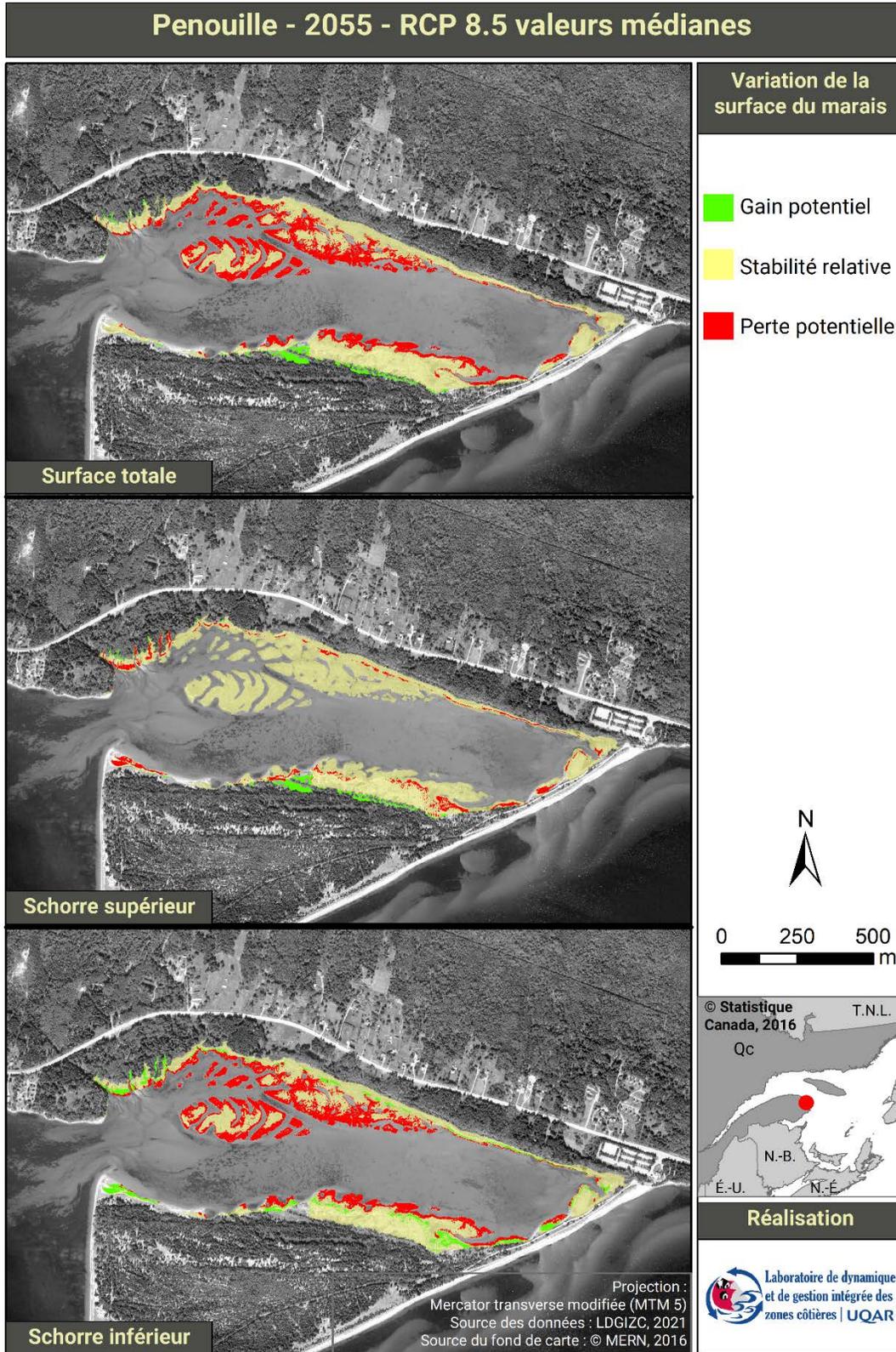


Figure 39 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Penouille en 2055 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

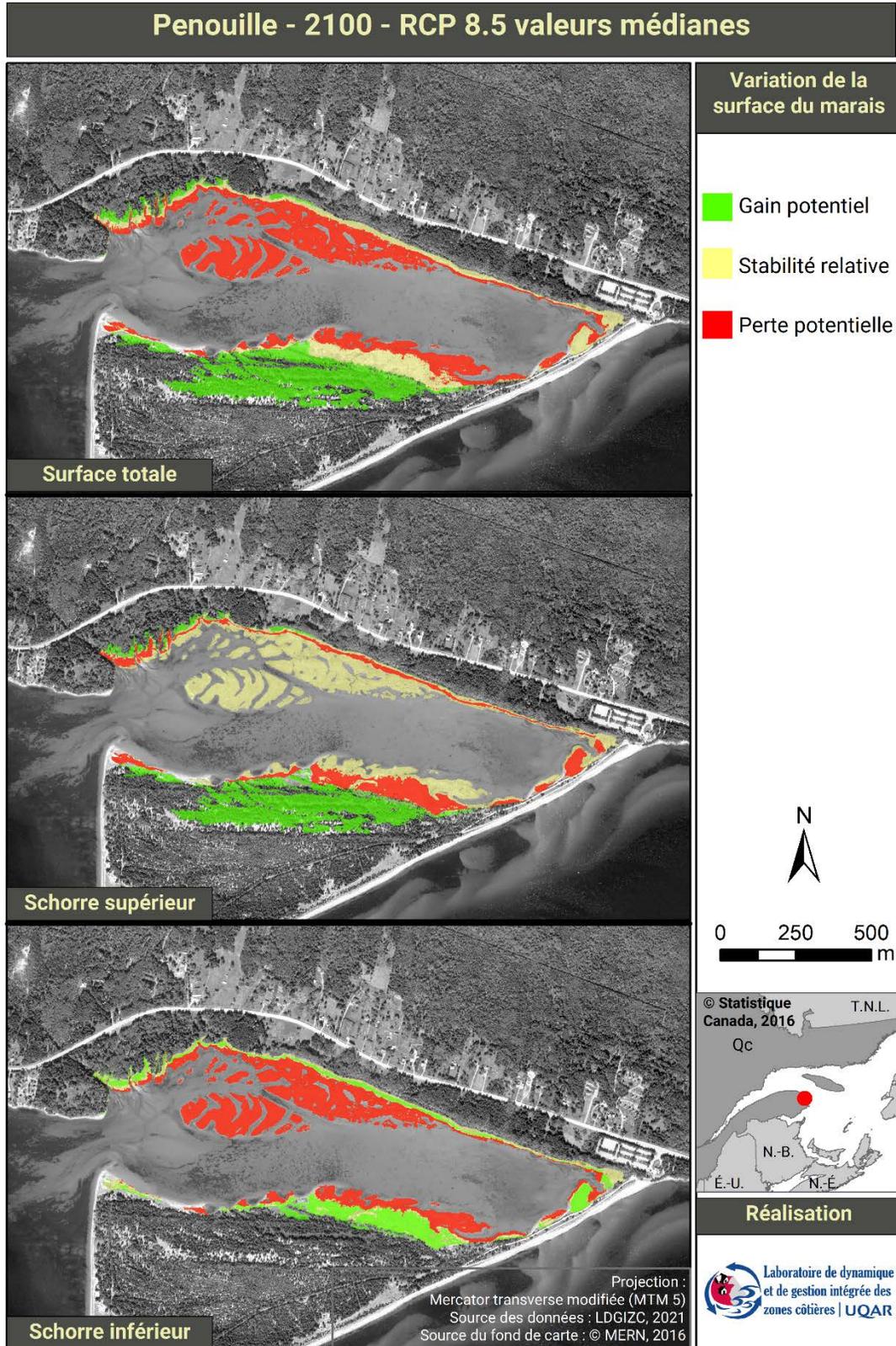


Figure 40 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Penouille en 2100 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

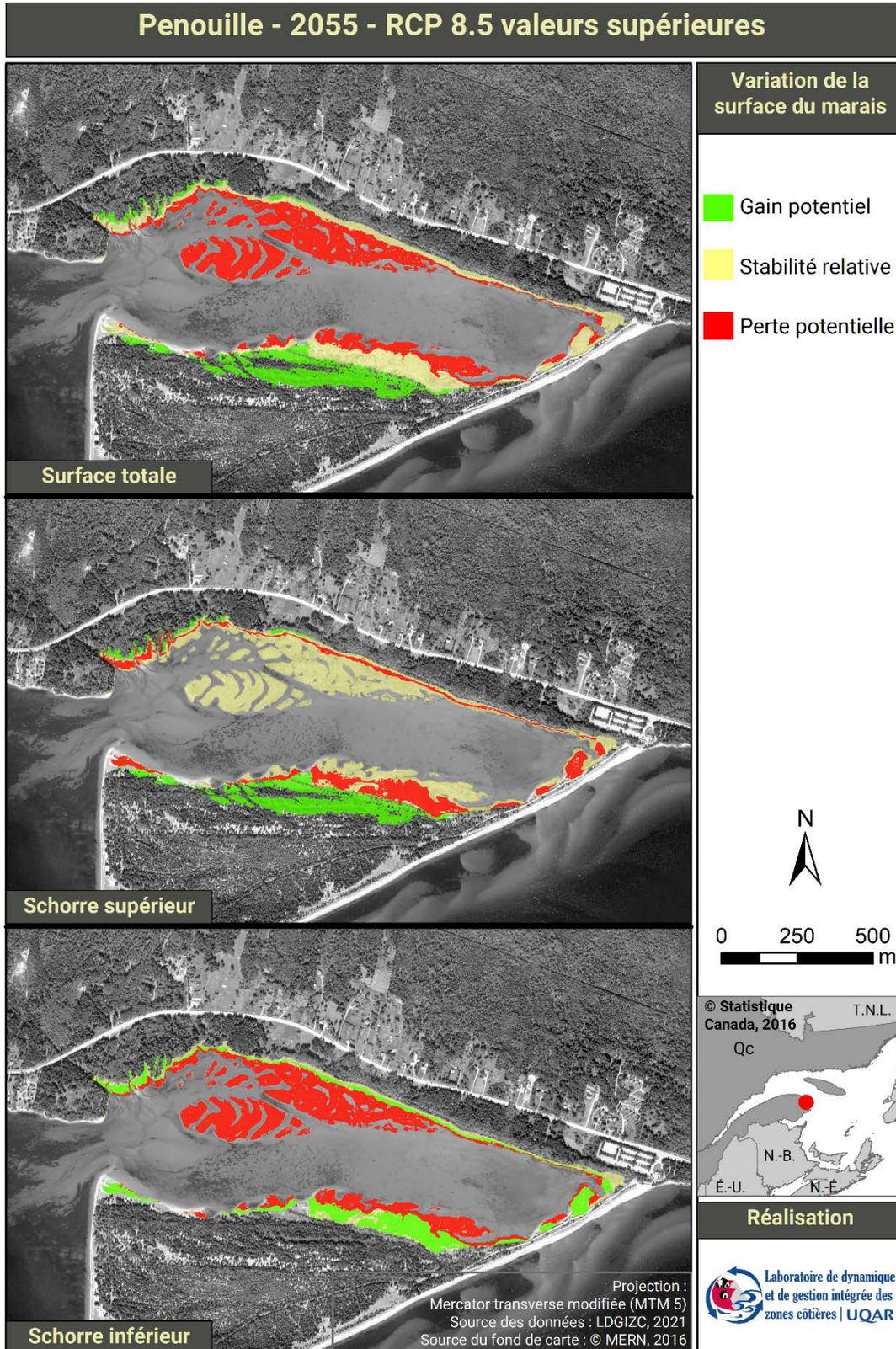


Figure 41 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Penouille en 2055 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

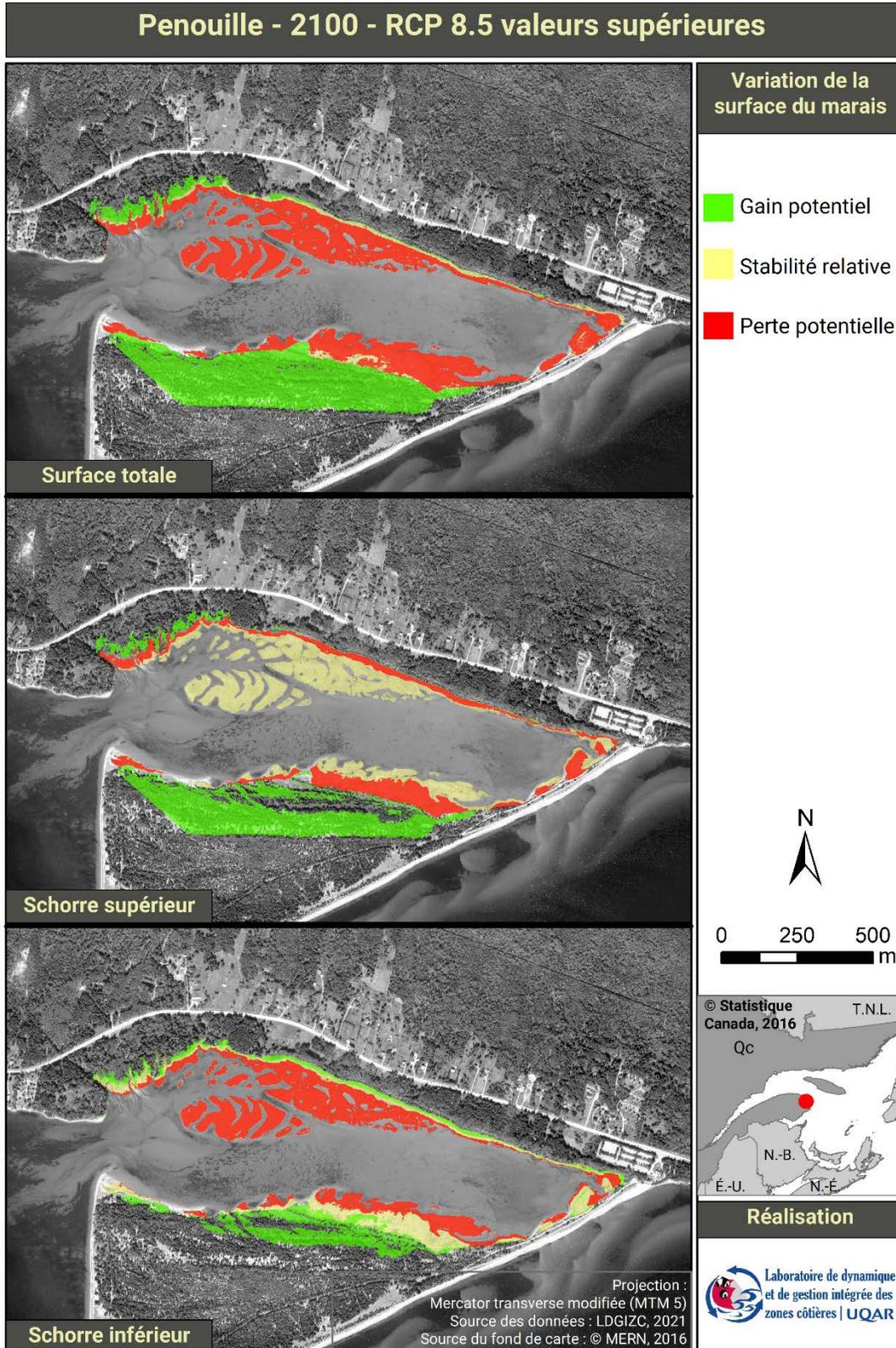


Figure 42 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Penouille en 2100 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

3.5 Rimouski

Les simulations en valeurs médianes et supérieures effectuées pour le marais à Rimouski démontrent une perte potentielle de marais en 2055 et en 2100. Les conséquences de la hausse de niveau marin sur le marais sont moindres en 2055 pour les valeurs médianes, où seul le schorre inférieur subit une perte d'environ 17 % (figure 43 et figure 46). À Rimouski, dans tous les scénarios, la perte de marais est davantage la conséquence d'une perte de schorre inférieur (figure 43 et figure 44). Bien que la perte potentielle de marais soit marquée en 2100 pour les valeurs supérieures, on observe en plus une perte de schorre supérieur au profit du schorre inférieur. Une portion de marais reste cependant stable au cours des ans. On note également un gain de marais sur le littoral dans 3 scénarios sur 4 ; seul le scénario 2055 en valeurs médianes n'indique aucun gain (figure 45). Ces gains se produisent en arrière du marais, dans une zone naturelle aménagée de sentiers sur pilotis ou en gravier qui ne sont pas une contrainte à sa migration.

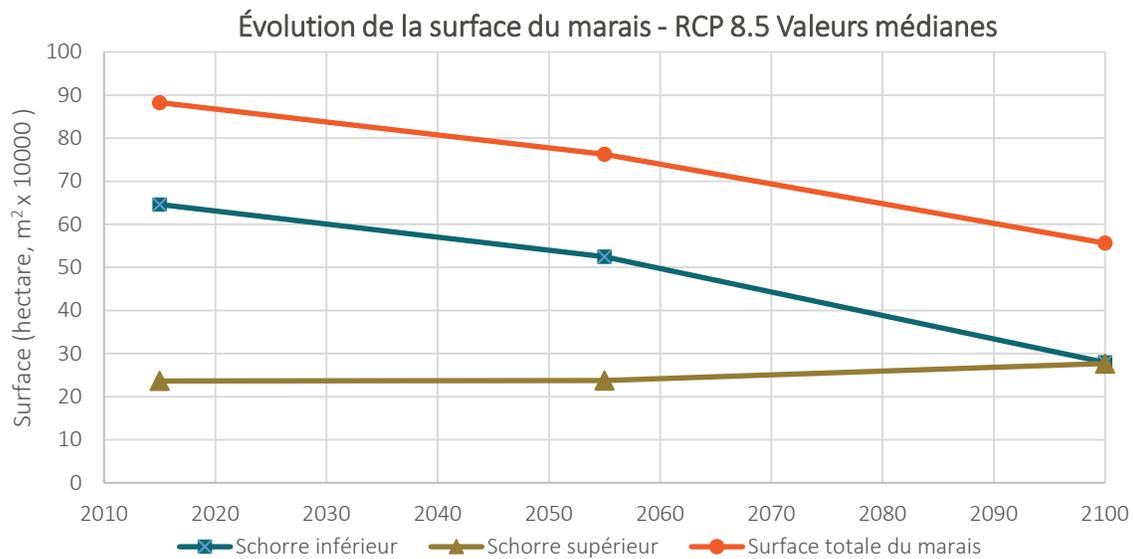


Figure 43 : Évolution de la surface du marais de Rimouski selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

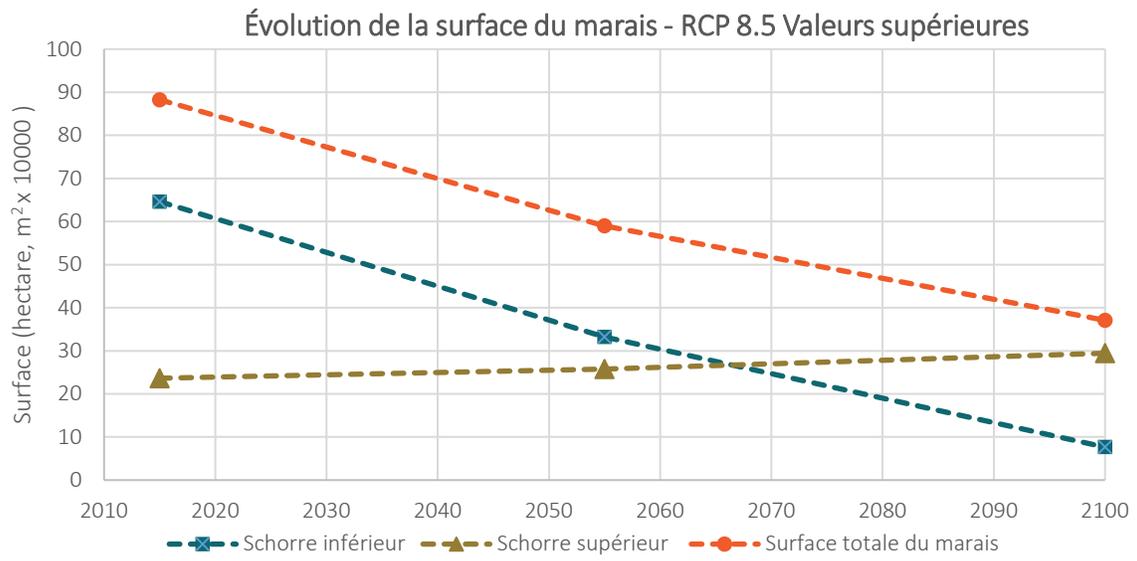


Figure 44 : Évolution de la surface du marais de Rimouski selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

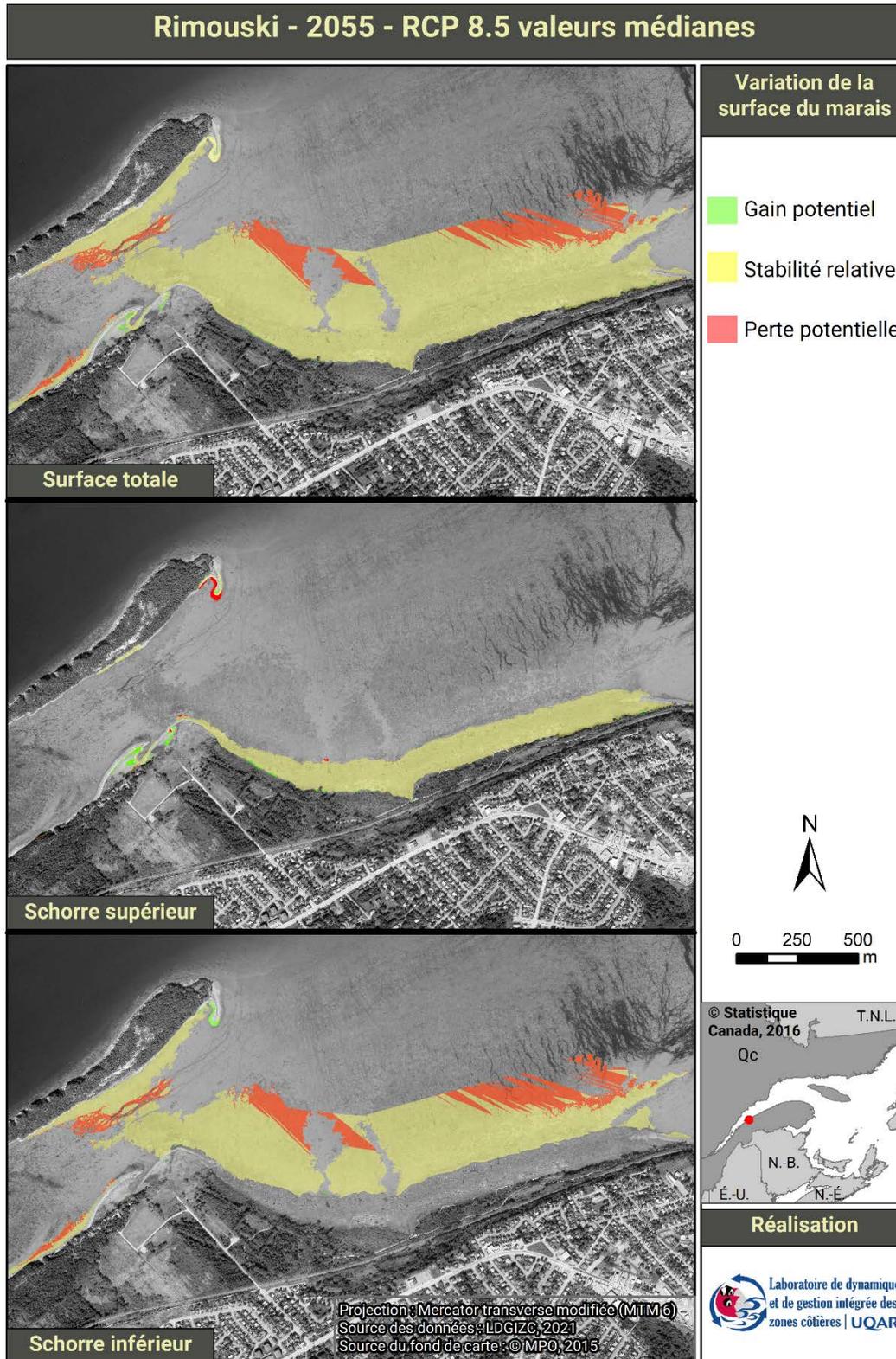


Figure 45 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Rimouski en 2055 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

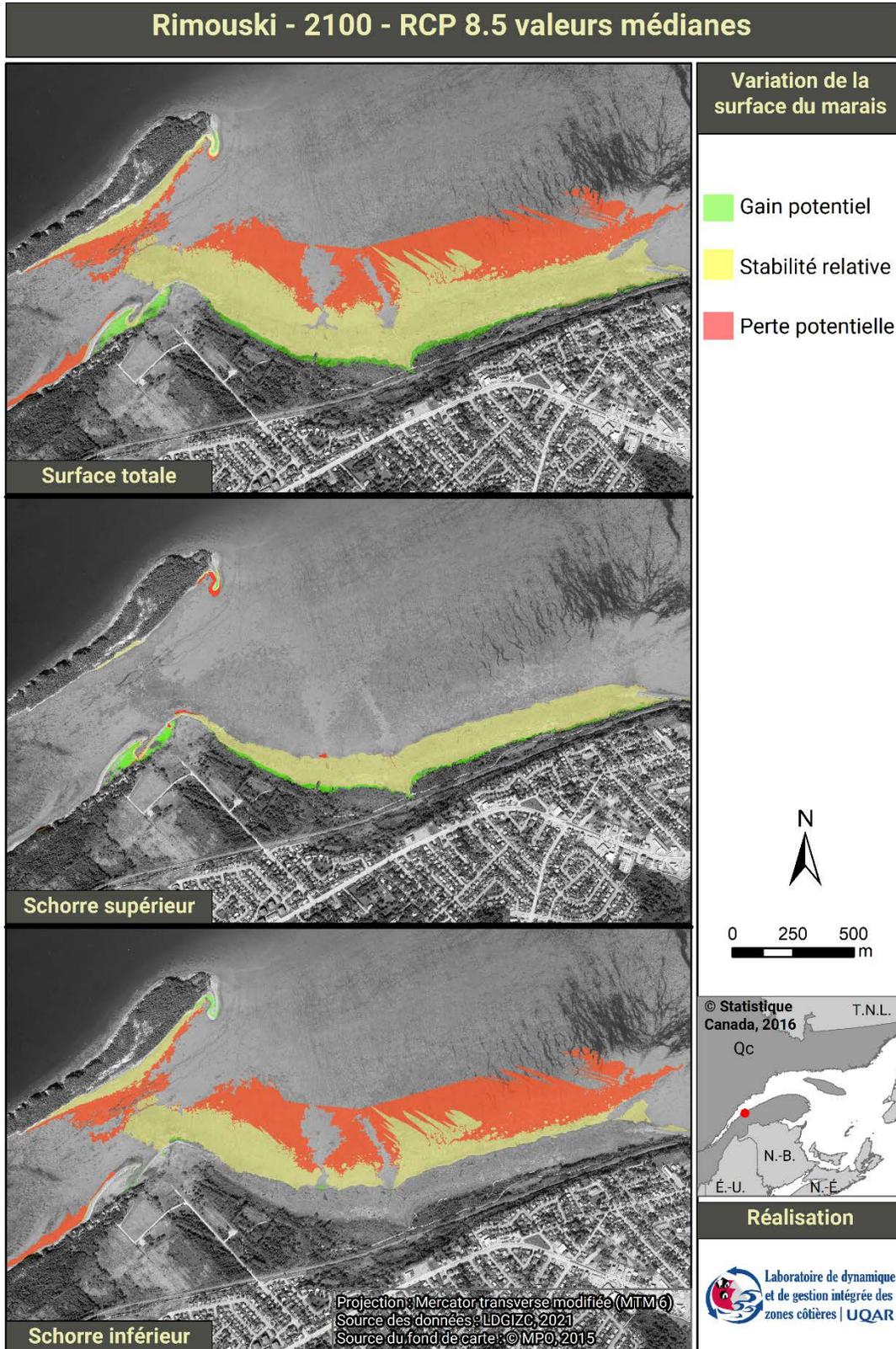


Figure 46 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Rimouski en 2100 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

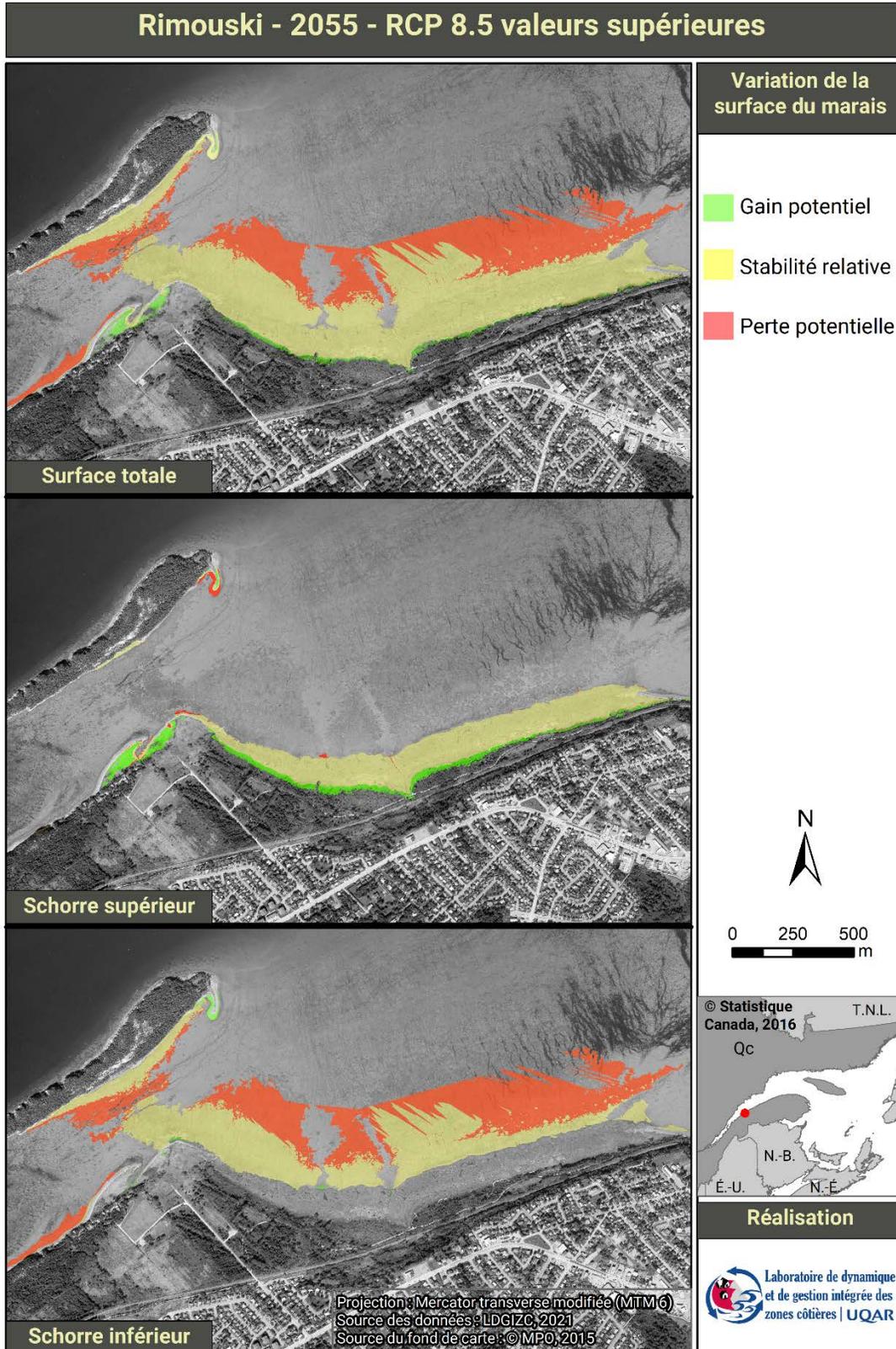


Figure 47 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Rimouski en 2055 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

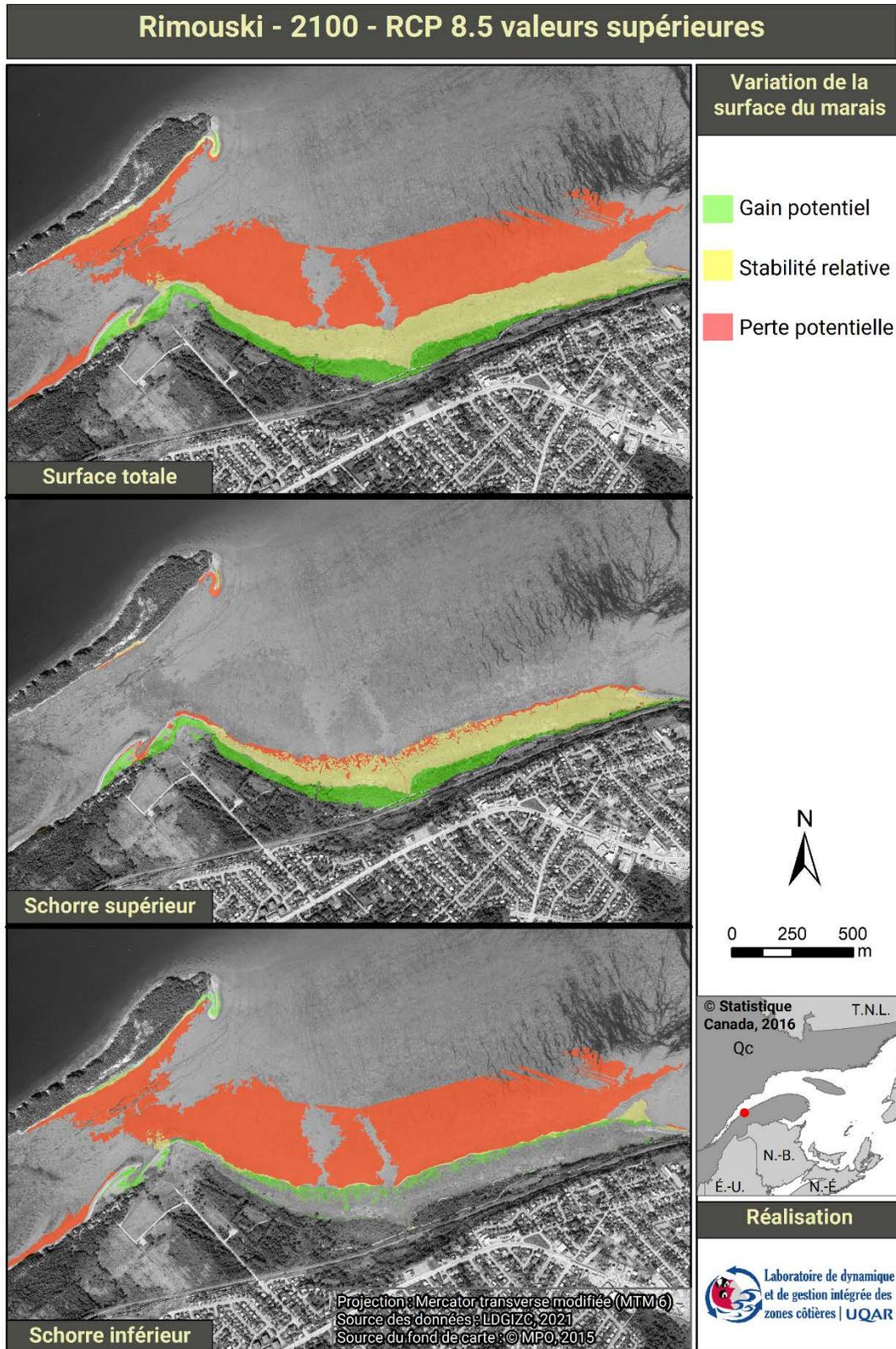


Figure 48 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Rimouski en 2100 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

3.6 Kamouraska

Les résultats de la modélisation du marais de Kamouraska indiquent une diminution généralisée de ses différentes surfaces. Seul le schorre inférieur du scénario élevé connaît une augmentation de sa surface entre 2055 et 2100 (figure 50). Cette augmentation est expliquée par le remplacement du schorre supérieur par le schorre inférieur à l'est du secteur. On remarque également une plus grande stabilité du marais à l'ouest du secteur où le marais est sensiblement plus élevé et plus large (figure 51 à 54.).

Les résultats de la modélisation illustrent l'effet du coincement côtier sur le marais de Kamouraska. L'aboteau implanté en 1937 et reconstruit en 1980 (Joubert et Bachand, 2012) limite la distance de migration potentielle du marais qui est actuellement adossé à l'aboteau comme représenté dans les cartes des figure 51 à 54. Ce phénomène entraîne ainsi une constante diminution de la surface du marais en réponse à une hausse du niveau marin, et ce, même si le taux d'accrétion de 2,3 mm/an du marais est relativement élevé (tableau 4) et que la hausse du niveau marin est faible (tableau 3) à l'échelle du Québec maritime.

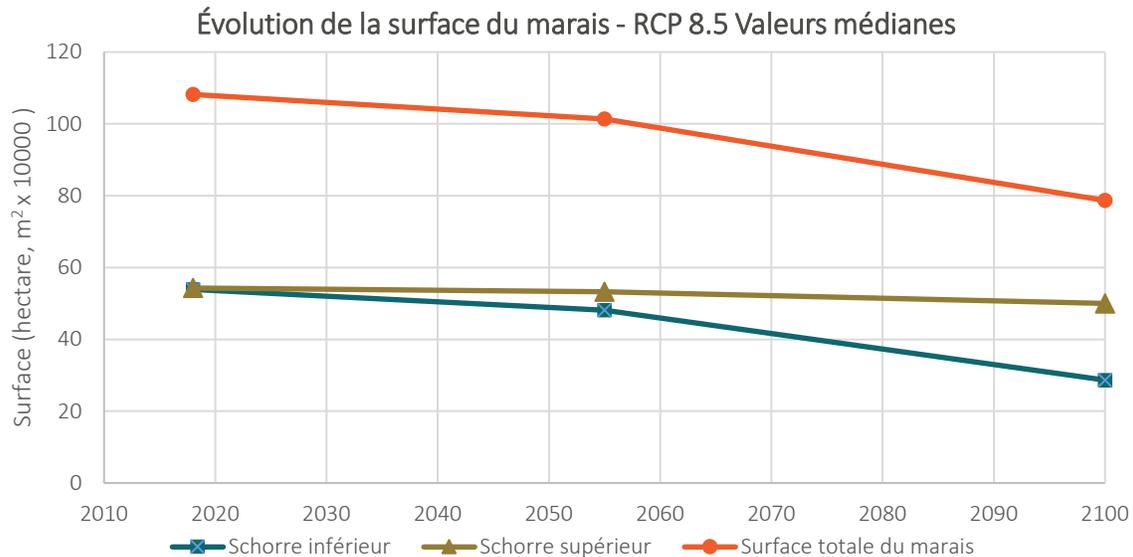


Figure 49 : Évolution de la surface du marais de Kamouraska selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

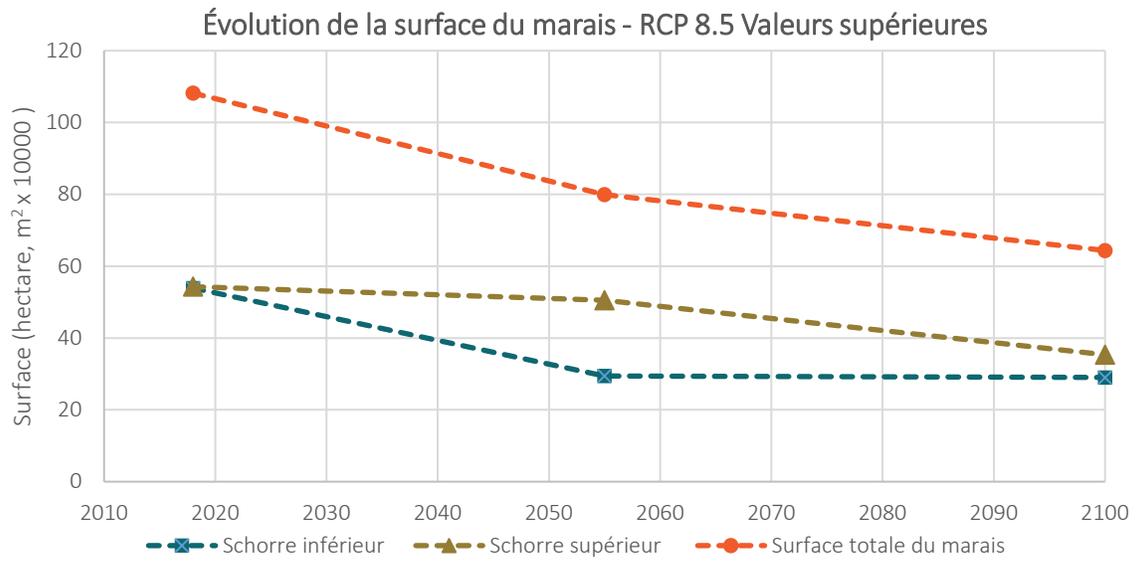


Figure 50 : Évolution de la surface du marais de Kamouraska selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

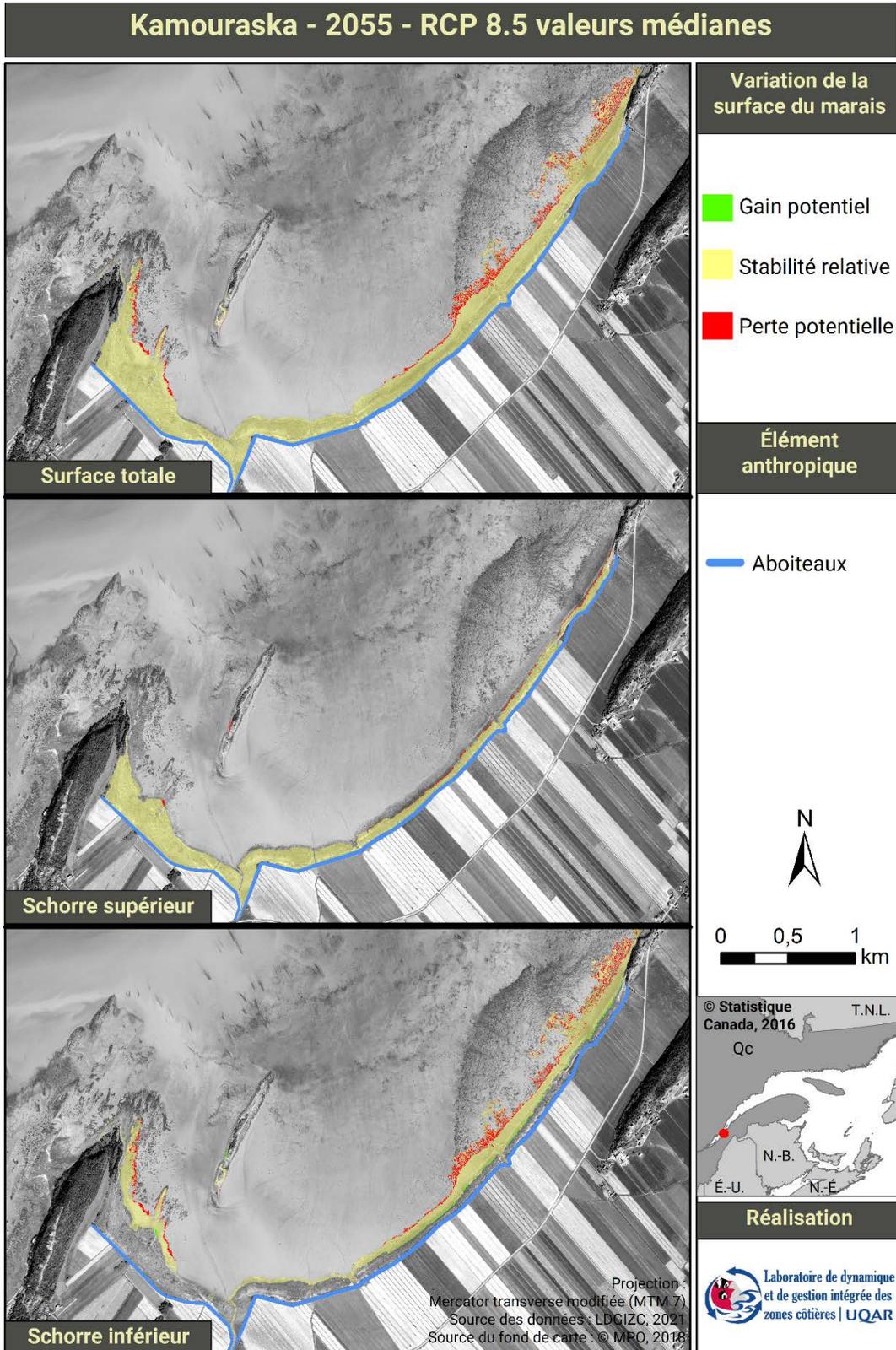


Figure 51 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Kamouraska en 2055 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

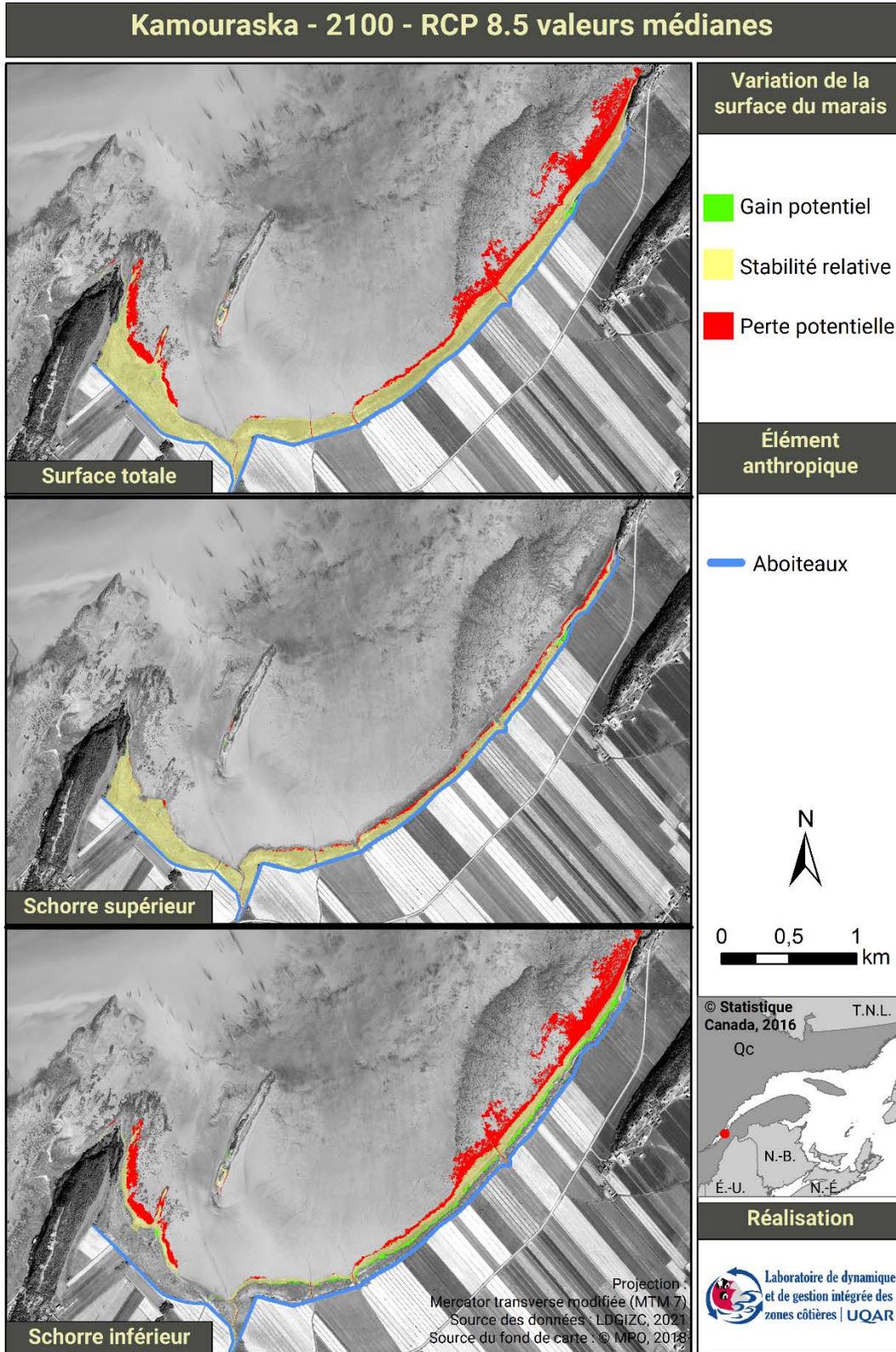


Figure 52 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Kamouraska en 2100 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

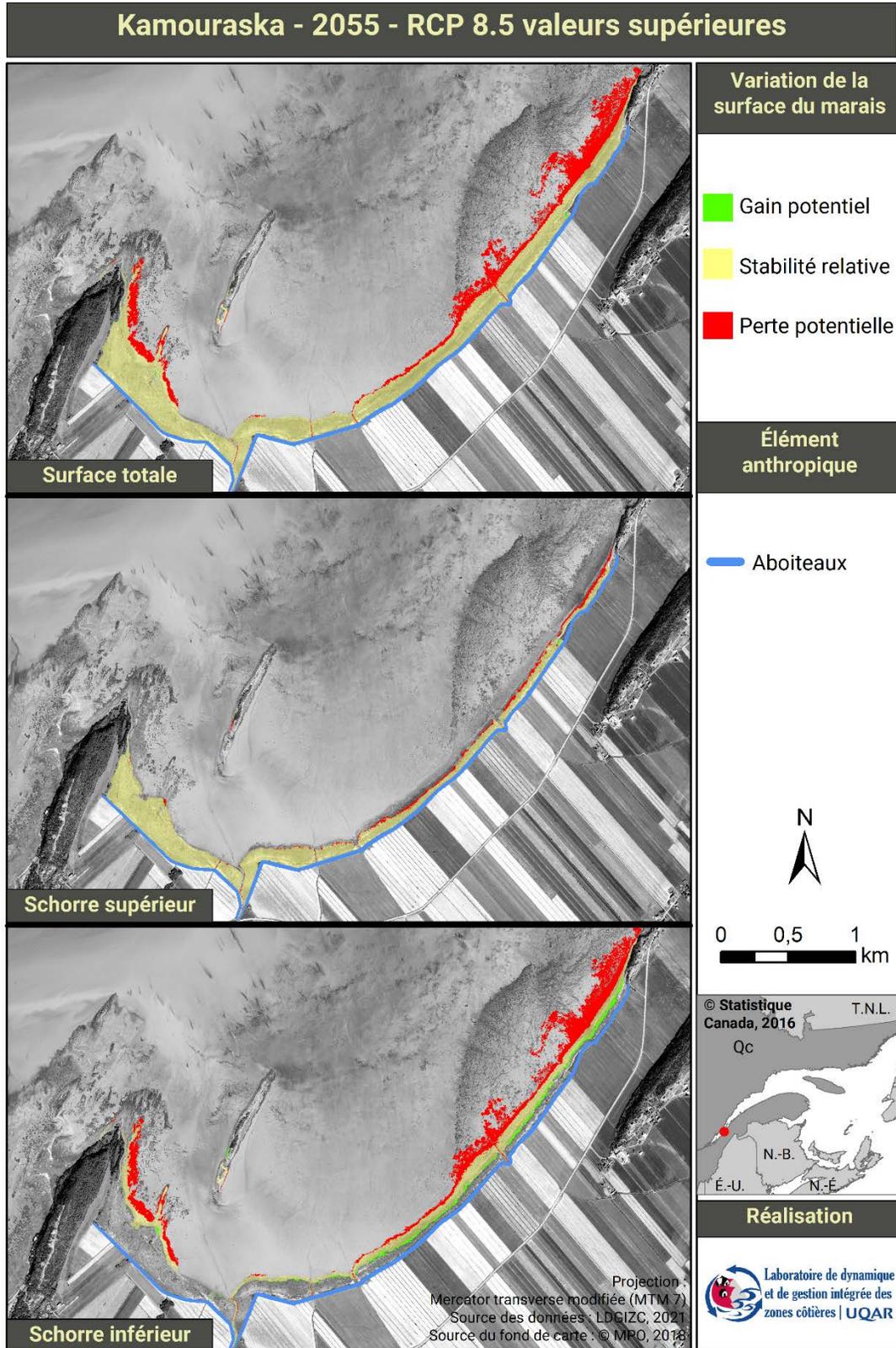


Figure 53 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Kamouraska en 2055 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

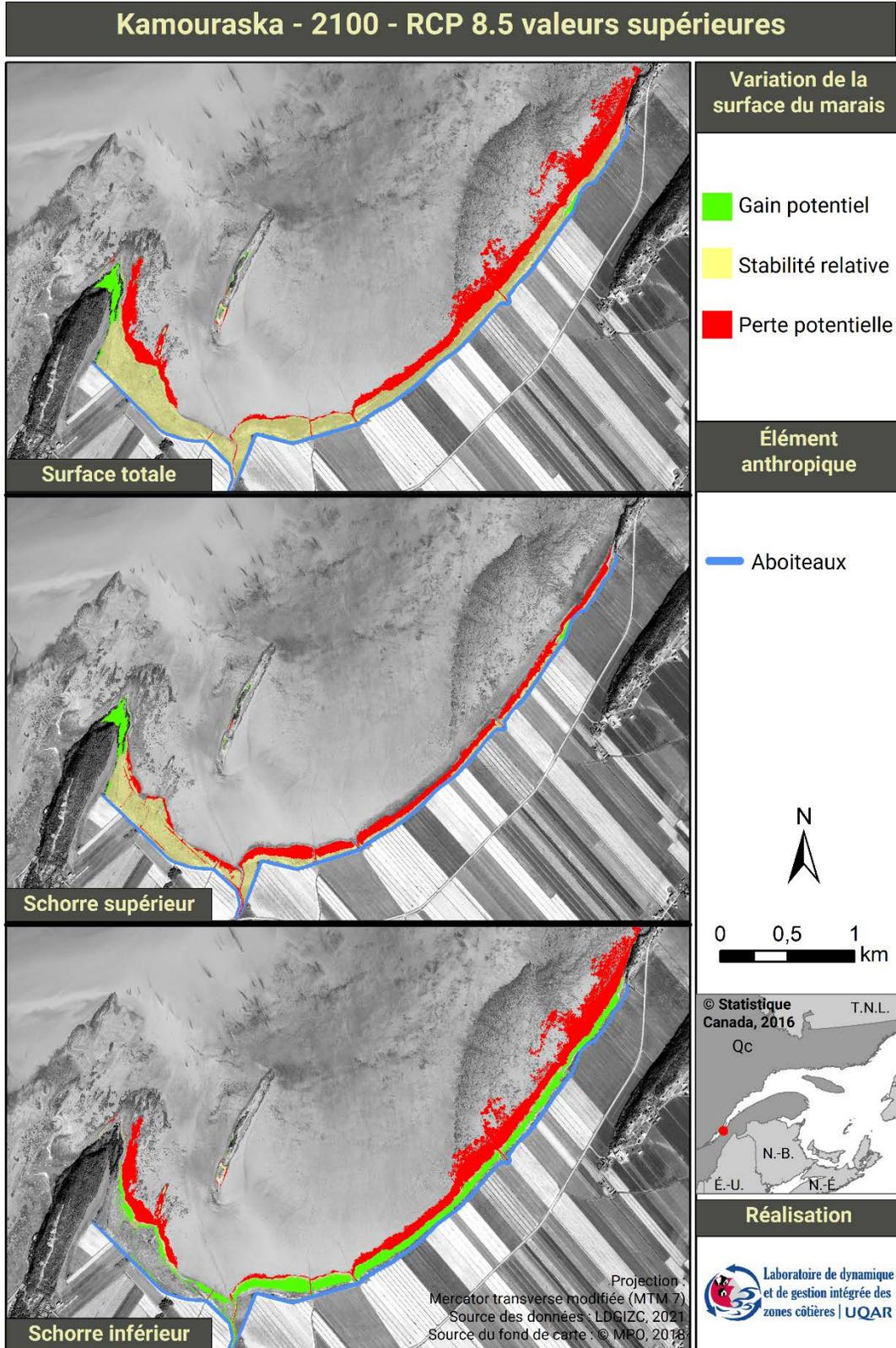


Figure 54 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Kamouraska en 2100 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

3.6.1 Réponse du marais de Kamouraska à une simulation de démantèlement des aboiteaux

La réponse potentielle du marais au démantèlement des aboiteaux a pu être modélisée en modifiant l'élévation du modèle numérique de terrain. Les résultats démontrent que suite au démantèlement, le marais accroît sa superficie de 41 hectares soit une augmentation de 38 % de sa surface initiale (figure 55). Pour l'horizon 2055, le marais sans aboiteaux subit une importante augmentation de 107 % de sa surface totale, contrairement au marais avec aboiteaux qui connaît une diminution de 26 % celle-ci. Pour l'horizon 2100, les marais avec et sans aboiteaux subissent une diminution de leurs surfaces.

Les cartes démontrent que suite au démantèlement le schorre supérieur possède la capacité de migrer vers les terres dans la partie est du marais où l'élévation est moindre. Cette migration peut atteindre jusqu'à 400 mètres selon l'altitude des champs submergée (figure 56). Selon les valeurs supérieures en 2055, le schorre supérieur continue sa migration jusqu'à atteindre la route 132. De plus, une partie du schorre supérieur est remplacé par du schorre inférieur (figure 57). En 2100, l'entièreté du schorre supérieur situé à l'est du marais est remplacée par le schorre inférieur qui atteindrait donc potentiellement la route 132.

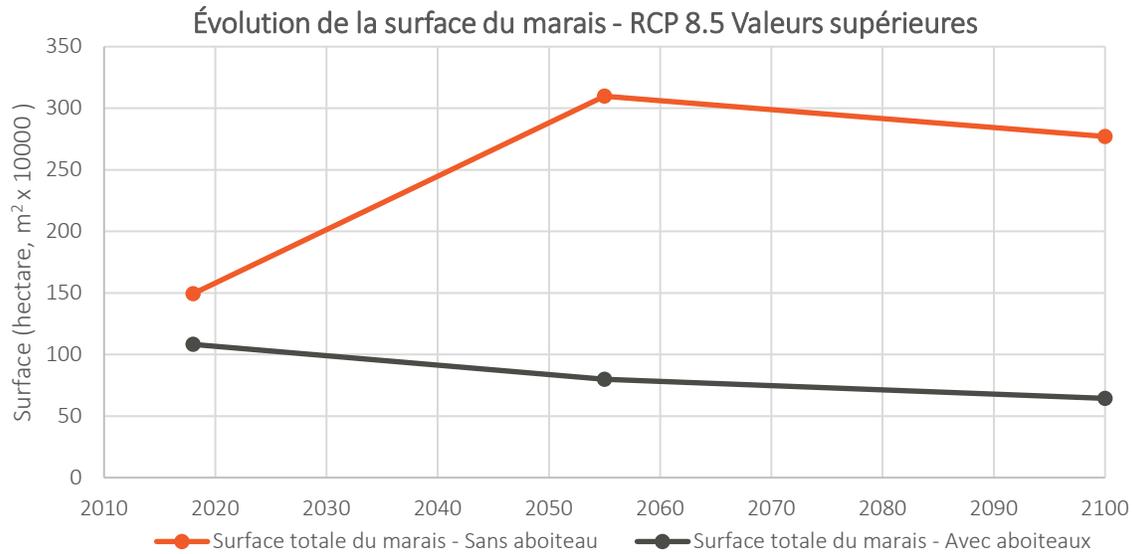


Figure 55 : Comparaison de l'évolution de la surface totale du marais de Kamouraska suite au démantèlement des aboiteaux selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5

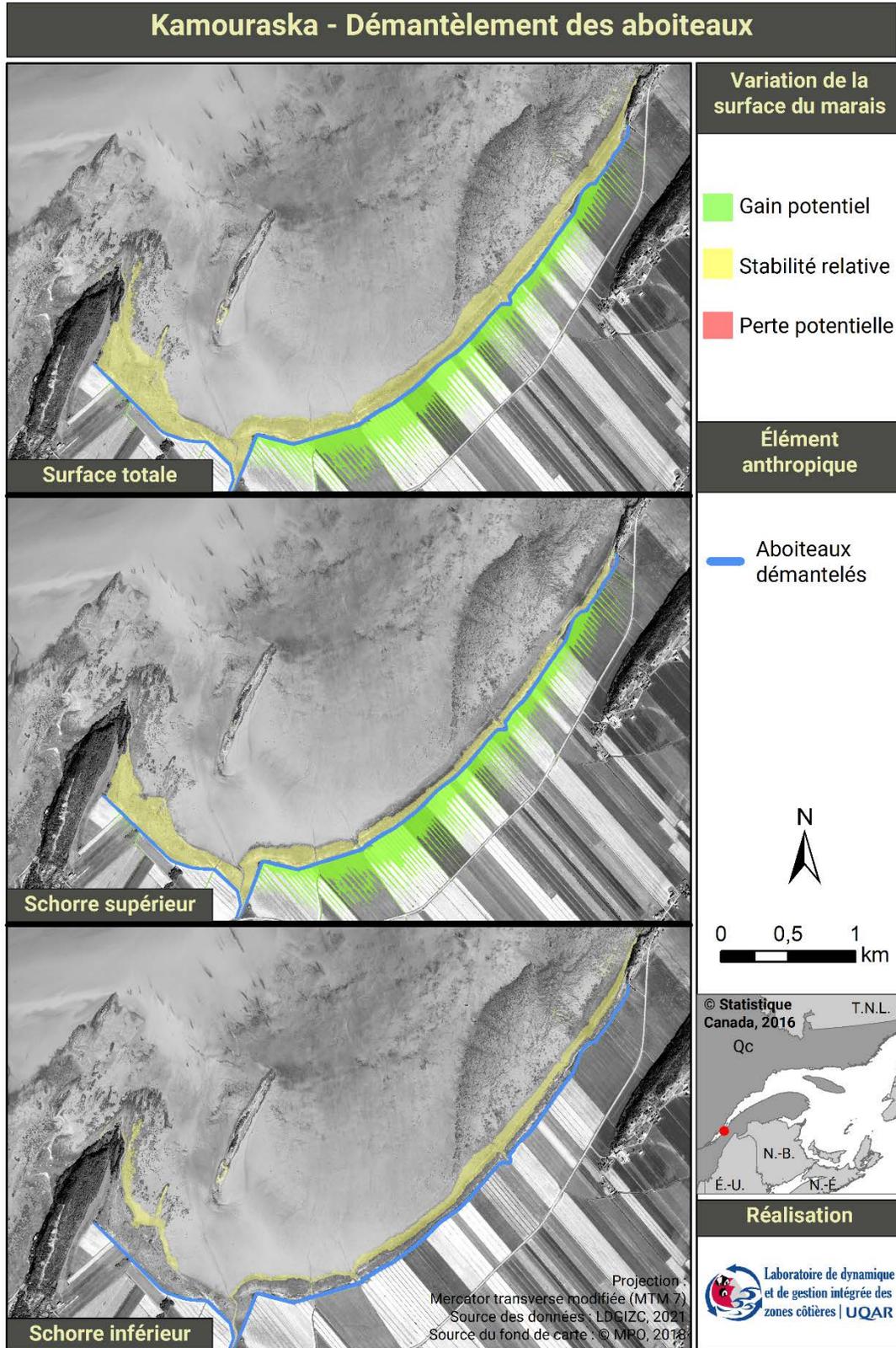


Figure 56 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Kamouraska suite au démantèlement des aboiteaux

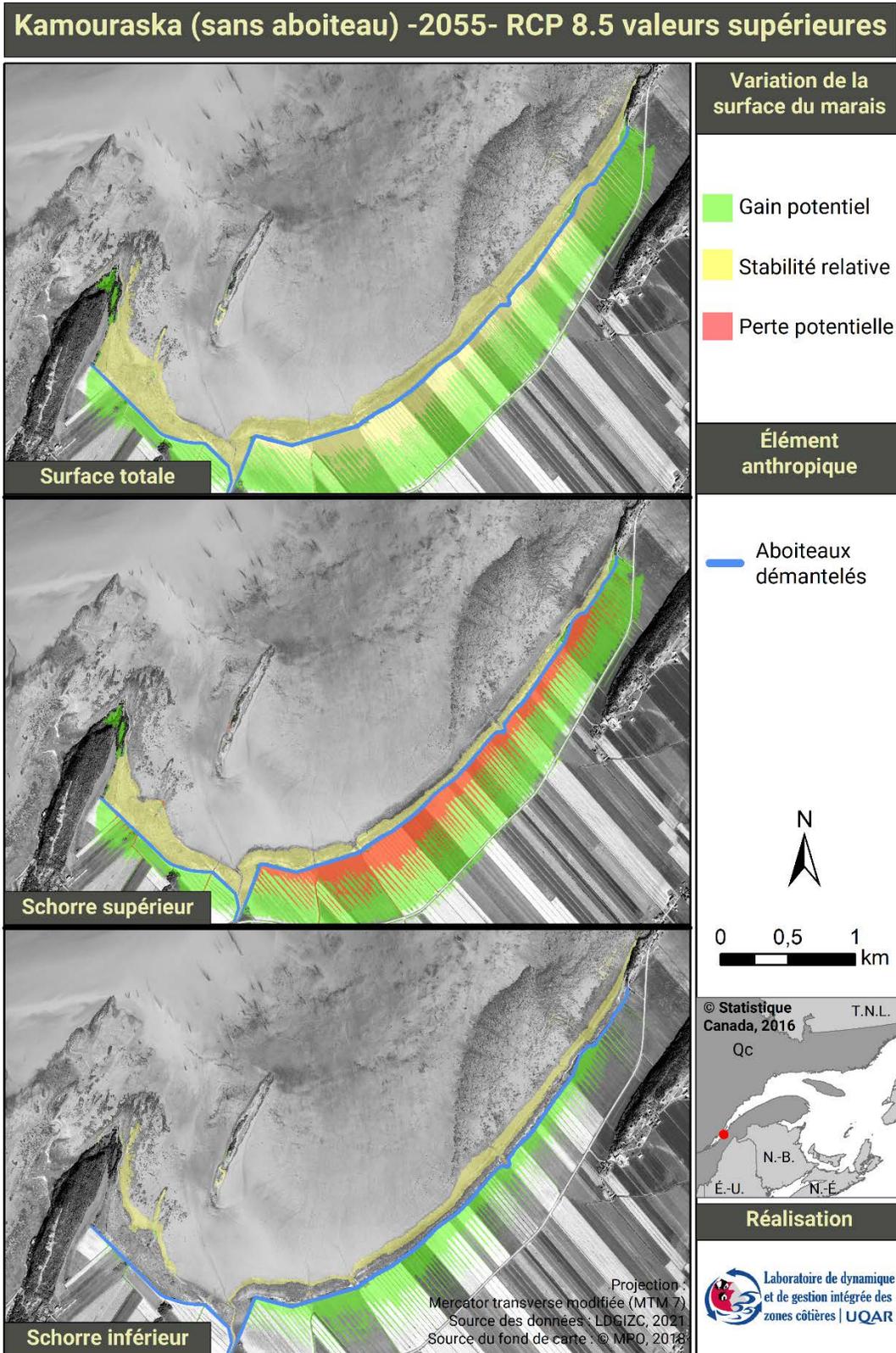


Figure 57 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Kamouraska suite au démantèlement des aboiteaux en 2055 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

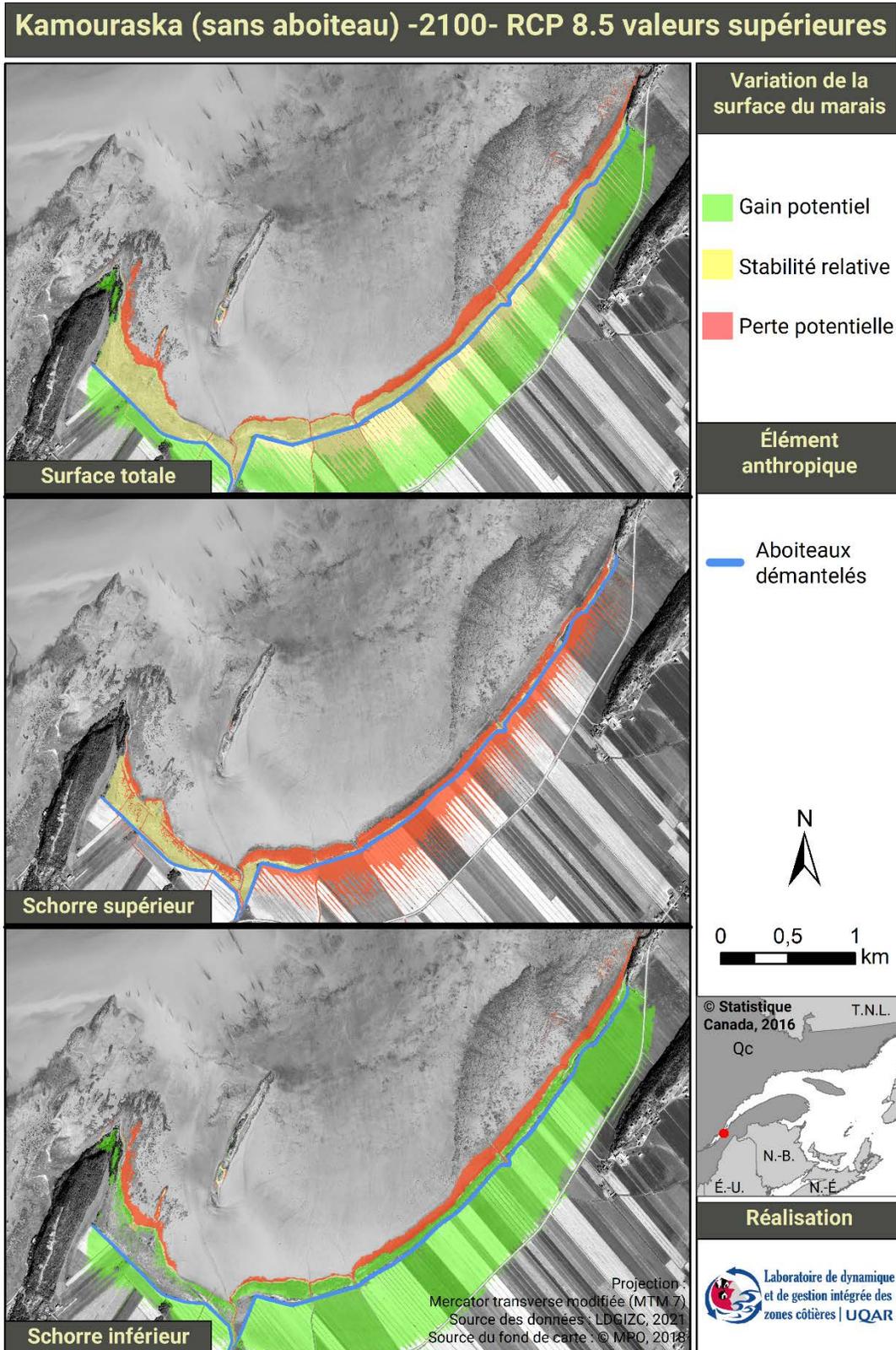


Figure 58 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Kamouraska suite au démantèlement des aboiteaux en 2100 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

3.7 Montmagny

Les résultats de la modélisation du marais de Montmagny indiquent la stabilité de l'ensemble des surfaces du marais soumis à une hausse prédite par les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 (figure 59). Le seul changement marqué subvient à l'horizon 2100 du scénario aux valeurs supérieures (figure 60) où le schorre inférieur subit une diminution de 170 hectares représentant une perte de 34 % en comparaison à l'horizon 2055. Cette forte diminution est attribuable à la perte d'une grande surface du marais dans le secteur centre-est du marais où la largeur du schorre inférieur passe d'environ 300 m en 2018 à environ 40 m en 2100.

La stabilité du marais de Montmagny peut être expliquée par de fort taux d'accrétion du marais de 2,5 à 3 mm/an utilisé dans cette étude (tableau 4) et par un faible taux d'ajustement isostatique de +0,4 mm/an (tableau 1) se traduisant par un léger soulèvement de la croûte terrestre. Il est important de souligner qu'une hausse plus élevée, comme présentée en 2100 dans le scénario de valeurs supérieures, pourrait occasionner une grande diminution de la surface du marais en raison de la présence de la terrasse Micmac d'une hauteur d'environ 8 m qui limite la migration du marais vers les terres (Jeanmoye-Turcotte, 2017, Dionne, 2004). De plus, la présente étude n'inclut pas le recul du schorre supérieur dans les différentes modélisations. Ce processus est très important à Montmagny. En effet, à l'intérieur de la surface modélisée, le Réseau de suivi de l'érosion du LDGIZC a implanté 103 bornes depuis 2001. La moyenne de l'ensemble des mesures est d'un recul du schorre supérieur de 1,48 m/an (Données internes non publiées, LDGIZC). L'érosion qui n'est pas prise en compte dans cette étude est donc l'un des processus essentiels pour bien saisir l'évolution du marais de Montmagny.

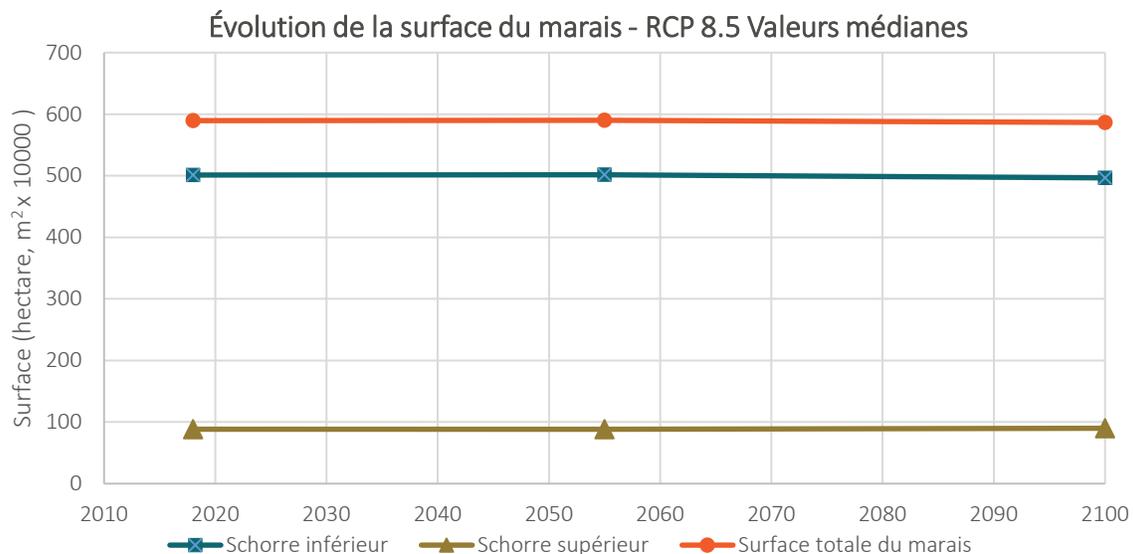


Figure 59 : Évolution de la surface du marais de Montmagny selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

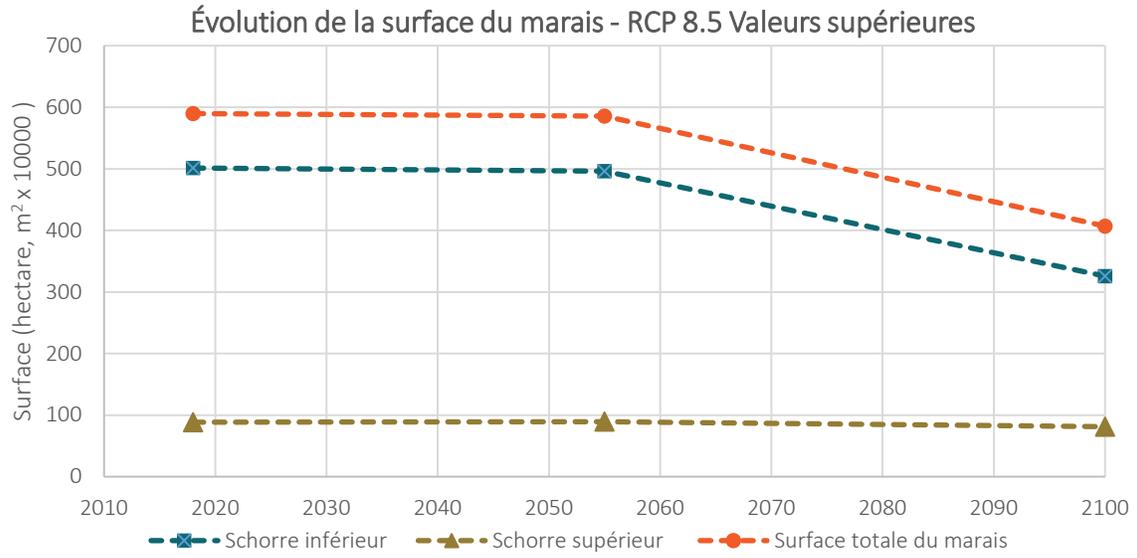


Figure 60 : Évolution de la surface du marais de Montmagny selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

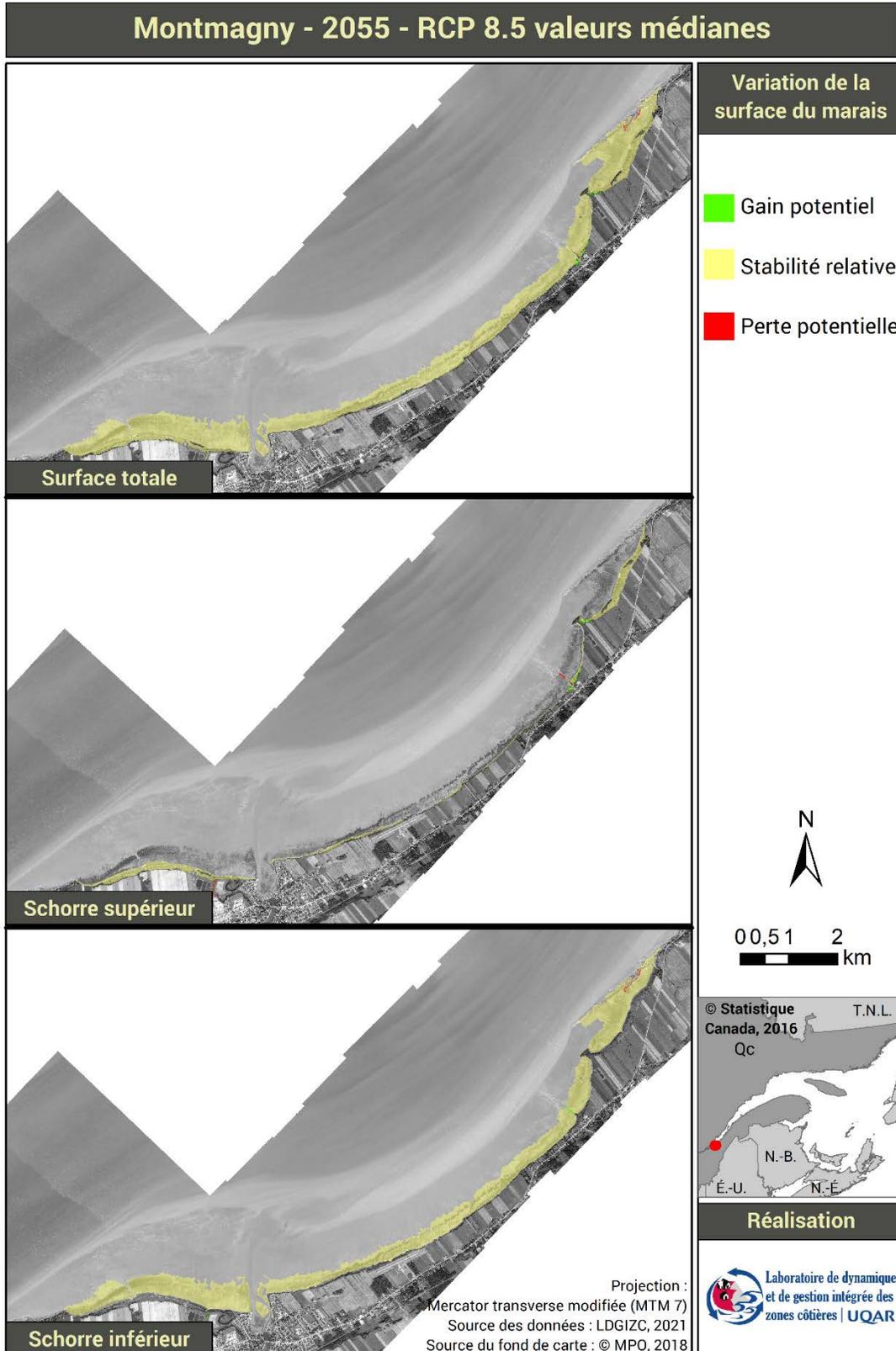


Figure 61 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Montmagny en 2055 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

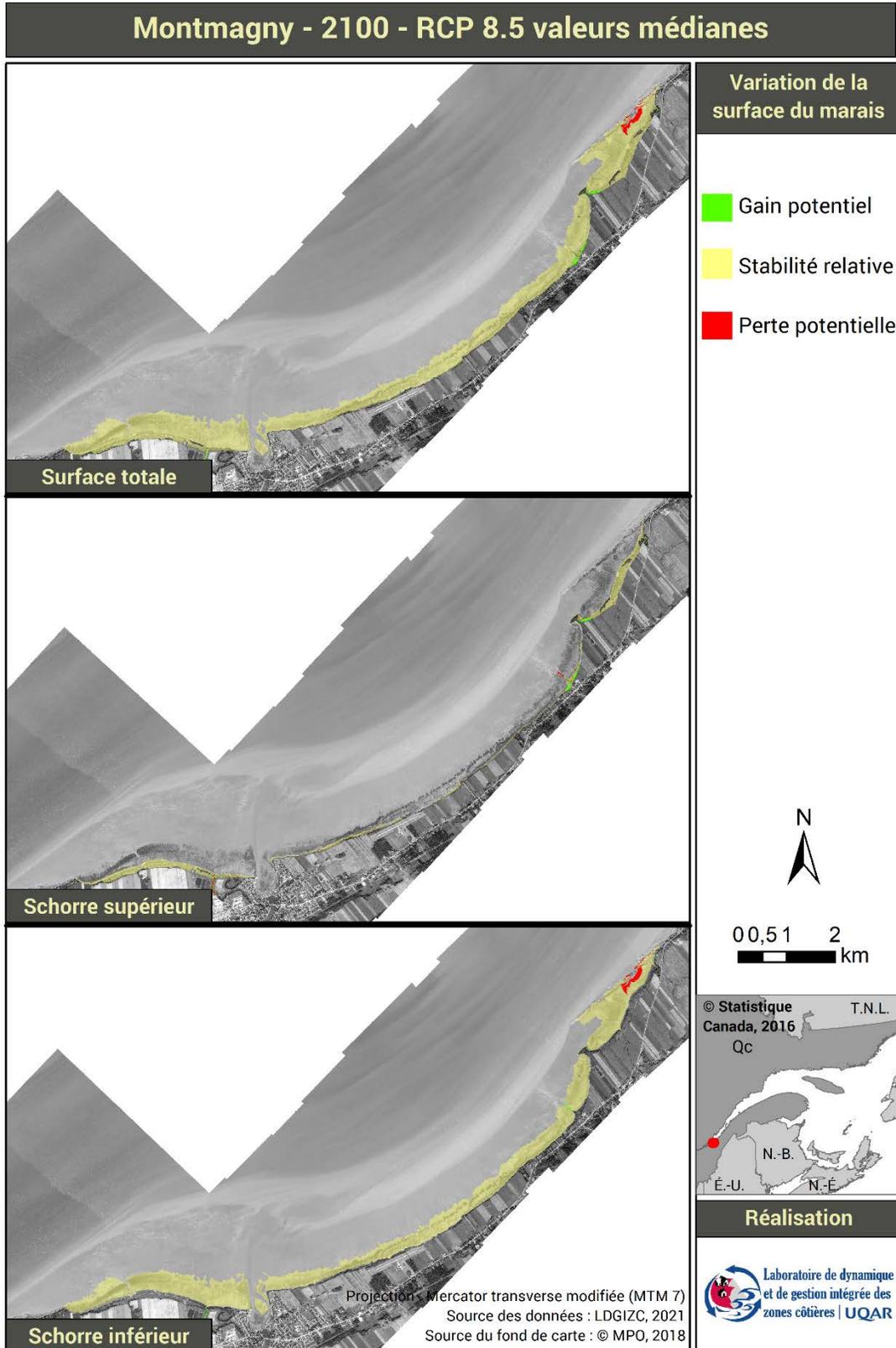


Figure 62 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Montmagny en 2100 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

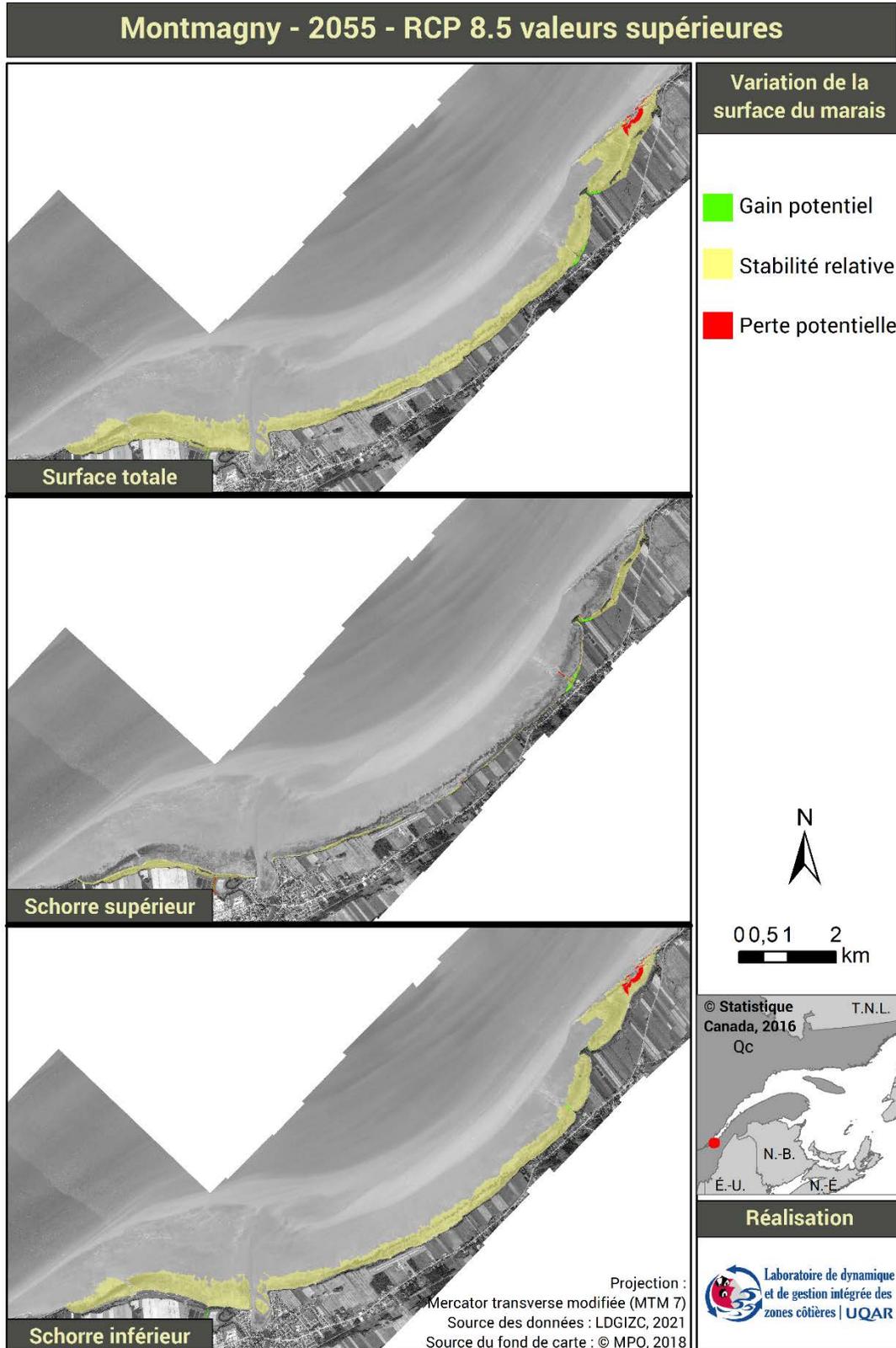


Figure 63 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Montmagny en 2055 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

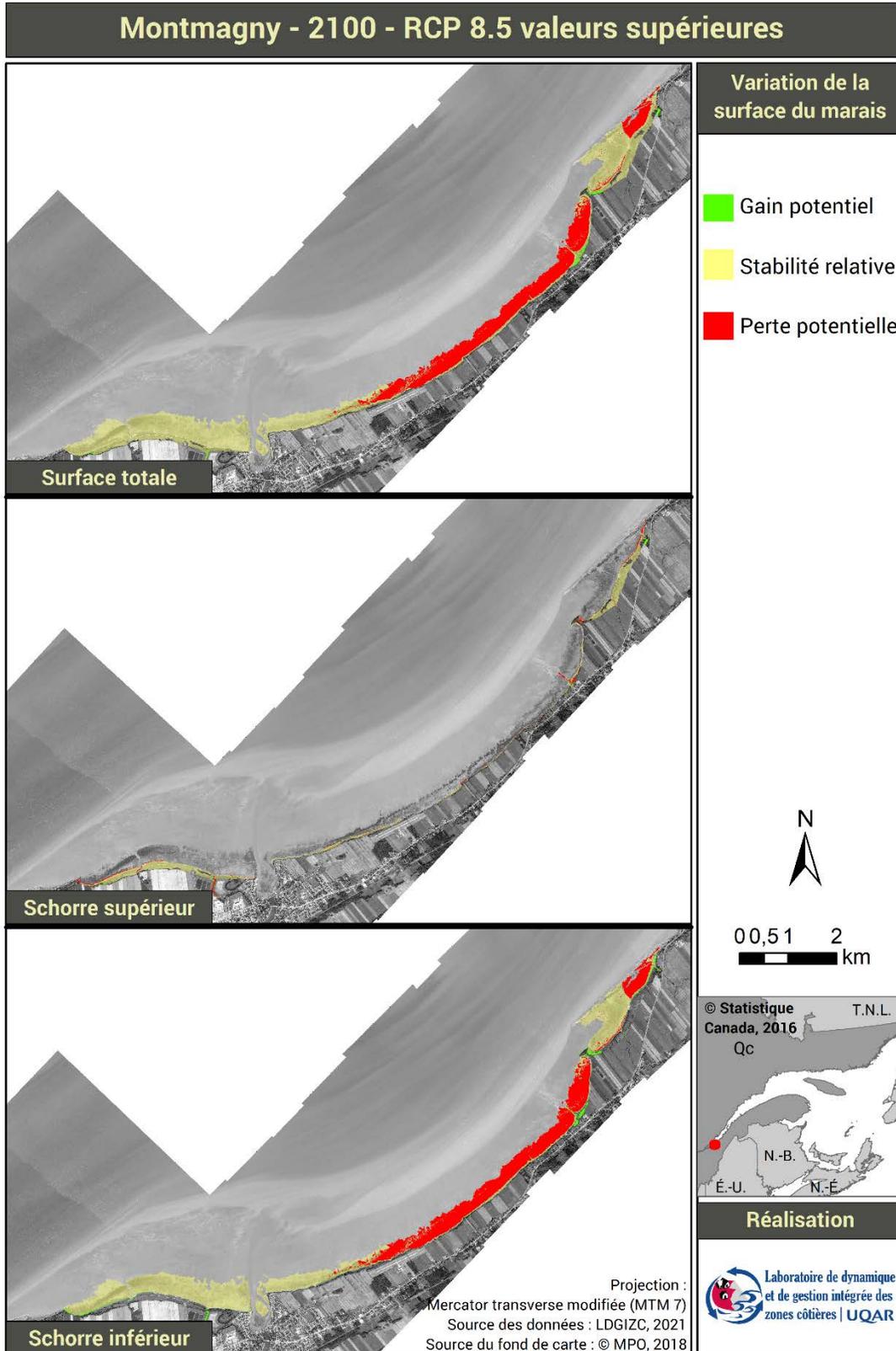


Figure 64 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Montmagny en 2100 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

3.8 Sainte-Anne-de-Beaupré (SAB)

Les résultats de la modélisation du marais de SAB indiquent la stabilité de l'ensemble des surfaces du marais soumis à une hausse prédite par les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 (figure 65). Le seul changement marqué subvient à l'horizon 2100 du scénario aux valeurs supérieures (Figure 66) où le schorre inférieur subit une diminution de 37 hectares représentant une perte de 8 % en comparaison à l'horizon 2055. Cette forte diminution est attribuable principalement au marais situé à l'ouest de l'embouchure de la rivière Sainte-Anne. De plus, une partie de ce marais migre potentiellement vers les terres sur une distance pouvant atteindre environ 30 m (figure 70).

La stabilité du marais de SAB peut être expliquée par les mêmes processus que le marais de Montmagny ; de forts taux d'accrétion du marais de 2,5 à 3,5 mm/an (tableau 4) ainsi qu'un faible taux d'ajustement isostatique de +0,8 mm/an (tableau 1) se traduisant par un léger soulèvement de la croûte terrestre. La présence d'un marécage arboré et arbustif situé entre le cadre bâti et le marais maritime offre une certaine zone de migration potentielle du marais. Une hausse plus élevée du niveau de la mer pourra ainsi forcer le marais à migrer vers les terres avant d'être adossé au remblai présent sur toute la rive.

L'érosion du schorre supérieur qui n'est pas prise en compte dans les modélisations est également un processus important sur le marais de SAB. En effet, à l'intérieur de la surface modélisée, le Réseau de suivi de l'érosion du LDGIZC à implanter 77 bornes depuis 2001. La moyenne de l'ensemble des mesures est d'un recul de 0,6 m/an (Données internes non publiées, LDGIZC). L'érosion qui n'est pas pris en compte dans cette étude est donc l'un des processus essentiels pour bien saisir l'évolution du marais de SAB.

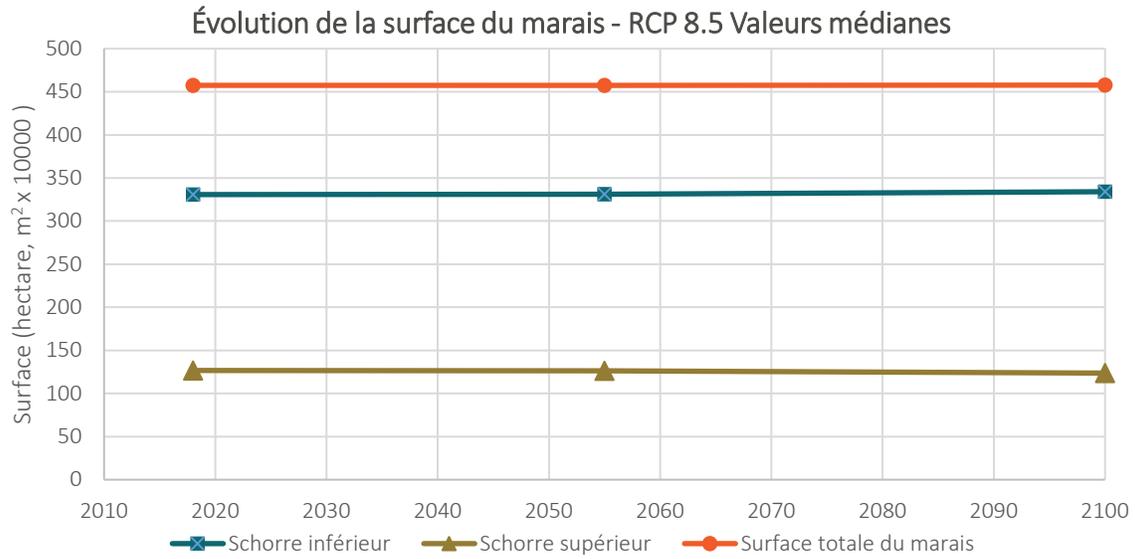


Figure 65 : Évolution de la surface du marais de Sainte-Anne-de-Baupré selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

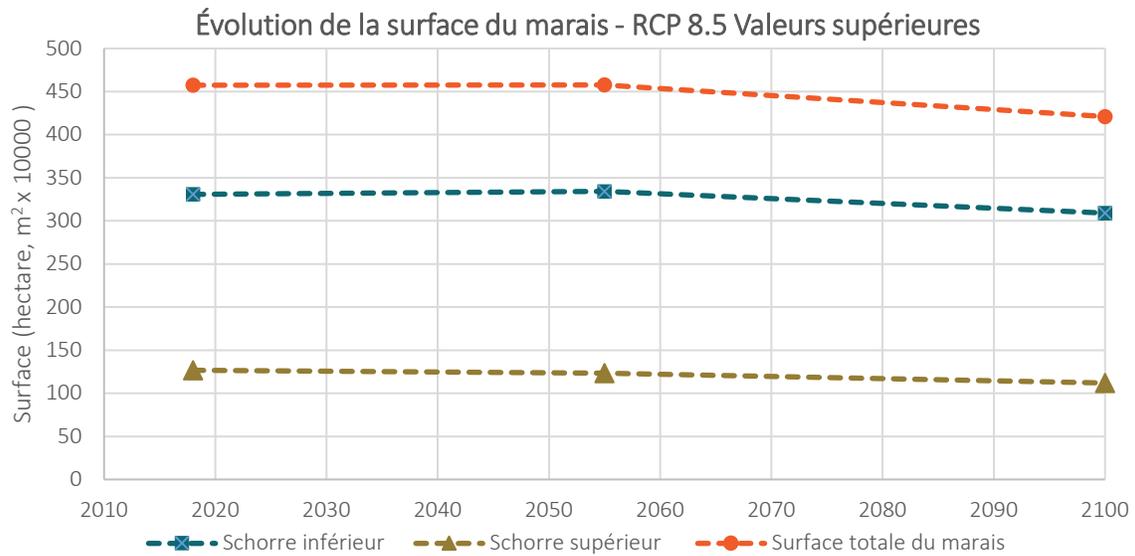


Figure 66 : Évolution de la surface du marais de Sainte-Anne-de-Baupré selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

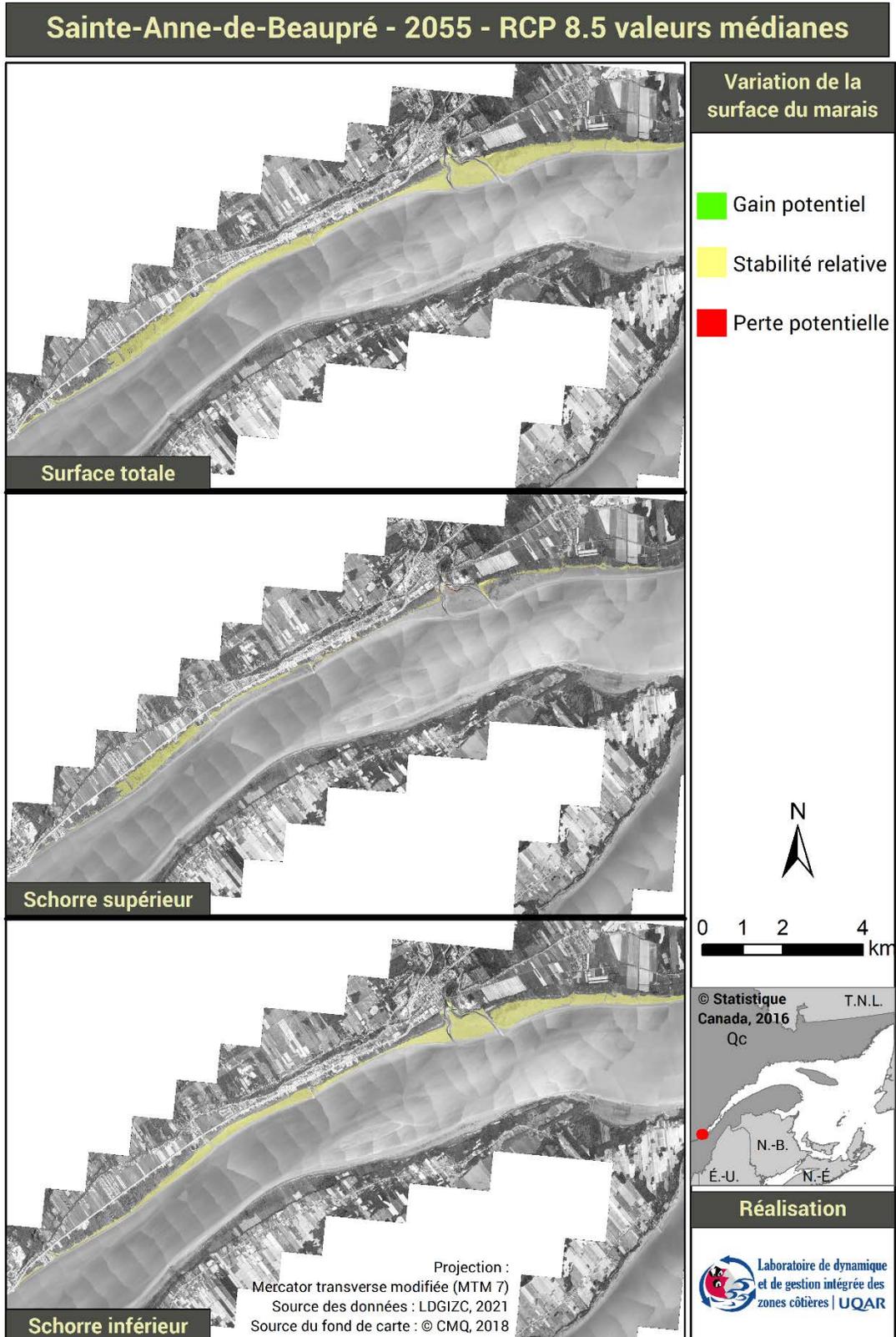


Figure 67 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Sainte-Anne-de-Beaupré en 2055 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

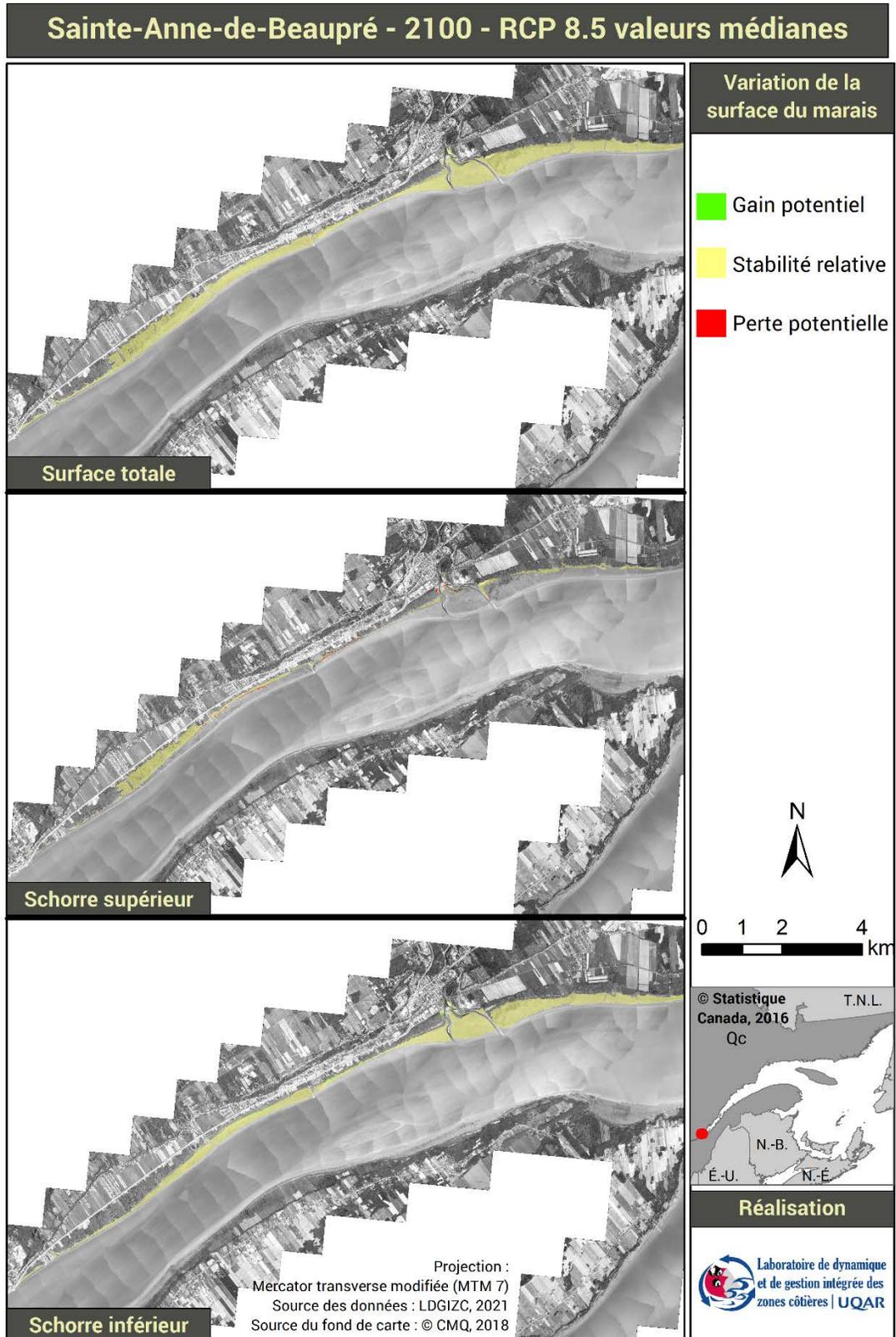


Figure 68 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Sainte-Anne-de-Beaupré en 2100 selon les valeurs médianes du scénario RCP 8.5 du GIEC

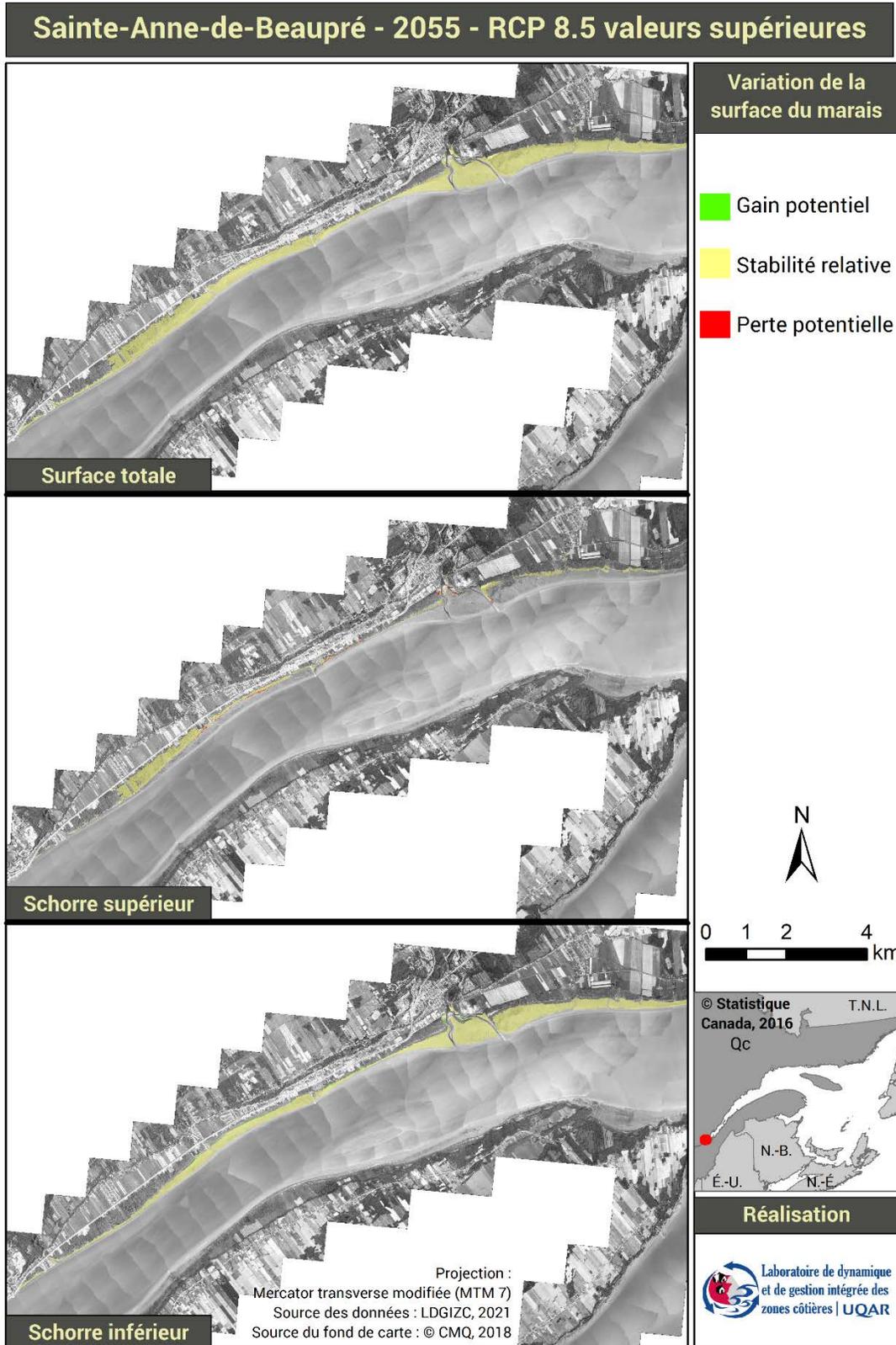


Figure 69 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Sainte-Anne-de-Beaupré en 2055 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

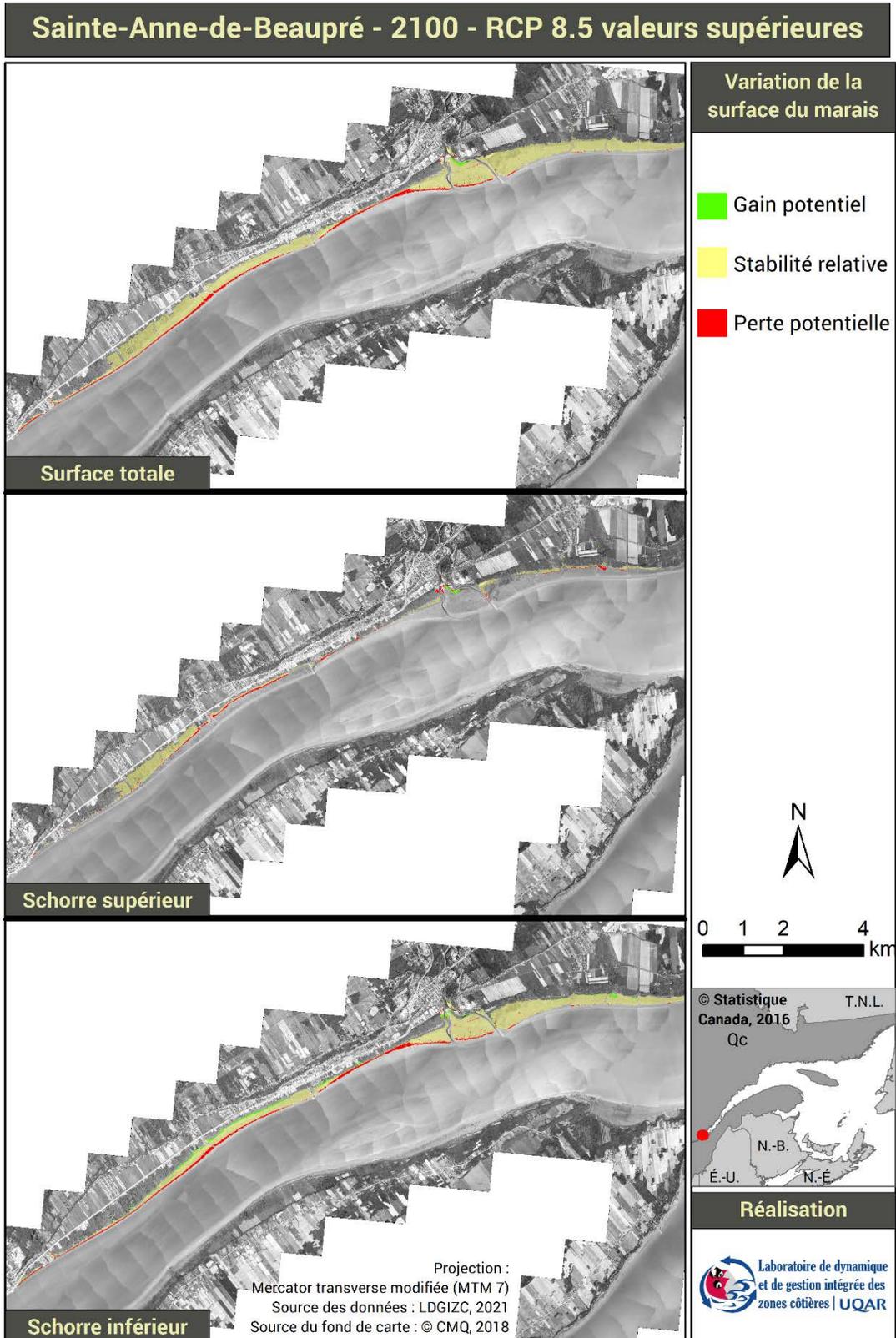


Figure 70 : Représentation cartographique de l'évolution de la surface du marais de Sainte-Anne-de-Beaupré en 2100 selon les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC

3.9 Comparaison intermarais

La réponse des marais salés à la hausse du niveau marin est étudiée sous deux angles : les variations de la surface totale du marais et les variations de la surface du schorre supérieur (figure 71 et figure 72). L'étude du schorre supérieur a été priorisée, car il contient une plus grande diversité végétale en comparaison au schorre inférieur qui est généralement mono-espèce au Québec.

Les résultats des modélisations nous indiquent une certaine tendance est-ouest dans la variation des surfaces totale des marais salés. Au sud-est de la zone d'étude, les marais des Îles-de-la-Madeleine, de Nouvelle et de St-Siméon connaîtraient un gain de leurs surfaces (figure 71). Au centre de la zone d'étude, les marais de Penouille, Rimouski et Kamouraska subiraient une perte de leurs surfaces (figure 71 et figure 72). Quant à eux, les marais de Montmagny et Sainte-Anne-de-Beaupré situées à l'ouest de la zone d'étude demeureraient relativement stables dans leurs surfaces (figure 72).

La variation des surfaces occupées par le schorre supérieur est plus hétérogène. Les marais des Îles-de-la-Madeleine, de Penouille et de Rimouski connaissent des gains de schorre supérieur plus importants en comparaison aux marais de St-Siméon et Kamouraska qui connaissent les pertes les plus importantes. À St-Siméon, le schorre supérieur subirait une diminution potentielle de 67 % en 2100 selon le scénario supérieur. Ces variations sont principalement expliquées par le phénomène de coincement côtier apparent dans chaque marais où la perte de schorre supérieur est importante. En effet, la migration des marais de St-Siméon et de Kamouraska est limitée par la présence de routes, de remblais et d'aboteaux. À l'inverse, les marais des Îles-de-la-Madeleine, de Penouille et de Rimouski possèdent la capacité de migrer vers les terres sans contrainte physique.

Dans tous les cas, plus la hausse du niveau de la mer est importante comme simulé par les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5, plus la réponse des marais sont importantes en comparaison avec les niveaux d'eau simulés par les valeurs médianes.

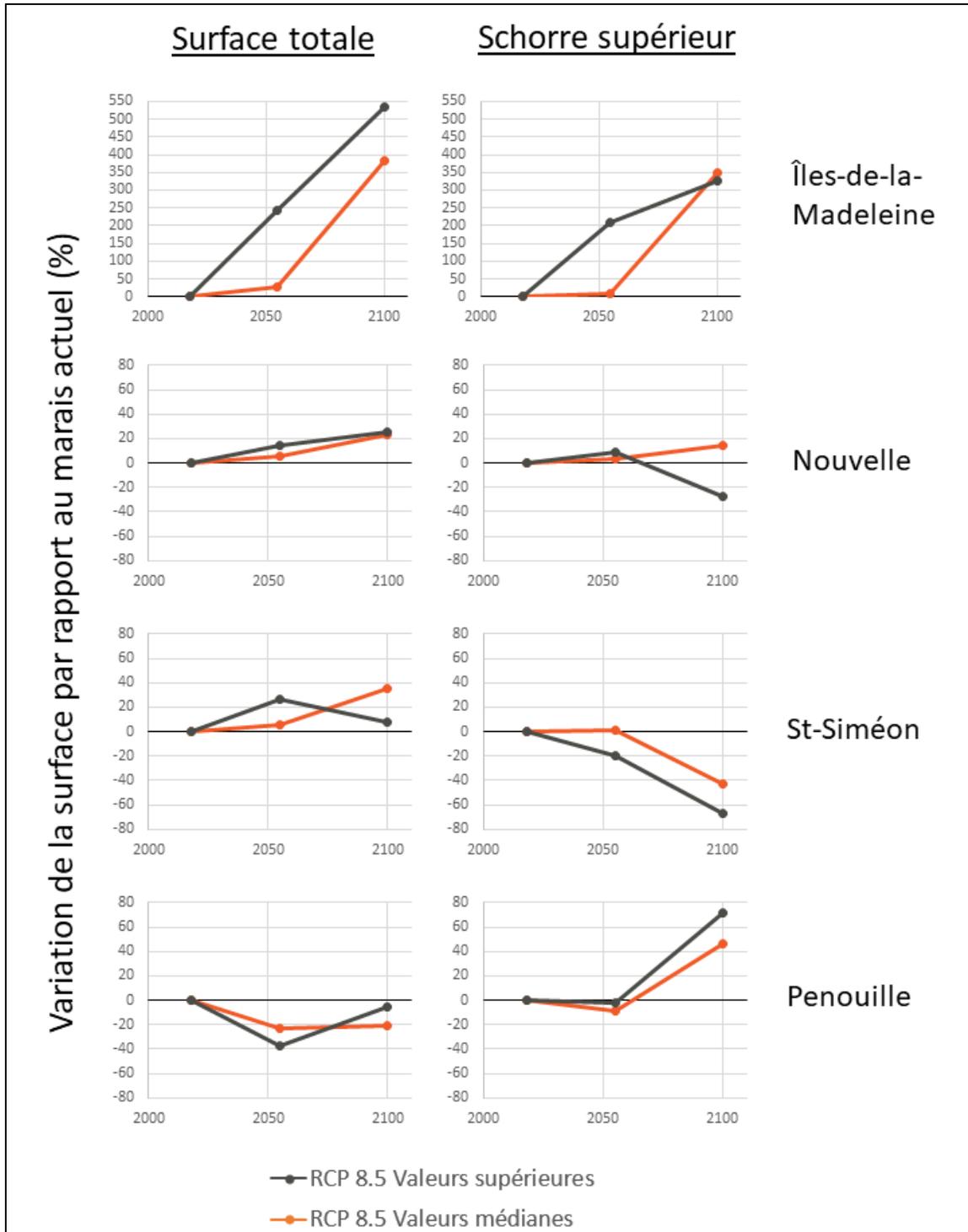


Figure 71 : Variation (%) de la surface totale du marais et du schorre supérieur par rapport au marais actuel. La comparaison est effectuée en 2055 et 2100 selon les valeurs médianes et supérieures des scénarios RCP 8.5 du GIEC pour les sites des IDLM, Nouvelle, St-Siméon et Penouille. Il est à noter que l'échelle verticale des IDLM est différente du reste des sites.

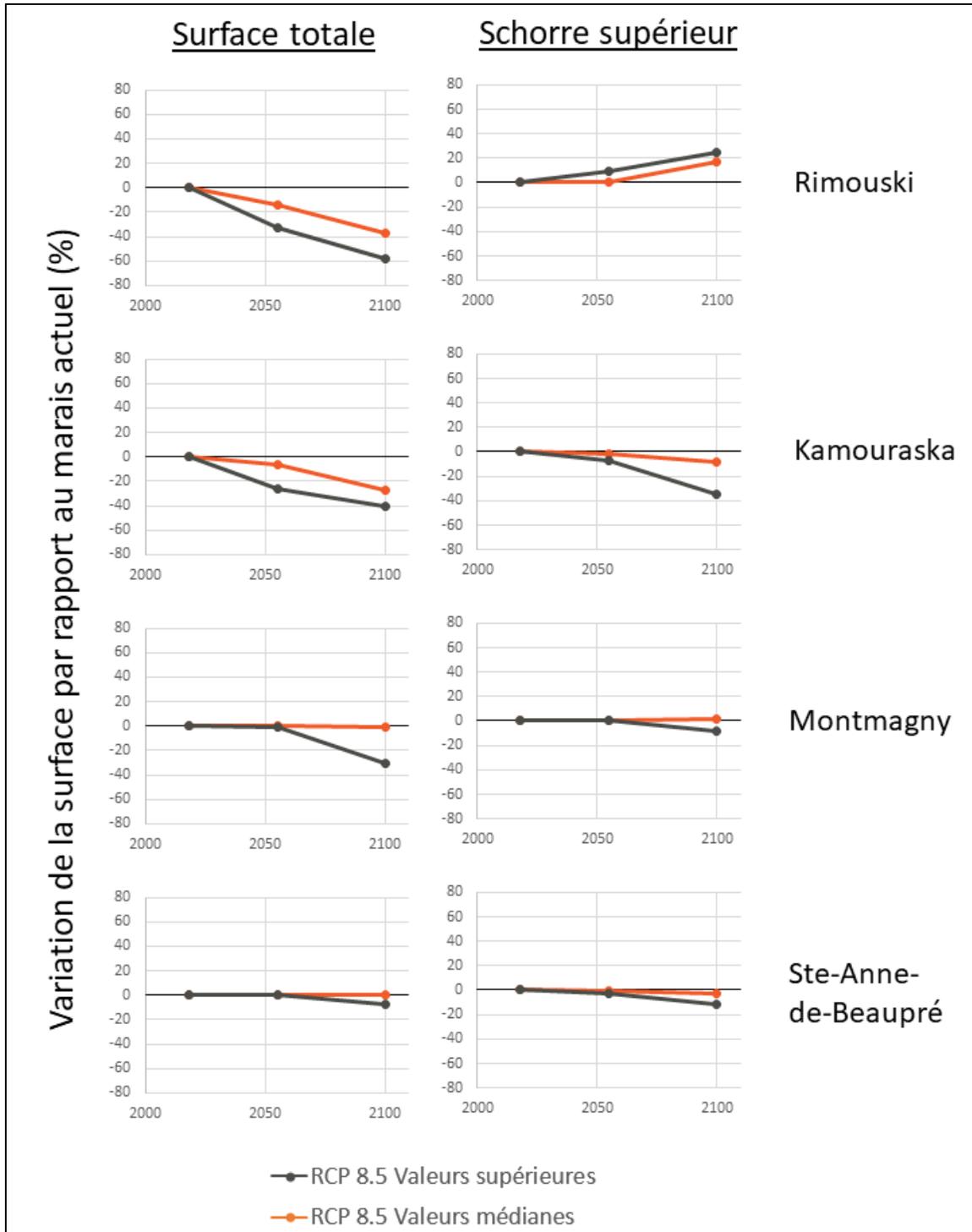


Figure 72 : Variation (%) de la surface totale du marais et du schorre supérieur par rapport au marais actuel. La comparaison est effectuée en 2055 et 2100 selon les valeurs médianes et supérieures des scénarios RCP 8.5 du GIEC pour les sites de Rimouski, Kamouraska, Montmagny et SAB.

4. Limites de la méthode

Bien que le modèle ait démontré son efficacité à réaliser des simulations de hausse du niveau marin et des impacts qui en résultent sur les marais maritimes, 6 principales limites du modèle ont été observées : la difficulté de valider le modèle, le manque de données d'accrétion, les difficultés à modéliser l'érosion et le phénomène d'autocyclicité hydrosédimentaire, l'absence de données d'écoulement des eaux et les défis de définir les limites de l'influence des vagues. Ces limites n'ont cependant pas empêché la réalisation des simulations, puisque l'équipe de travail a pu pallier ces contraintes. Il convient cependant de les décrire plus en détail dans l'évaluation de la modélisation, car elles peuvent ouvrir des avenues pour de potentielles améliorations dans le modèle.

4.1 Difficulté à valider le modèle

La première limitation concerne la difficulté de valider le modèle. La validation des écosystèmes actuels définis par SLAMM peut être validée au « temps zéro » en effectuant une comparaison entre les écosystèmes modélisés et ceux cartographiés comme définie dans la section 2.4 de ce rapport. Par contre, la validation des résultats projetés selon une hausse du niveau marin est plus ardue en raison de la difficulté de se procurer des intrants de qualités. Pour ce faire, une cartographie des écosystèmes et un modèle d'élévation historique géoréférencés et de hautes précisions seraient nécessaires.

4.2 Manque de données d'accrétion

Le manque de constance dans les méthodes de datation peut faire varier les résultats de manière importante. Les données récoltées se basent sur diverses mesures de terrain ainsi que des études ayant utilisé une ou plusieurs méthodes de datation différente. Certains auteurs ont utilisé la datation au plomb P^{210} (Hatvany, 2002), plus appropriée pour la période récente des 150 dernières années (Corbett & Walsh, 2015). D'autres auteurs ont utilisé la datation au carbone C^{14} (Dionne, 2004 ; Champagne *et al.*, 1983), qui est généralement utilisée pour dater des éléments plus vieux (750 ans à 40 000 ans environ). D'autres encore ont utilisé la dendrochronologie sur des billots de bois à la base du marais, car cette méthode a l'avantage de déterminer des événements historiques à l'année près (Quintin, 2010). On peut ainsi se douter que les taux d'accrétion qui en résultent comportent un biais dû au fait qu'ils proviennent de méthodes et sources différentes. De plus, certains taux manquent de précision, car il aurait fallu faire plusieurs carottes sédimentaires pour calculer les taux d'accrétion dans chaque marais étudié, ainsi que plusieurs analyses et sur de plus grandes portions de territoire.

4.3 Modélisation d'érosion

La modélisation de l'érosion de SLAMM est très simpliste. Il permet seulement de simuler l'érosion du schorre supérieur lorsqu'il est juxtaposé à l'eau libre. Cette caractéristique signifie qu'aucune érosion du schorre supérieur ne peut avoir lieu lorsqu'il y a présence d'un schorre inférieur ou d'une slikke en avant de celui-ci. Le modèle d'érosion proposé par SLAMM n'est donc

pas compatible avec les dynamiques d'érosion des marais du Québec maritime où le schorre supérieur peut être en érosion même en présence du schorre inférieur (Dionne, 2004).

4.4 Autocyclicité hydrosédimentaire

La modélisation effectuée par SLAMM ne prend pas en compte la complexité de l'interrelation des différents processus d'érosion dans les marais. Cette notion nommée autocyclicité hydrosédimentaire implique que l'érosion d'une partie du marais peut être bénéfique à l'ensemble du marais (Ladd et al., 2019 ; Jeanmoye-Turcotte, 2017). Par exemple, l'érosion du schorre supérieur peut rendre des sédiments disponibles dans le système hydrosédimentaire servant à l'accroissement vertical et horizontal du schorre inférieur et de la slikke venant ainsi réduire les taux de reculs du schorre supérieur. Cette complexité n'est donc pas représentée dans les modélisations effectuées par SLAMM.

4.5 Absence de données d'écoulement des eaux

Une autre limitation est le manque de données d'écoulement des eaux définies par le paramètre « *fresh-water flows* » dans le modèle. Ce paramètre permet de modéliser l'influence fluviale des rivières principales et des tributaires dans les estuaires où sont présents les marais comme à Nouvelle.

4.6 Délimitation arbitraire de la limite de l'influence des vagues

Pour cette étude, les paramètres d'érosion et de transgression par lobes de tempêtes « *overwashes* » n'ont pas été utilisés, car ils sont jugés comme trop simplistes. Dans les cas où les marais sont situés derrière une flèche littorale, une limite d'influence des vagues doit être définie arbitrairement. Dans cette étude, une limite subjective a été définie à l'ouest de la flèche de St-Siméon et de Penouille.

5. Conclusion

Au Québec maritime, les variations de la surface et de la composition des marais sont principalement expliquées par trois facteurs : les variations du niveau marin relatif entraîné par la variation verticale de la croûte terrestre (hausse accélérée aux IDLM et dans la Baie-des-Chaleurs et une hausse ralentie dans l'Estuaire moyen) ; l'espace de liberté disponible pouvant accommoder, ou non, la migration des marais vers les terres (très limité à Saint-Siméon et Kamouraska et très vaste aux IDLM) ; le taux d'accumulation venant accroître l'élévation du marais (très importants à Nouvelle et dans l'Estuaire moyen). On remarque finalement que plus la hausse du niveau marin est grande, représentée ici par les valeurs supérieures du scénario RCP 8.5, plus la transformation des marais est marquée.

La réponse des marais salés à une hausse du niveau marin est donc assez hétérogène. Au Québec maritime, ces variations sont causées par des phénomènes d'ordres globaux comme la hausse eustatique du niveau marin, par des phénomènes régionaux comme les variations isostatiques de la croûte terrestre et par des phénomènes locaux comme l'accrétion verticale des marais et le phénomène de coincement côtier.

6. Références

- Appleby, P. G. (2001). Chronostratigraphic Techniques in Recent Sediments. In W. M. Last et J. P. Smol (Eds.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Basin Analysis, Coring, and Chronological Techniques* (pp. 171–203). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/0-306-47669-X_9
- Barnett, R. L., Bernatchez, P., Garneau, M., Brain, M. J., Charman, D. J., Stephenson, D. B., Haley, S., et Sanderson, N. (2019). Late Holocene sea-level changes in eastern Québec and potential drivers. *Quaternary Science Reviews*, 203, 151–169. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.10.039>
- Bernatchez, P., Fraser, C., Dugas, S. et Drejza, S. (2012). *Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral de la MRC d'Avignon*. 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, août 2012, 49 p. et annexes.
- Bernatchez, P., Quintin, C., Fraser, C., Neumeier, U., Jolivet, Y., Houde-Poirier, M., Héту, B., Gibeault, C., Boucher-Brossard, G. et Marie, G. 2013. *Dynamique de l'écosystème côtier de la péninsule de Penouille dans un contexte de changements climatiques, Parc national du Canada Forillon : Rapport final*. Rapport remis au Parc national du Canada Forillon. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, mai 2013, 410 p.
- Bernatchez, P. et Quintin, C. (2016). Potentiel de migration des écosystèmes côtiers meubles québécois de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent dans le contexte de la hausse appréhendée du niveau de la mer. *Le Naturaliste canadien*, 140(2), 91–104. <https://doi.org/10.7202/1036507ar>
- Bernatchez, P., Barnett, R.L., Héту, B., Goslin, J., Béland, C., Dubé, J., et Garneau, M. (2020). *Reconstitution historique des variations du niveau marin relatif et projections du niveau marin pour l'estuaire maritime et le golfe du Saint-Laurent*. 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, 146 p.
- Calet, C., Drejza, S., Fraser, C., Marie, G. et P. Bernatchez (2021). Modélisation de l'effet des tempêtes actuelles et futures sur les côtes basses meubles. 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 l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, juillet 2021, 105 p.
- Champagne, P., Denis, R., et Lebel, C. (1983). *Établissement de modèles caractérisant l'équilibre dynamique des estrans de la rive sud du moyen estuaire du Saint-Laurent*. [Pêches et Océans Canada, Direction de la recherche sur les pêches, Québec. Rapport manuscrit des Sciences halieutiques et aquatiques 1711]. <http://publications.gc.ca/pub?id=9.606268&sl=1>

Corbett, D. R., et Walsh, J. P. (2015). 210Lead and 137Cesium: Establishing a chronology for the last century. In I. Shennan, A. J. Long, & B. P. Horton (Eds.), *Handbook of Sea-Level Research* (pp. 361–372). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118452547.ch24>

Comité ZIP du Sud-de-l'Estuaire (2013). Rapport de caractérisation du marais salé de Sacré-Cœur, 26 p.

Cubasch, U., Wuebbles, D., Chen, D., Facchini, M.C., Frame, D., Mahowald, N., Winther, J.G. (2013) Introduction. In: *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Dionne, J.-C. (2004). Âge et taux moyen d'accrétion verticale des schorres du Saint-Laurent estuarien, en particulier ceux de Montmagny et de Sainte-Anne-de-Beaupré, Québec. *Géographie Physique et Quaternaire*, 58, 73. <https://doi.org/10.7202/013111ar>

Garner, A. J., Weiss, J. L., Parris, A., Kopp, R. E., Horton, R. M., Overpeck, J. T., et Horton, B. P. (2018). Evolution of 21st Century Sea Level Rise Projections. *Earth's Future*, 6(11), 1603–1615. <https://doi.org/10.1029/2018EF000991>

Gedan, K. B., Kirwan, M. L., Wolanski, E., Barbier, E. B., et Silliman, B. R. (2011). The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: Answering recent challenges to the paradigm. *Climatic Change*, 106(1), 7–29. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-0003-7>

Hatvany, M. (2002). *The aboiteaux of Kamouraska: An historical geography of nature, people and process*. [Thèse de doctorat]. Département de géographie, Université Laval.

Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I., Diedhiou, A., Djalante, R., Ebi, K.L., Engelbrecht, F., Guiot, J., Hijioka, Y., Mehrotra, S., Payne, A., Seneviratne, S.I., Thomas, A. Warren, R. et Zhou, G. (2018). Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.

Horton, B. P., Khan, N. S., Cahill, N., Lee, J. S. H., Shaw, T. A., Garner, A. J., Kemp, A. C., Engelhart, S. E., et Rahmstorf, S. (2020). Estimating global mean sea-level rise and its uncertainties by 2100 and 2300 from an expert survey. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 3(1), 18. <https://doi.org/10.1038/s41612-020-0121-5>

Jeanmoye-Turcotte, G. (2017). *Analyse diachronique des marais intertidaux de Montmagny : l'autocyclicité hydrosédimentaire*. Mémoire de thèse. Université Laval.

Jeffrey, S. W., et Mantoura, R. F. C. (1997). Development of pigment methods for oceanography: SCOR-supported Working Groups and objectives. In S. W. Wright (Ed.), *Phytoplankton Pigments in Oceanography: Guidelines to Modern Methods* (p. 661). SCOR-UNESCO, Paris.

Jobin, A., Marquis, G., Provencher-Nolet, L., Gabaj Castrillo, M. J., Trubiano C., Drouet, M., Eustache-Létourneau, D., Drejza, S. Fraser, C. Marie, G. et P. Bernatchez (2021) *Cartographie des écosystèmes côtiers du Québec maritime – Rapport méthodologique*. 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 l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, septembre 2021, 105 p.

Joubert, J.-É. et Bachand, É. (2012). *Un marais en changement, caractérisation du marais salé de la baie de Kamouraska*. Comité ZIP du Sud-de-l'Estuaire, Rimouski, Québec. 123 p. avec annexes.

Koohzare, A., Vaníček, P., et Santos, M. (2008). Pattern of recent vertical crustal movements in Canada. *Journal of Geodynamics*, 45(2), 133–145. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2007.08.001>

Ladd, C. J. T., Duggan-Edwards, M. F., Bouma, T. J., Pagès, J. F., et Skov, M. W. (2019). Sediment supply explains long-term and large-scale patterns in salt marsh lateral expansion and erosion. *Geophysical Research Letters*, 46, <https://doi.org/10.1029/2019GL083315>

Linhoss, A. C., Kiker, G., Shirley, M., et Frank, K. (2014). Sea-Level Rise, Inundation, and Marsh Migration: Simulating Impacts on Developed Lands and Environmental Systems. *Journal of Coastal Research*, 31(1), 36–46. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00215.1>

Nicholls, R. J., S. Hanson, C. Herweijer, N. Patmore, S. Hallegatte, J. Corfee-Morlot, J. Chateau et R. Muir-Wood. (2008). Ranking port cities with high exposure and vulnerability to climate extremes: Exposure estimates. *OECD Environment Working Papers*, No. 1, OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/011766488208>

Oppenheimer, M., B.C. Glavovic, J. Hinkel, R. van de Wal, A.K. Magnan, A. Abd-Elgawad, R. Cai, M. Cifuentes-Jara, R.M. DeConto, T. Ghosh, J. Hay, F. Isla, B. Marzeion, B. Meyssignac, et Z. Sebesvari. (2019). Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.

Peltier, W.R., Argus, D.F. et Drummond, R., 2015. Space geodesy constrains ice age terminal deglaciation: The global ICE-6G_C(VM5a) model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120, 450-487, doi 10.1002/2014JB011176.

Quintin, C. (2010). *Effets des facteurs environnementaux dans l'évolution des marais intertidaux du barachois de la rivière Nouvelle, baie des Chaleurs, Québec*. [Mémoire de maîtrise]. Université du Québec à Rimouski.

Rezaie, A. M., Loerzel, J., et Ferreira, C. M. (2020). Valuing natural habitats for enhancing coastal resilience: Wetlands reduce property damage from storm surge and sea level rise. *PLOS ONE*, 15(1), 1–17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226275>

Robin, C.M.I., Craymer, M., Ferland, R., James, T.S., Lapelle, E., Piras zews ki, M., et Zhao, Y., 2020. NA D83v 70VG : *A new national crustal velocity model for Canada*; Geomatics Canada, Open File 0062, zip file : <https://doi.org/10.4095/327592>

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (2017). *Facts and figures on marine biodiversity*. UNESCO. <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/ioc-oceans/focus-areas/rio-20-ocean/blueprint-for-the-future-we-want/marine-biodiversity/facts-and-figures-on-marine-biodiversity/>

Warren Pinnacle Consulting Inc. (2014). *Application of Sea-Level Affecting Marshes Model (SLAMM) to Long Island, NY and New York City* (Final Report No. 14–29).

Yang, X. (Ed.). (2009). Remote Sensing and Geospatial Technologies for Coastal Ecosystem. In W. Cartwright, G. Gartner, L. Meng, & M. Peterson (Eds.), *Remote Sensing and Geospatial Technologies for Coastal Ecosystem Assessment and Management* (978-3-540-88182-7 ; 1st ed., pp. 1–14). Springer, Tallahassee.

7. Annexes

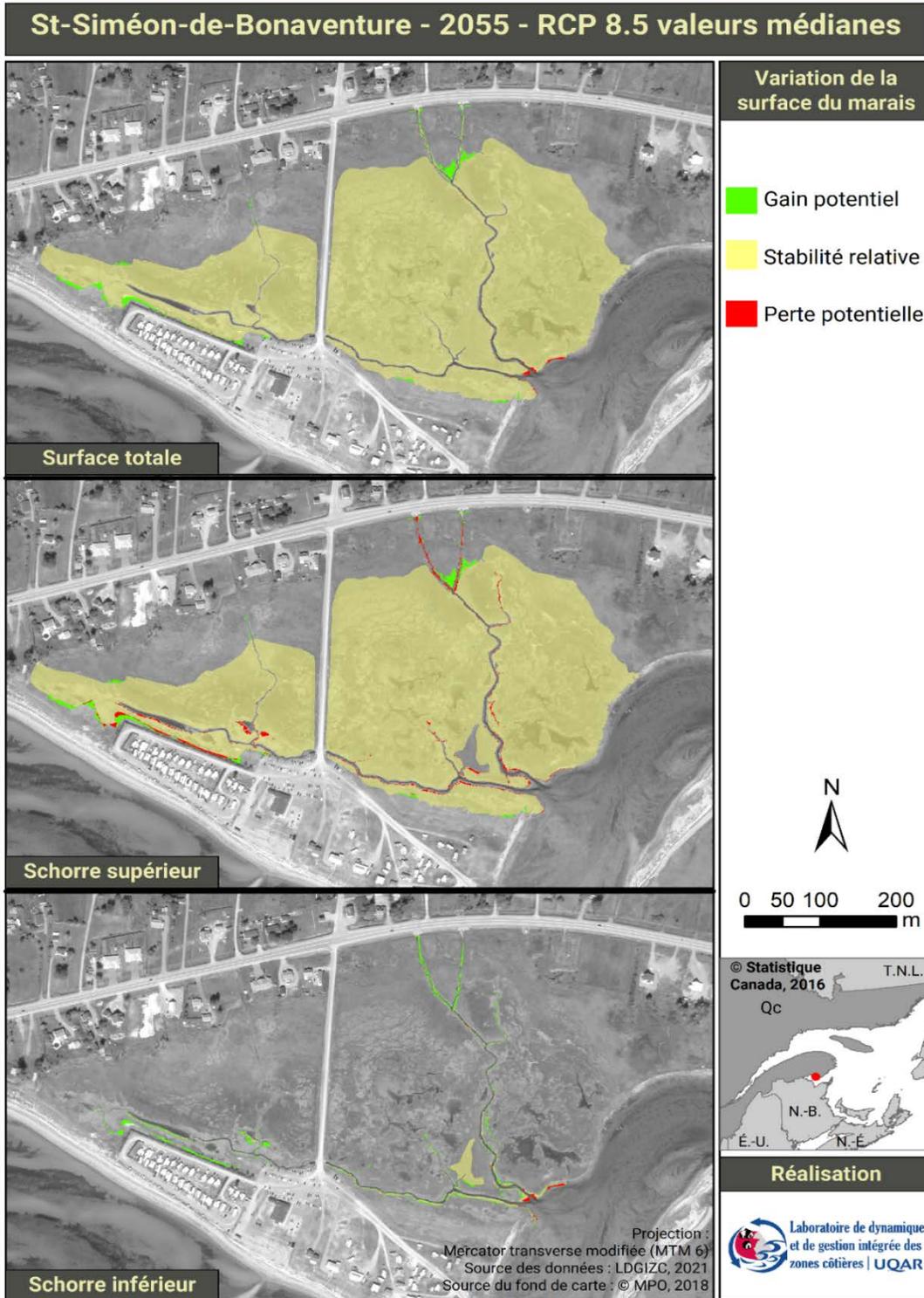
Annexe 1 : Tableau des intrants utilisées dans les modélisations SLAMM

Site d'étude	IDLM	Kamouraska	Montmagny	Nouvelle (Estuaire)	Nouvelle (Flèche)	Penouille	Rimouski	SAB	Saint-Siméon
NWI Photo Date (YYYY)	2019	2018	2018	2018	2018	2016	2009	2018	2018
DEM Date (YYYY)	2019	2009	2009	2016	2016	2017	2015	2016	2016
Direction Offshore [n,s,e,w]									
Historic Trend (mm/yr)	4,3	0	-0,2	4,06	4,06	4,2	0,3	-0,3	4,06
Historic Eustatic Trend (mm/yr)	4,3	0	-0,2	4,06	4,06	4,2	0,3	-0,3	4,06
MTL-NAVD88 (m)	0	0,3	0,512	0,181	0,181	0	0	0,512	0,181
GT Great Diurnal Tide Range (m) (MHHW-MLLW)	0,6	4,2	4,8	1,8	1,8	1,1	3	4,9	1,624
Salt Elev. (m above MTL)	0,3	2,5	3,02	1,01	1,01	0,8	2,36	3,02	1,01
Marsh Erosion (horz. m /yr)		-1,0589						1	0,31
Marsh Erosion Fetch (km)									
Swamp Erosion (horz. m /yr)									
T.Flat Erosion (horz. m /yr)									
Reg.-Flood Marsh Accr (mm/yr)	1		3	7,05	3,7	1,05	1,6	3,5	0,95
Irreg.-Flood Marsh Accr (mm/yr)	1	2,3	2,5	7,05	3,1	0,93	1,6	2,5	0,95

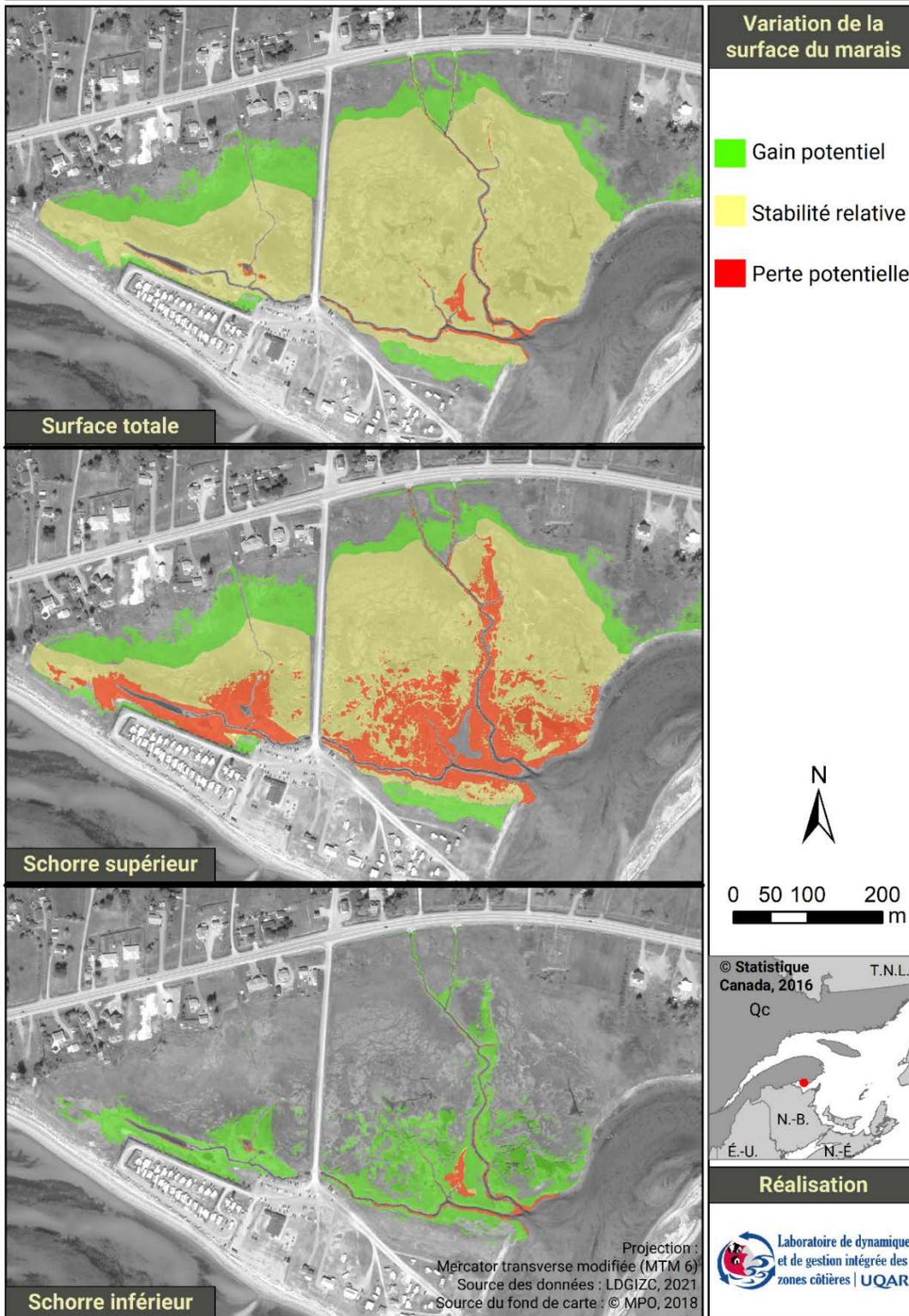
Modélisation de l'effet de la hausse du niveau de la mer sur les marais maritimes

Tidal-Fresh Marsh Accr (mm/yr)									
Inland-Fresh Marsh Accr (mm/yr)									
Mangrove Accr (mm/yr)									
Tidal Swamp Accr (mm/yr)									
Swamp Accretion (mm/yr)									
Beach Sed. Rate (mm/yr)									
Irreg-Flood Collapse (m)									
Reg-Flood Collapse (m)									
Use Wave Erosion Model [True,False]									
Use Elev Pre-processor [True,False]									
H1 inundation (m above MTL)	0,8		3,02	0,916	0,916	1,2	2,36	3,02	0,916
H2 inundation (m above MTL; H2>H1)	0,88		3,16	1,116	1,116	1,28	2,45	3,16	1,116
H3 inundation (m above MTL: H3>H2)	0,94		3,28	1,226	1,226	1,31	2,49	3,28	1,226
H4 inundation (m above MTL ; H4>H3)			4,4838	2,44	2,44	1,6928	2,87	4,4838	2,44
H5 inundation (m above MTL ; H5>H4)			4,979	2,96	2,96	1,9811	3,15	4,979	2,96

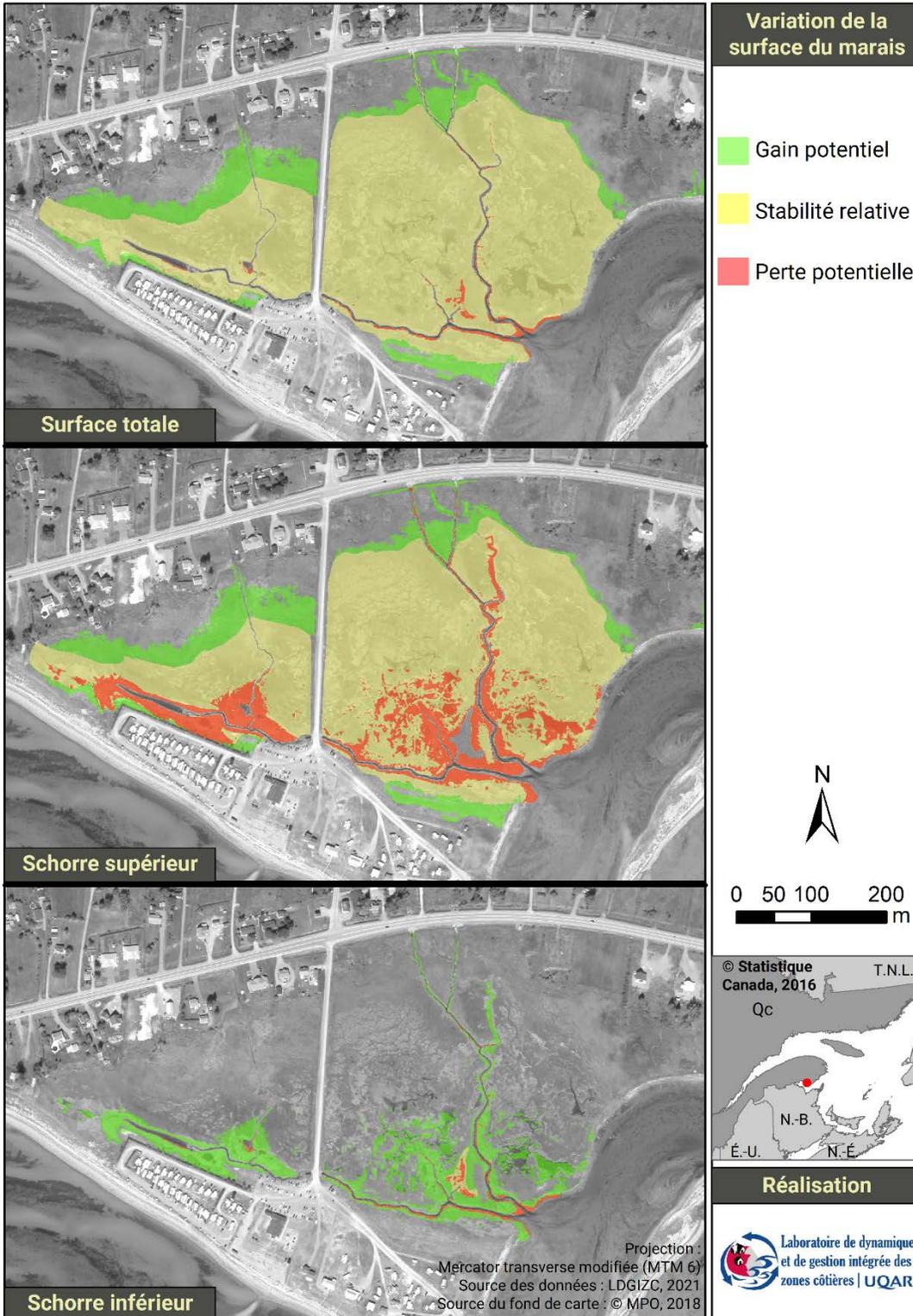
Annexe 2 : Cartes d'évolution de la surface du marais de St-Siméon modélisé à l'aide du modèle NAD83v70VG selon les valeurs médianes et supérieures du scénario RCP 8.5 du GIEC et selon les horizons 2055 et 2100



St-Siméon-de-Bonaventure - 2100 - RCP 8.5 valeurs médianes



St-Siméon-de-Bonaventure - 2055 - RCP 8.5 valeurs supérieures



St-Siméon-de-Bonaventure - 2100 - RCP 8.5 valeurs supérieures

