

ÉVALUATION DES NIVEAUX D'EAU EXTRÊMES CAUSANT DES DOMMAGES DE SUBMERSION EN ZONE CÔTIÈRE AU QUÉBEC

**Rapport technique complémentaire à l'analyse coûts-avantages
d'options d'adaptation en zone côtière au Québec**



Ursule Boyer-Villemaire, Jean-Pierre Savard, Philippe Roy

ÉVALUATION DES NIVEAUX D'EAU EXTRÊMES CAUSANT DES DOMMAGES DE SUBMERSION EN ZONE CÔTIÈRE AU QUÉBEC

PROJET : ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES RÉPERCUSSIONS DES
CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET ANALYSE COÛTS-AVANTAGES DES OPTIONS
D'ADAPTATION EN ZONE CÔTIÈRE AU QUÉBEC

Directrice de projet : Manon Circé, Ouranos

Équipe de réalisation :

Ursule Boyer-Villemare, Ouranos
Jean-Pierre Savard, Ouranos
Philippe Roy, Ouranos

Principaux Collaborateurs :

David Didier, UQAR
Urs Neumeier, ISMER
Travis Logan, Ouranos

Mise en page: Beatriz Osorio, Ouranos

Numéro de projet : 540010-000

Citation suggérée :

Boyer-Villemare, U., Savard, J.-P. et Roy, P. (2016) Évaluation des niveaux d'eau extrêmes causant des dommages de submersion en zone côtière au Québec. Ouranos, Montréal. 30 p.

Avril 2016



REMERCIEMENTS

La présente étude a été réalisée avec le soutien de Ressources naturelles Canada et du Groupe de travail sur l'économie de la Plateforme d'adaptation. Elle a également bénéficié de l'appui financier du Fonds vert du Québec dans le cadre du Plan d'action 2013 - 2020 sur les changements climatiques.

Ce rapport technique a été rendu possible grâce à de nombreuses collaborations, dont notamment celle de David Didier, doctorant au Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières de l'UQAR, d'Urs Neumeier, professeur à l'Institut des Sciences de la Mer de l'UQAR et de Guillaume Tita (consultant indépendant en gestion de risque). Merci aussi à Denis Lefavre (Institut Maurice-Lamontagne), Serge Bourgeois (municipalité des Îles-de-la-Madeleine), Valérie Labrecque (MRC de Kamouraska), Alain Parent (conseiller municipal à St-André-de-Kamouraska), aux résidents des Îles-de-la-Madeleine et aux agriculteurs du rang de l'Éventail (Rivière-Ouelle) pour leur contribution généreuse sans laquelle ce projet n'aurait pas été possible.

Nous tenons à remercier l'ensemble des organisations ayant collaboré à l'étude, en particulier les municipalités de Maria, Carleton-sur-Mer, des Îles-de-la-Madeleine et la MRC de Kamouraska. Les principaux collaborateurs sont identifiés dans les rapports d'étude de cas cités dans l'introduction.



TABLE DE MATIÈRES

1. INTRODUCTION.....	1
2. MÉTHODOLOGIE.....	6
2.1 La submersion : Conditions actuelles.....	10
2.1.1 La récurrences de niveaux d'eau marégraphiques extrêmes	10
2.1.2 La récurrences de vagues extrêmes	14
2.1.3 La récurrences de jet de rive	24
2.2 Coréurrences des vagues niveaux d'eau pour le présent.....	32
2.2.1 L'hypothèse des paramètres partiellement dépendants	33
2.2.2 Les coréurrences vagues-niveaux d'eau pour le présent : construction d'un facteur de correction des niveaux d'eau.....	35
2.3. Les récurrences de submersion en conditions futures	55
2.3.1 La hausse du niveau marin	55
2.3.2 Le mouvement isostatique.....	56
2.3.3 L'adoucissement hivernal.....	58
2.3.4 Synthèse : La correction des récurrences de niveau d'eau pour le futur (sans jet de rive)	60
3. RÉSULTATS : NIVEAUX DE SUBMERSION	63
3.1 Tableaux de niveaux de submersion.....	63
3.1.1 Maria et Carleton	64
3.1.2 Îles-de-la-Madeleine	65
3.1.3 Rivière-Ouelle	67
3.2 Cartographie de la submersion	68

3.2.1 La Grave (Îles-de-la-Madeleine).....	68
3.2.2 Rivière-Ouelle	81
4. DISCUSSION	85
4.1 Contributions principales	85
4.2 Incertitudes principales	86
4.3 Différences méthodologiques.....	88
4.3.1 Méthode de calcul des récurrences.....	88
4.3.2 Calcul du jet de rive	89
5. CONCLUSION	92
6. RÉFÉRENCES.....	94



LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Références des rapports d'analyse coûts-avantages réalisés au Québec	5
Tableau 2 – Sources des données spécifiques selon le site d'étude	7
Tableau 3 – Sources des données communes à tous les sites d'étude	8
Tableau 4 – Corrections géodésiques selon le site d'étude	11
Tableau 5 – Récurrence de niveaux d'eau marégraphique selon le site d'étude.....	14
Tableau 6 – Récurrences de la hauteur significative des vagues (Hs) (m) selon le site d'étude	24
Tableau 7 – Récurrences des caractéristiques de vagues et du jet de rive, et ratio jet de rive:hauteur de vagues (R:Hs) pour le secteur à l'est du IGA (Maria).....	26
Tableau 8 – Estimation du rapport R:Hs et du jet de rive pour la zone à l'ouest du IGA (Maria) à partir des événements de submersion de décembre 2005 et 2010, d'après les données de Didier et al., 2014	28
Tableau 9 – Récurrence de jet de rive (R) estimé pour le secteur à l'ouest du IGA (Maria).....	29
Tableau 10 – Récurrence des caractéristiques de vagues et du jet de rive pour La Grave et Grande-Entrée.....	31
Tableau 11 – Récurrences des vagues (Hs, Ts, Ls) et du jet de rive (R:Hs = 15,5%) pour La Grave et Grande-Entrée	32
Tableau 12 – Seuils d'extrêmes de niveaux d'eau et de hauteur de vagues selon le site d'étude	36
Tableau 13 – Dénombrement des événements extrêmes uniques selon le site d'étude	37
Tableau 14 – Caractéristiques des vagues des événements dommageables décrits par Tita (2015) aux Îles-de-la-Madeleine depuis les années 2000	40
Tableau 15 – Hypothèse sur l'orientation (origine) des vagues dommageables selon le site d'étude.....	40
Tableau 16 – Hypothèse concernant la durée annuelle de conditions englacées selon le site d'étude	41
Tableau 17 – Caractéristiques des événements historiques dans le Kamouraska.....	53

Tableau 18 – Synthèse de la calibration du facteur combinatoire ou de correction géodésique selon le site d'étude	54
Tableau 19 – Comparaison de l'effet du facteur de correction combinatoire selon les sites d'étude en se base sur l'événement de décembre 2010.....	55
Tableau 20 – Variation nette du niveau marin mondial en 2011, 2030 et 2055	56
Tableau 21 – Valeurs d'ajustement isostatique selon le site d'étude	57
Tableau 22 – Valeurs nettes de variation du niveau marin relation selon le site d'étude	58
Tableau 23 – Niveaux dommageables de submersion future selon l'hypothèse des paramètres partiellement dépendants pour le secteur à l'est du IGA à Maria et pour Carleton	64
Tableau 24 – Niveaux dommageables de submersion future selon l'hypothèse des paramètres partiellement dépendants pour le secteur à l'ouest du IGA à Maria	64
Tableau 25 – Niveaux dommageables de submersion futurs selon l'hypothèse des paramètres partiellement dépendants pour le secteur de La Grave	65
Tableau 26 – Niveaux dommageables de submersion futurs selon l'hypothèse des paramètres partiellement dépendants pour le secteur de Grande-Entrée.....	66
Tableau 27 – Niveaux dommageables de submersion futurs pour le secteur de Grande-Entrée	67
Tableau 28 - Résumé des principales différences méthodologiques	88
Tableau 29 – Résumé des hypothèses relatives aux niveaux dommageables de submersion	93



LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Composantes des niveaux d'eau extrêmes	2
Figure 2 – Localisation des sites d'études avec et sans évaluation des niveaux dommageables de submersion	4
Figure 3 – Organigramme méthodologique général d'estimation des niveaux dommageables de submersion	9
Figure 4 – Maxima annuels de niveaux d'eau et diagrammes de Gumbel correspondant pour A. Carleton et Maria (Carleton), B. La Grave (Cap-aux-Meules), C. Grande-Entrée, D. Rivière-Ouelle (Pointe-aux-Orignaux)	13
Figure 5 – Localisation de la station de calcul des vagues pour Maria et Carleton	15
Figure 6 – Localisation de la station de calcul des vagues pour les Îles-de-la-Madeleine.....	16
Figure 7 – Indice d'impact cumulé de la glace dans cinq régions du Québec (mauve : Îles-de-la-Madeleine)	17
Figure 8 – Submersion à St-André-de-Kamouraska en décembre 2010	19
Figure 9 – Illustration des paramètres d'échelle, de forme et de l'effet de la taille de l'échantillon des données de vagues à Maria	20
Figure 10 – Paramètres de la méthode de dépassement de seuil et d'ajustement des résidus à la distribution de Pareto généralisée pour Maria	21
Figure 11 – Maxima annuels de vagues et diagrammes de Gumbel au large du récif de la Perle (Îles-de-la-Madeleine) pour pour A. les vagues du modèle GENEREUX et B. celles d'Environnement Canada.....	23
Figure 12 – Meilleure estimation visuelle du jet de rive, basé sur la zone de submersion en 2010 (bleu clair) et les données altimétriques LIDAR (bleu foncé) pour le secteur ouest de Maria (triangle noir)	28

Figure 13 – Comparaison d'épisodes de tempêtes côtières dans la Baie des Chaleurs d'après la somme du niveau marégraphique et de la hauteur significative des vagues	34
Figure 14 – Histogrammes de niveau d'eau à Carleton et de vague aux caps de Maria.....	36
Figure 15 – Distribution de l'orientation des vagues extrêmes horaires pour A. Maria (n = 85; seuil de 1,00 m) et B. Îles-de-la-Madeleine (n = 1681; seuil de 3,56 m).....	38
Figure 16 – Modélisation de la hauteur et l'orientation des vagues provenant du nord-nord-est à l'est des Îles-de-la-Madeleine.....	39
Figure 17 – Distribution mensuelle des événements extrêmes de niveaux d'eau A. Carleton et Maria, B. La Grave (Cap-aux-Meules), C. Grande-Entrée, D. Rivière-Ouelle (Pointe-aux-Orignaux)...	42
Figure 18 – Diagrammes de Venn selon deux méthodes différentes pour Maria	45
Figure 19 – Facteur de correction de la probabilité selon le niveau d'eau marégraphique pour Maria	46
Figure 20 – Comparaison des récurrences brutes et corrigées pour Maria et Carleton	47
Figure 21 – Diagramme de Venn pour la Grave.....	48
Figure 22 – Comparaison des récurrences brutes et corrigées pour La Grave, Îles-de-la-Madeleine	49
Figure 23 – Diagramme de Venn pour Grande-Entrée	50
Figure 24 – Diagramme de Venn pour Rivière-Ouelle	51
Figure 25 – Traces d'un niveau d'eau extrême le 29 octobre 2015 au site de la « pêche à l'anguille » à Rivière-Ouelle	52
Figure 26 – Comparaison des récurrences brutes et corrigées pour Rivière-Ouelle.....	53
Figure 27 – Scénarios d'augmentation du niveau marin relatif global en comparaison avec le niveau de 1985-2005, d'après la médiane et les intervalles de confiance 66-100%	56
Figure 28 – Facteur de probabilité corrigée en fonction du niveau d'eau géodésique pour 2005, 2030 et 2055	59
Figure 29 – Niveaux d'eau marégraphiques (par rapport au zéro géodésique) obtenus en se basant sur l'hypothèse des paramètres partiellement dépendants (modifié de Didier et al., 2014) pour Maria.	60
Figure 30 – Niveaux d'eau marégraphiques (par rapport au zéro géodésique) obtenus en se basant sur l'hypothèse des paramètres partiellement dépendants et en incluant le niveau marin relatif anticipé – La Grave	61
Figure 31 – Niveaux d'eau marégraphiques (par rapport au zéro géodésique) obtenus en se basant sur l'hypothèse des paramètres partiellement dépendants et en incluant le niveau marin relatif anticipé – Grande-Entrée	61
Figure 32 – Niveaux d'eau marégraphiques (par rapport au zéro géodésique) avec correction géodésique constante et en incluant le niveau marin relatif anticipé – Rivière-Ouelle	62
Figure 33 – Étendue de la submersion 1:2 ans dans l'actuel à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)	69
Figure 34 – Étendue de la submersion 1:20 ans dans l'actuel à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)	70
Figure 35 – Étendue de la submersion 1:100 ans dans l'actuel à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)	71

Figure 36 – Étendue de la submersion 1:2 ans en 2030 à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)	72
Figure 37 – Étendue de la submersion 1:20 ans en 2030 à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)	73
Figure 38 – Étendue de la submersion 1:100 ans en 2030 à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)	74
Figure 39 – Étendue de la submersion 1:2 ans en 2055 à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)	75
Figure 40 – Étendue de la submersion 1:20 ans en 2055 à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)	76
Figure 41 – Étendue de la submersion 1:100 ans en 2055 à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)	77
Figure 42 – Étendue de la submersion de l'épisode du 21 décembre 2010 (modélisé) à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)	78
Figure 43 – Étendue de la submersion de l'épisode du 21 décembre 2010 projeté en 2030 à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)	79
Figure 44 – Étendue de la submersion de l'épisode du 21 décembre 2010 projeté en 2055 à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)	80
Figure 45 – Étendue de la submersion à Rivière-Ouelle pour les conditions actuelles	82
Figure 46 – Étendue de la submersion à Rivière-Ouelle pour les conditions de 2030	83
Figure 47 – Étendue de la submersion à Rivière-Ouelle pour les conditions de 2055	84
Figure 48 – Submersion à La Grave le 29 octobre 2000	91



LISTE DES ANNEXES

- ANNEXE A** Organigramme méthodologique pour chaque site d'étude
- ANNEXE B** Corrélation entre les niveaux d'eau extrêmes et les vagues correspondantes aux Îles-de-la-Madeleine (1979-2012)
- ANNEXE C** Variations isostiques



1. INTRODUCTION

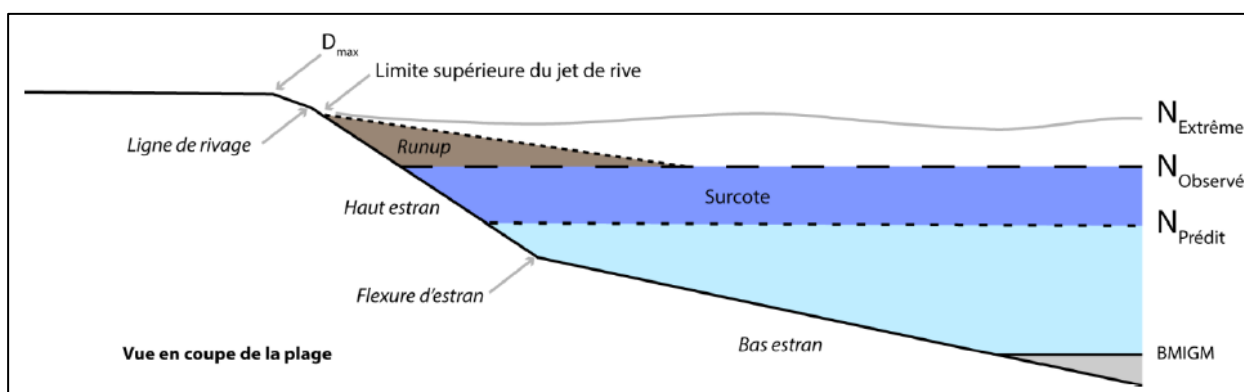
Peu d'études ont porté jusqu'à maintenant sur l'évaluation économique des impacts des changements climatiques et des options d'adaptation en zone côtière dans l'Est-du-Québec. Une vaste étude régionale a ainsi été lancée par Ressources naturelles Canada avec pour objectifs d'évaluer les impacts économiques de l'érosion due aux changements climatiques (CC) sur l'ensemble du Québec maritime, ainsi que d'analyser les coûts et les avantages de différentes options d'adaptation à l'érosion et à la submersion côtières au Québec et dans les provinces atlantiques afin d'en tirer des enseignements communs.

Les analyses coûts avantages (ACA) dans la zone côtière québécoise ont été réalisées par Ouranos avec comme partenaire de recherche principal, le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR). Au total, 25 segments de côte ont été étudiés, soit 16 segments dans trois municipalités en Gaspésie (Percé, Maria et Carleton-sur-Mer), 8 segments aux Iles-de-la-Madeleine et un segment dans le Bas-Saint-Laurent, soit au sud de l'embouchure de la Rivière-Ouelle.

Le présent rapport fait donc partie d'un projet de recherche plus large qui a bénéficié du soutien de Ressources naturelles Canada et du Groupe de travail sur l'économie de la Plateforme d'adaptation, ainsi que du Fonds vert du Gouvernement du Québec dans le cadre du Plan d'action 2013 - 2020 sur les changements climatiques.

Dans le cadre de ce projet, il y avait un besoin de calculer des dommages sur l'environnement bâti proportionnels aux hauteurs d'eau dans le présent et lors de deux horizons futurs (2030 et 2055).

La méthode traditionnelle d'évaluation de la submersion est basée sur l'addition du niveau marin moyen ou extrême à la variation anticipée du niveau marin global provenant d'une source consensuelle comme le rapport du GIEC (e.g. Solomon et al., 2007; Stocker, 2013), croisé avec des données topographiques ou un modèle numérique d'élévation (Rao et al., 2008; Nicholls et al., 1999). Toutefois, ces estimations grossières sont insuffisantes pour estimer les dommages de submersion puisque les études récentes ont montré que les niveaux atteints où il y avait réellement des dommages aux infrastructures sont supérieurs en raison de l'effet du **jet de rive** (ou *runup* - R) (Didier et al., 2015; Guimarães et al., 2015). Le jet de rive est un phénomène de courant montant sur la côte après le point de déferlement des vagues, dont la hauteur dépend de la hauteur significative des vagues, leur période et l'inclinaison de la plage sur laquelle celles-ci déferlent. Il est à noter que le terme de jet de rive est utilisé de manière inclusive et équivalente au *wave setup* et au *wash*. En résumé, tel qu'illustré à la figure 1, les niveaux d'eau extrêmes causant des dommages (ou **niveaux dommageables de submersion**) contiennent 4 principales composantes : 1) un niveau géodésique de référence, qui constitue les basses mers maximales (BMIGM), 2) un niveau de marée astronomique prédit ($N_{\text{prédit}}$), 3) un niveau d'eau observé ($N_{\text{observé}}$), et 3) un niveau extrême qui survient à la limite supérieure du jet de rive ($N_{\text{extrême}}$).



Source : Didier et al., 2014

Figure 1 – Composantes des niveaux d'eau extrêmes

La **surcote** provient quant à elle d'un dépassement anormal du niveau de la marée haute, induit par des conditions météorologiques inhabituelles, comme une dépression atmosphérique, une tempête, un ouragan, dont les effets se combinent à ceux des marées astronomiques (la portion induite par la lune et le soleil). La **submersion** survient lorsque la limite supérieure du jet de rive dépasse le niveau supérieur du trait de la ligne de rivage ou de la structure de protection ($D_{\max}$) (Didier et al., 2014). Le phénomène de jet de rive, qui dépend des vagues, est donc important dans la prédiction de la submersion. En somme, le niveau marégraphique à lui seul est insuffisant pour prédire la hauteur jusqu'à laquelle des dommages se produiront (Didier et al., 2015) : considérer seulement la récurrence de niveau d'eau additionné de la remontée du marin mondial entraîne une importante sous-estimation des dommages anticipés.

L'objectif général était donc de développer des récurrences de hauteurs dommageables de submersion, qui tiennent compte des niveaux marins et du jet de rive, pour la période historique, de même que pour les horizons temporels de 2030 et 2055. Ces projections permettront de calculer des dommages sur l'environnement bâti à l'aide de courbe de dommages en fonction des hauteurs d'eau provenant de la littérature (voir les rapports d'ACA cités au tableau 1 ci-dessous).

L'équipe de recherche a développé ces récurrences pour les quatre sites à l'étude soumis à la submersion : Maria, Carleton-sur-Mer, Îles-de-la-Madeleine et Kamouraska (Figure 2). La démarche s'appuie sur la méthode de Didier et al. (2014) pour le secteur est de Maria, qui doit lui-même une partie des analyses aux auteurs du présent rapport.

Ce rapport vise à exposer la méthodologie, étape par étape, et les hypothèses utilisées pour évaluer les niveaux dommageables de submersion dans ces sites. La méthodologie et les principales hypothèses concernant la submersion sont présentées, en trois parties : 1) le calcul de la submersion en conditions actuelles, 2) les coréurrences vagues-niveaux d'eau pour le présent et 3) les récurrences de submersion pour le futur, c'est-à-dire incluant la hausse du niveau marin et le mouvement isostatique. Une section de résultats présente les récurrences de submersion pour le présent et le futur pour chaque site. Enfin, certaines limites et incertitudes sont discutées avant de conclure.

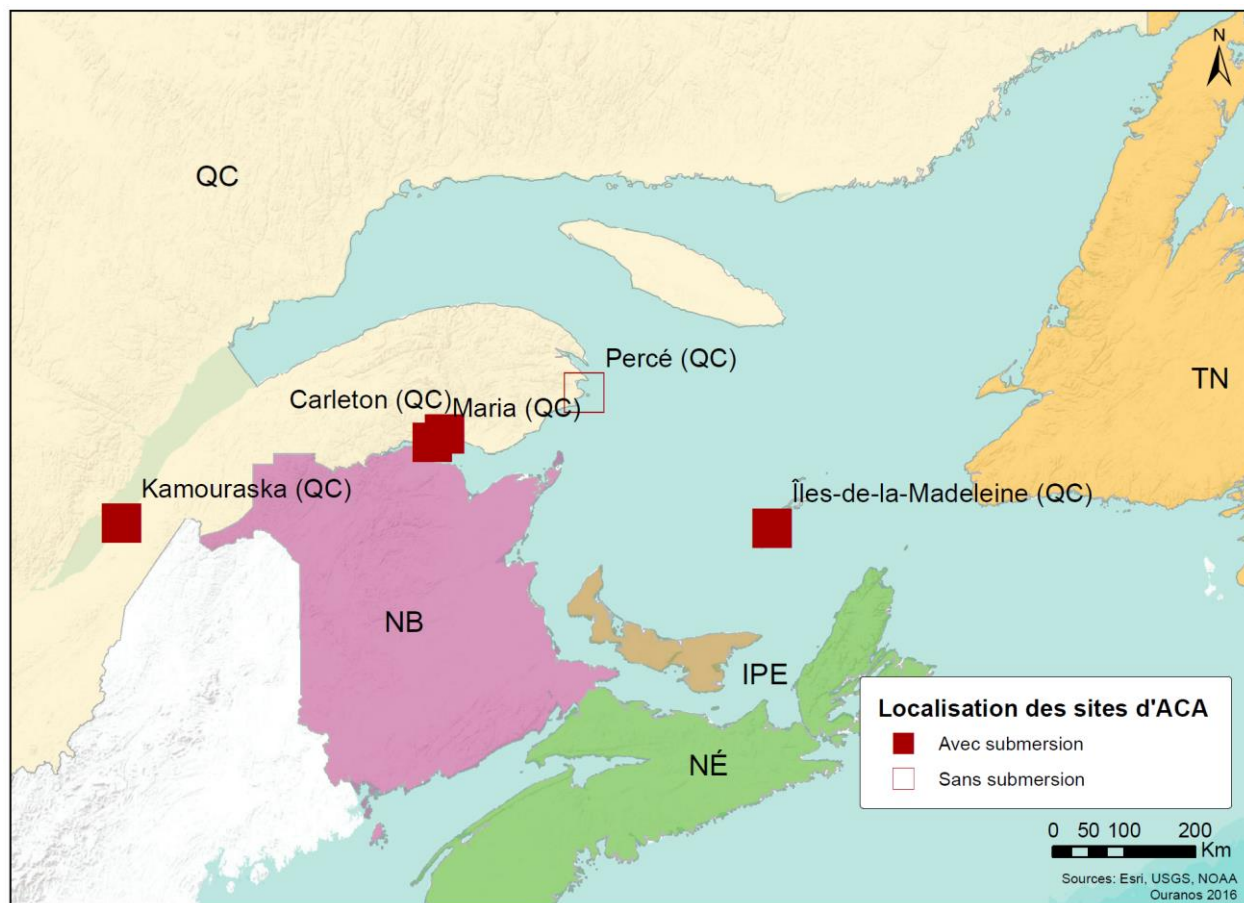


Figure 2 – Localisation des sites d'études avec et sans évaluation des niveaux dommageables de submersion

Ce rapport constitue donc un complément aux quatre rapports des sites d'ACA où la submersion a été considérée, qui sont disponibles sur le site internet d'Ouranos (Tableau 1).

Tableau 1 – Références des rapports d'analyse coûts-avantages réalisés au Québec

Site d'étude	Référence des rapports
Percé	Circé, M., Da Silva, L., Mercier, X., Boyer-Villemare, U., Desjarlais, C., Morneau, F. (2015) Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière à Percé. Ouranos, Montréal. 155 p. + annexes (rapport aussi disponible en anglais)
Maria	Circé, M., Da Silva, L., Mercier, X., Boyer-Villemare, U., Desjarlais, C., Morneau F. (2016) Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière à Maria. Ouranos, Montréal. 168 p. + annexes (rapport aussi disponible en anglais)
Carleton-sur-Mer	Circé, M., Da Silva, L., Mercier, X., Duff, G., Boyer-Villemare, U., Corbeil, S., Desjarlais, C., Morneau F. (2016) Analyse coûts-avantages d'options d'adaptation en zone côtière à Carleton-sur-Mer. Ouranos : Montréal. 165 p. + annexes (résumé exécutif aussi disponible en anglais)
Îles-de-la-Madeleine	Circé, M., Da Silva, L., Duff, G., Boyer-Villemare, U., Corbeil, S., Desjarlais, C., Morneau F. (2016) Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière aux Îles-de-la-Madeleine. Ouranos : Montréal. 175 p + annexes (résumé exécutif aussi disponible en anglais)
Rivière-Ouelle	Circé, M., Da Silva, L., Duff, G., Boyer-Villemare, U., Desjarlais, C., Morneau, F. (2016) Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière à Rivière-Ouelle. Ouranos, Montréal. 65 p. + annexes (résumé exécutif aussi disponible en anglais)
Synthèse	Circé M., Boyer-Villemare, U., Da Silva, L., Desjarlais, C. et Morneau, F. (2016) Synthèse des analyses coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière au Québec. Ouranos, Montréal. 92 p. + annexes. (Rapport également disponible en anglais)



2. MÉTHODOLOGIE

La méthodologie générale pour la présente étude a été modifiée à partir du rapport de Didier et al. (2014) qui s'intéressait aux niveaux de dommages de submersion dans la municipalité de Maria. La démarche s'appuie sur quatre sources principales de données spécifiques à chaque site, décrites au tableau 2 : 1) vagues, 2) niveaux d'eau (de la marée), 3) hauteurs de submersion mesurées sur le terrain, 4) altitudes haute résolution. Plusieurs données sont communes à Maria et Carleton-sur-Mer étant donné leur proximité géographique. Elle s'appuie aussi sur deux sources de données communes à tous les sites décrits au tableau 3 : 1) variations anticipées du niveau marin mondial, 2) ajustement isostatique.

Pour continuer, la figure 3 présente un organigramme méthodologique général dont les différentes étapes seront décrites pas-à-pas :

1. Calcul des récurrences de niveaux d'eau marégraphique extrêmes (section 2.1.1)
2. Calcul des récurrences de vagues extrêmes (2.1.2)
3. Calcul des récurrences de jet de rive (2.1.3)
4. Calcul des corécurrences vagues-niveaux d'eau pour le présent (2.2)
5. Calcul des récurrences de submersion en conditions futures (2.3)

Les organigrammes spécifiques à chaque site sont présentés à l'annexe A.

Tableau 2 – Sources des données spécifiques selon le site d'étude

Variable	Données	Site(s)	Série	Source(s)
Maria et Carleton-sur-Mer				
1. Vagues	Vagues aux 3h issues du modèle WAM version PROMISE (Hs, Ts, direction)	Maria	2003-2013	Jacob 2003 (Environnement Canada)
2. Niveaux d'eau	Niveaux d'eau horaires modélisés	Carleton Belledune	1999-2011	Didier et al., 2014 (Xu et Lefavre 2015)
3. Hauteurs de submersion empiriques	Mesures DGPS de hauteurs de submersion lors de l'épisode 2010/12/06 ($z \pm 1$ cm)	Maria	2005/12/05 2010/12/06	Bernatchez, et al., 2008a Didier et al., 2015
4. Altitudes haute résolution	LIDAR terrestre 5cm x 5cm ($z \pm 3$ cm) LIDAR aéroporté 1m x 1m ($z \pm 20$ cm)	Maria	2011 2007	Didier et al., 2015 Fourni par LDGIZC-UQAR.
Îles-de-la-Madeleine				
1. Vagues	Vagues horaires issues du modèle GENEREUX utilisant les données horaires de vent MERRA à 10 m	Station au large du récif de la Perle (47.34667 / -61.52583)	1980-2012	Neumeier et al., 2013
2. Niveaux d'eau	Niveaux d'eau horaires modélisés	Cap-aux-Meules, Grande-Entrée	1979-2011	Xu et Lefavre, 2015
3. Hauteurs de submersion empiriques	Témoignages et mesures terrain de hauteur d'eau (z au cm)	La Grave, Grande-Entrée	2000-2010	Tita, 2015
4. Altitudes haute résolution	LIDAR aéroporté 1m x 1m ($z \pm 30$ cm)	La Grave Grande-Entrée	2010	Fourni par la municipalité des Îles-de-la-Madeleine
Rivière-Ouelle				
1. Vagues	Aucune donnée fiable trouvée pour l'estuaire moyen du Saint-Laurent			
2. Niveaux d'eau	Niveaux d'eau horaires modélisés	Pointe-aux-Orignaux	1979-2011	Xu et Lefavre, 2015
3. Hauteurs de submersion empiriques	Entrevue A. Parent Entrevue avec les agriculteurs du rang de l'Éventail Observations terrain novembre 2015	St-André de Kamouraska Rivière-Ouelle/La Pocatière	1830'-2010 1930'-2015	Circé et al., 2016a (rapport ACA Rivière-Ouelle, Ouranos)
4. Altitudes haute résolution	LIDAR aéroporté 20cm x 20cm ($z \pm 15$ cm en milieu dégagé)	Rivière-Ouelle/La Pocatière	2009	Fourni par la MRC de Kamouraska

Tableau 3 – Sources des données communes à tous les sites d'étude

Variable	Données	Région	Intervalle de la référence	Source(s)
1. Projections de niveau marin	Interpolation annuelle de la hausse prévue de niveau marin en 2015, 2035, 2055 pour le scénario RCP 8.5	Mondial	1995 [1986-2005]	Didier et al., 2014 d'après GIEC, 2013a
2. Variations isostatiques	Variation isostatique annuelle (mm/an)	Est du Canada	~ dernier siècle	Koohzare et al., 2008 James et al., 2014 Han et al., 2015

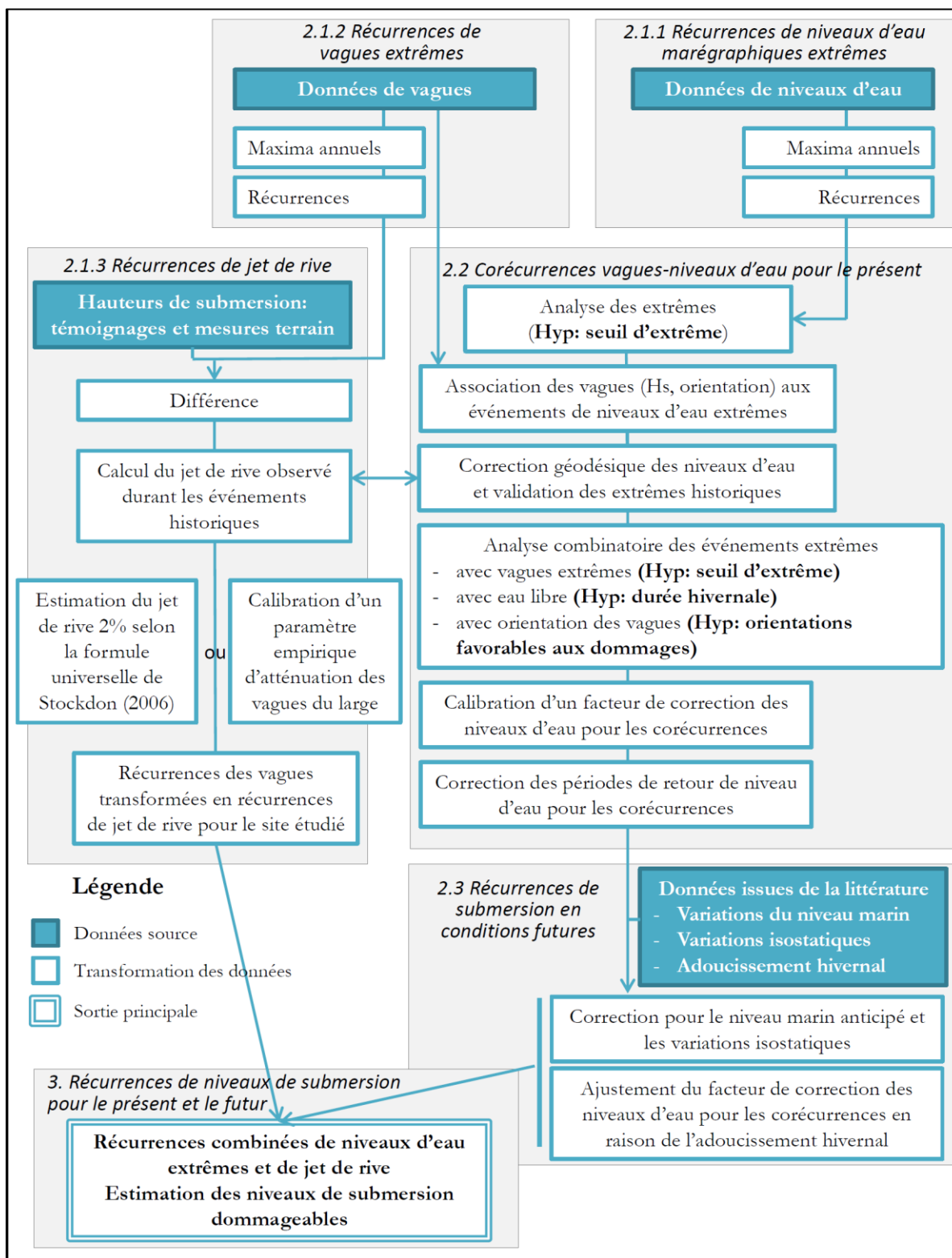


Figure 3 – Organigramme méthodologique général d'estimation des niveaux dommageables de submersion

2.1 La submersion : Conditions actuelles

2.1.1 Les récurrences de niveaux d'eau marégraphiques extrêmes

Les surcotes de tempête surviennent lorsqu'un système atmosphérique dépressionnaire gonfle le niveau d'eau et crée une différence entre le niveau observé et le niveau astronomique des marées (niveau prédit).

2.1.1.1 Origine des données

Pour les trois sites d'étude, les données de niveau d'eau marégraphique utilisées proviennent du modèle de Xu et Lefavre (2015), qui est calibré sur des séries d'observations marégraphique à des stations avoisinantes. Il s'agit donc de reconstitutions synthétiques continues de niveaux d'eau horaires et continues, respectivement à Carleton-sur-Mer, Cap-aux-Meules (pour La Grave), Grande-Entrée et Pointe-aux-Orignaux (pour Rivière-Ouelle).

Pour Carleton et Maria, Didier et al (2014). ont choisi le marégraphe de référence de Belledune, NB, à 36 km au sud-est de Maria. Les données couvrent la période de 1999/08/10 à 2011/12/31. Pour les Îles-de-la-Madeleine, le marégraphe de référence est celui du port de Cap-aux-Meules les séries couvrent la période de 1979/07/28 au 2011/12/31. Pour le site de Rivière-Ouelle, le marégraphe de référence est celui de Pointe-aux-Orignaux (courte série), calibré sur la longue série de St-Joseph de la Rive et couvre la même période qu'aux Îles-de-la-Madeleine.

2.1.1.2 Méthode de calcul des récurrences

Les récurrences historiques ont été calculées grâce à la théorie des valeurs extrêmes par la méthode de dépassement de seuil et un ajustement à la distribution de Pareto. Les probabilités historiques de niveaux d'eau géodésiques sont présentées au tableau 4.

Pour le site de Carleton et Maria, une méthode de dépassement de seuils suivie d'un ajustement des résidus à une distribution de Pareto généralisée a été utilisée (Coles, 2001). Pour les sites aux Îles-de-la-Madeleine et Rivière-Ouelle, les récurrences historiques ont plutôt été calculées grâce à la méthode graphique d'ajustement à la variable réduite de la distribution de Gumbel, basée sur les séries d'extrêmes annuels. La distribution de Weibull a aussi été calculée, mais dans tous les cas, celle de Gumbel donnait de meilleurs r^2 . La série de récurrences de Gumbel a aussi été calculée pour les niveaux d'eau de Carleton. Pour un traitement simple et rapide, le chiffrier provenant du Laboratoire d'écohydrologie ECHO de

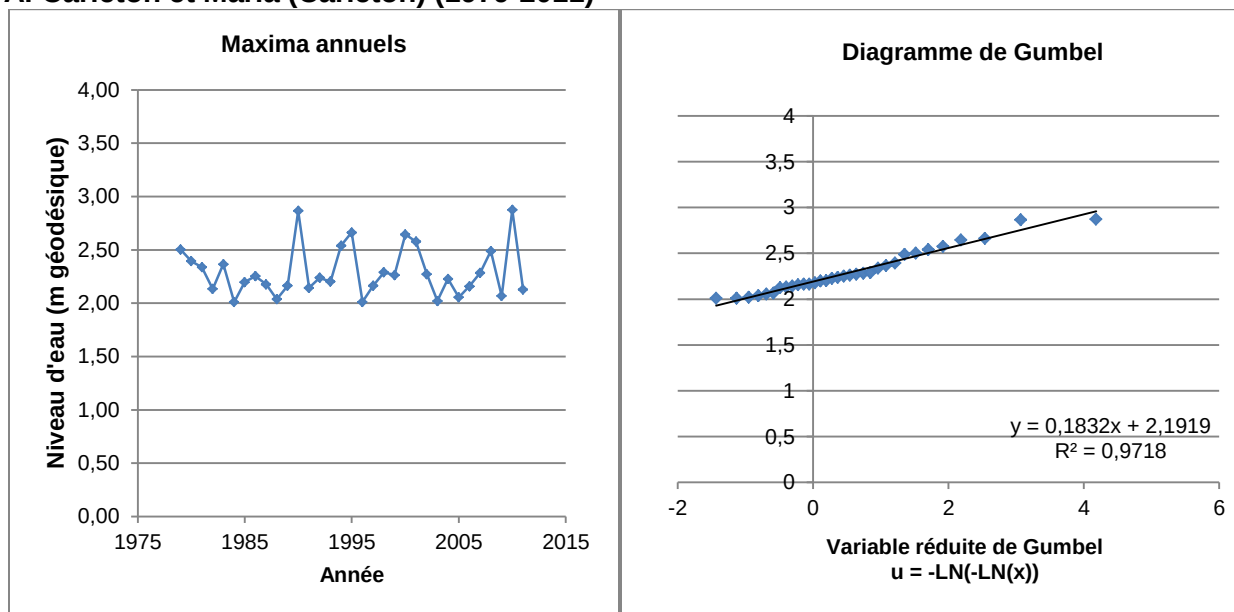
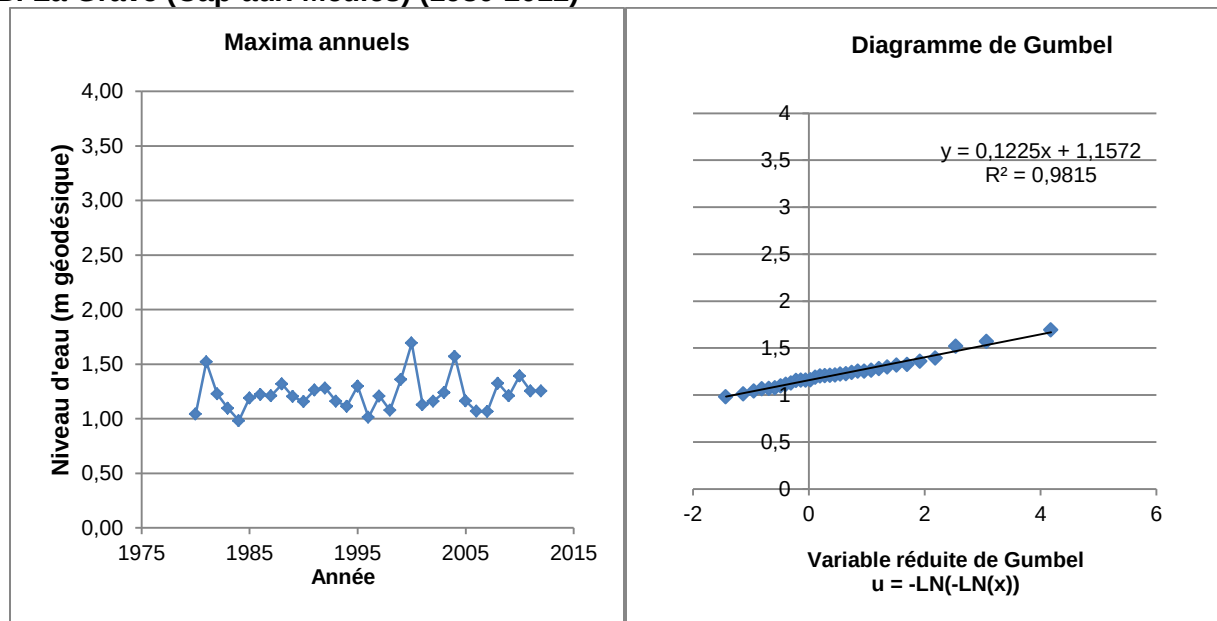
l'École polytechnique fédérale de Lausanne (2005) a été utilisé. La justification des choix différents et ses retombées sont discutées aux sections 4.2 et 4.3.

Pour faciliter la compréhension au long de ce rapport, les valeurs sont rapportées en valeurs géodésiques, dont les corrections pour chaque site sont issues du rapport de Xu et Lefavire (2015) (Tableau 4). Les séries de maxima annuels de niveaux d'eau et le diagramme de Gumbel correspondant sont présentées à la figure 4 (A à D).

Tableau 4 – Corrections géodésiques selon le site d'étude

Site d'étude	Corrections géodésiques à appliquer au niveau marégraphique (m géodésique)
Carleton	-1,18 m
La Grave	-0,65 m
Grande-Entrée	-0,65 m
Rivière-Ouelle (Pointe-aux-Orignaux)	-3,01 m

Source : Xu et Lefavire (2015)

A. Carleton et Maria (Carleton) (1979-2011)**B. La Grave (Cap-aux-Meules) (1980-2012)**

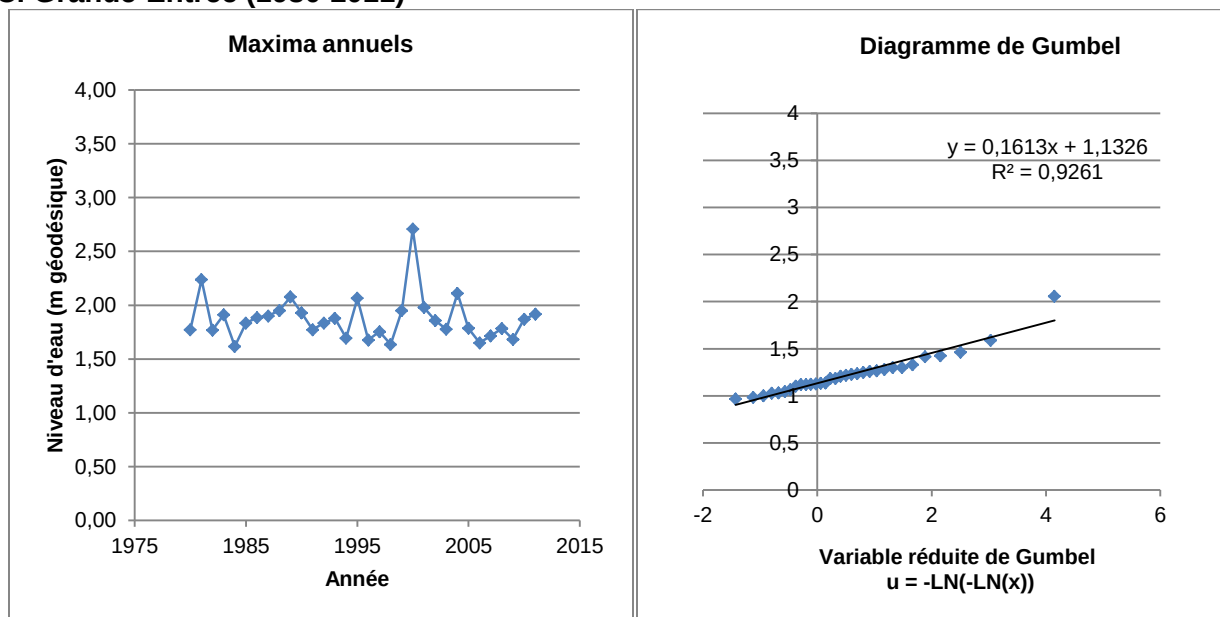
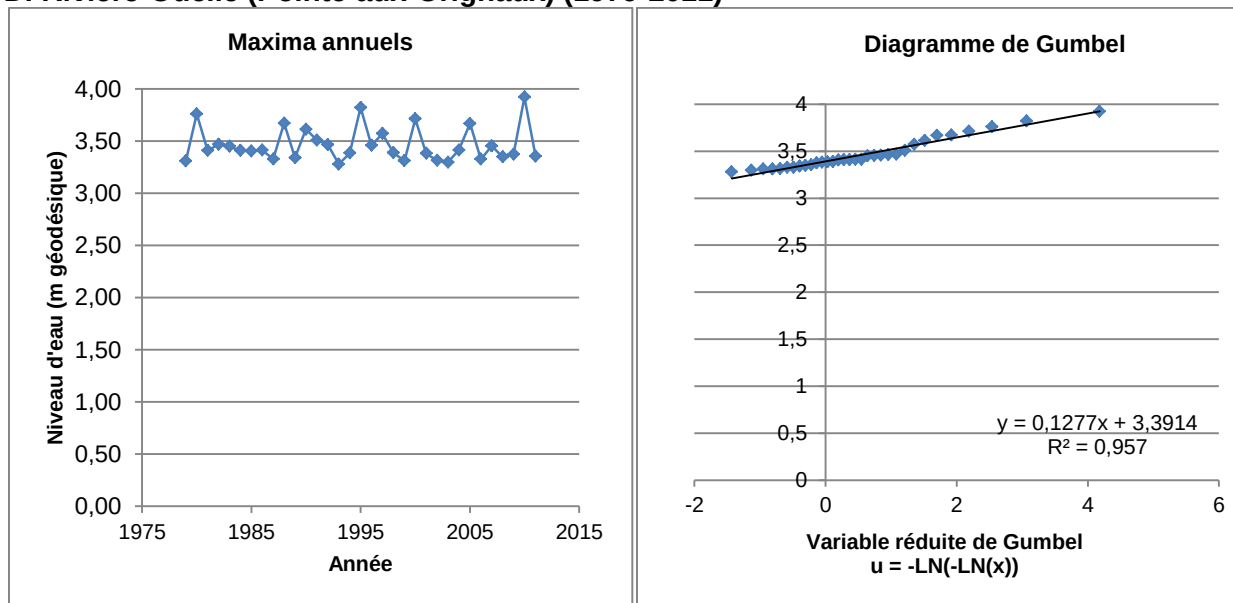
C. Grande-Entrée (1980-2011)**D. Rivière-Ouelle (Pointe-aux-Orignaux) (1979-2011)**

Figure 4 – Maxima annuels de niveaux d'eau et diagrammes de Gumbel correspondant pour A. Carleton et Maria (Carleton), B. La Grave (Cap-aux-Meules), C. Grande-Entrée, D. Rivière-Ouelle (Pointe-aux-Orignaux)

2.1.1.3 Résultats

Les récurrences historiques de niveaux d'eau géodésiques pour chacun des sites sont présentées au tableau 5.

Tableau 5 – Récurrence de niveaux d'eau marégraphique selon le site d'étude

Récurrence	Carleton et Maria (Carleton)	La Grave (Cap-aux-Meules)	Grande-Entrée	Rivière-Ouelle (Pointe-aux-Orignaux)
(ans)	(m géodésique)			
2	2,26	1,20	1,19	3,44
5	2,47	1,34	1,37	3,58
10	2,60	1,43	1,50	3,68
15	2,68	1,48	1,56	3,73
20	2,74	1,52	1,61	3,77
25	2,78	1,55	1,65	3,80
30	2,81	1,57	1,68	3,82
35	2,84	1,59	1,70	3,84
40	2,87	1,61	1,73	3,86
45	2,89	1,62	1,74	3,88
50	2,91	1,64	1,76	3,89
60	2,94	1,66	1,79	3,91
70	2,97	1,68	1,82	3,93
80	2,99	1,69	1,84	3,95
90	3,02	1,71	1,86	3,97
100	3,03	1,72	1,87	3,98
R² diagramme de Gumbel	0,97	0,98	0,93	0,96

2.1.2 La récurrence de vagues extrêmes

Les systèmes atmosphériques qui créent les surcotes sont souvent associés à de forts vents qui génèrent des vagues, qui déferleront et créeront un jet de rive sur la côte. Les niveaux totaux à la côte dépendent donc de la somme des niveaux de surcote et du jet de rive, qui dépend lui-même des conditions de vagues et de la morphologie de la côte.

2.1.2.1 Origine des données

Maria et Carleton

Pour Maria et Carleton, la série de données synthétiques de vagues provient du modèle de vagues d'Environnement Canada basé sur le modèle WAM cycle 4 v.MW3 « PROMISE », (Jacob et al., 2004), dont l'étendue est de 2003/01/01-2013/01/01 et la résolution est aux 3 heures, avec un hiatus pour l'année 2006 complète. Ce modèle utilise les vents du premier niveau du GEM d'Environnement Canada et tient compte des glaces depuis 2004. La station virtuelle sélectionnée est située dans la baie de Cascapédia au point de grille 48.140 N / -65.950 O (Figure 5). Lambert et al, 2013 ont démontré que ces données surévaluent les conditions de vagues dans le golfe du Saint-Laurent, mais ces données étaient les seules disponibles au moment de faire l'analyse.

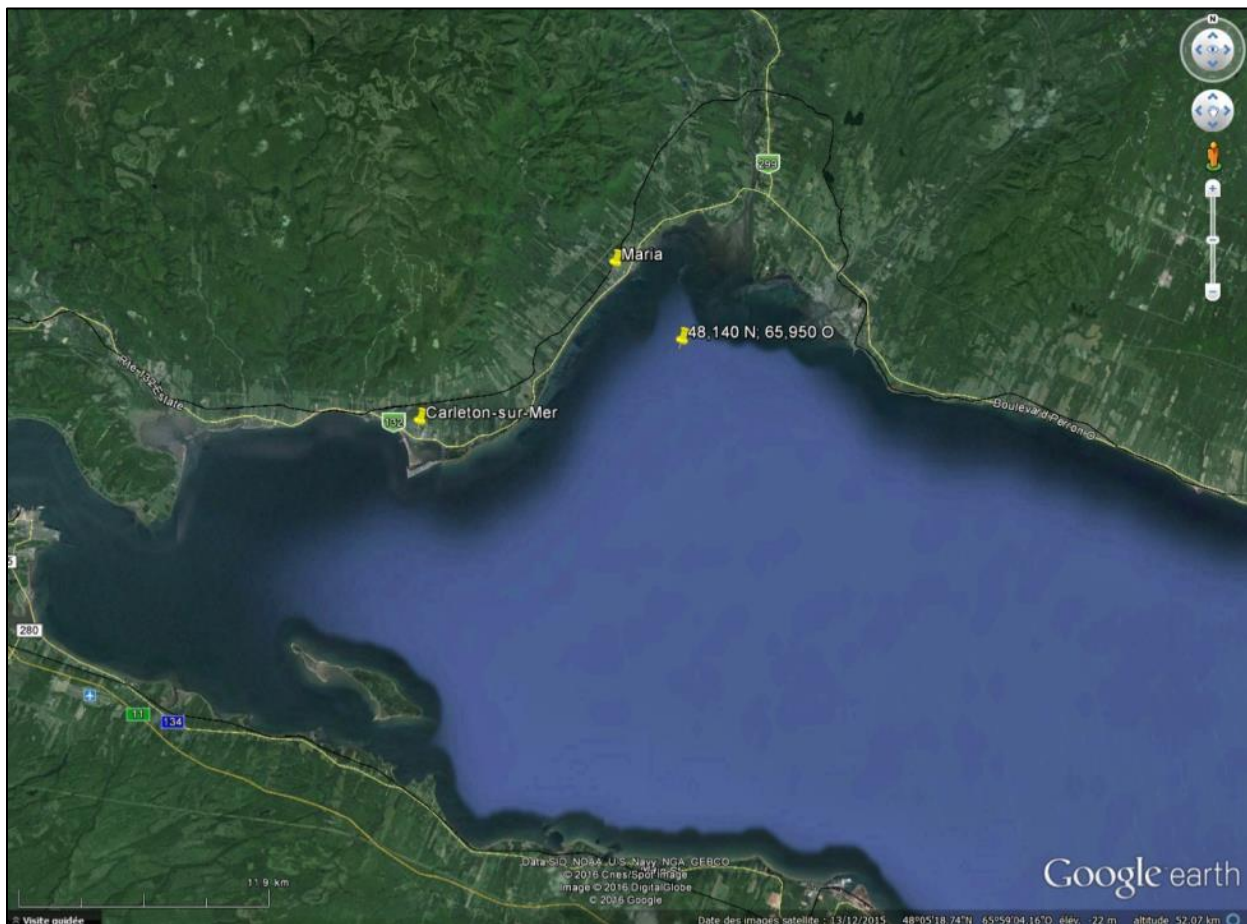


Figure 5 – Localisation de la station de calcul des vagues pour Maria et Carleton

Îles-de-la-Madeleine

Pour les Îles-de-la-Madeleine, les données de vagues au large proviennent d'une modélisation réalisée par l'Institut des Sciences de la mer de Rimouski, par U. Neumeier et al. (2013). Les données pour ce projet ont été calculées suivant la méthode de Ruest (2013, 2015). La donnée source de cette modélisation est une réanalyse climatique MERRA de vents horaires à 10 km de hauteur pour la période de 1980/01/24 10:00 à 2012/12/01 0:00 (n=287 871). Les données incluent un facteur de correction de 1,15 vitesses pour la surestimation comparativement aux données de vent observées grâce à des houlographes (Ruest et al., 2013). Neumeier et al. (2013) ont ensuite utilisé une version améliorée du modèle GENER (version GENEREUX) pour calculer les conditions de vagues au large. La station sélectionnée se situe au large de la baie de Plaisance, afin d'éviter l'effet du haut fonds du récif de la Perle (47,34667 N / 61,52583 O) (Figure 5). La formule du Coastal Engineering Manual 2003 (Resio et al., 2002) a été utilisée pour les calculs des hauteurs significatives et périodes de vagues. Aucune correction pour la présence de glace en hiver n'a été appliquée, mais le rapport de Neumeier et al. (2013) indiquent que les changements futurs reliés à l'atténuation par la glace seront nettement moins importants aux Îles-de-la-Madeleine que dans les autres régions du Québec : la transition vers des hivers sans glace serait déjà réalisée en grande partie (Figure 7).

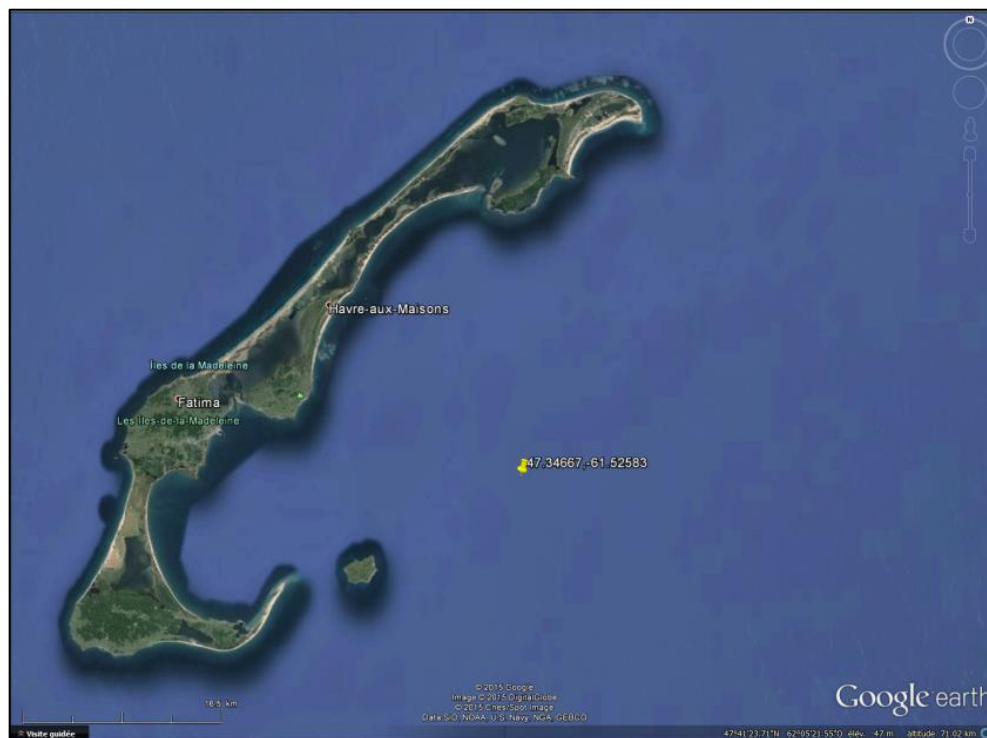
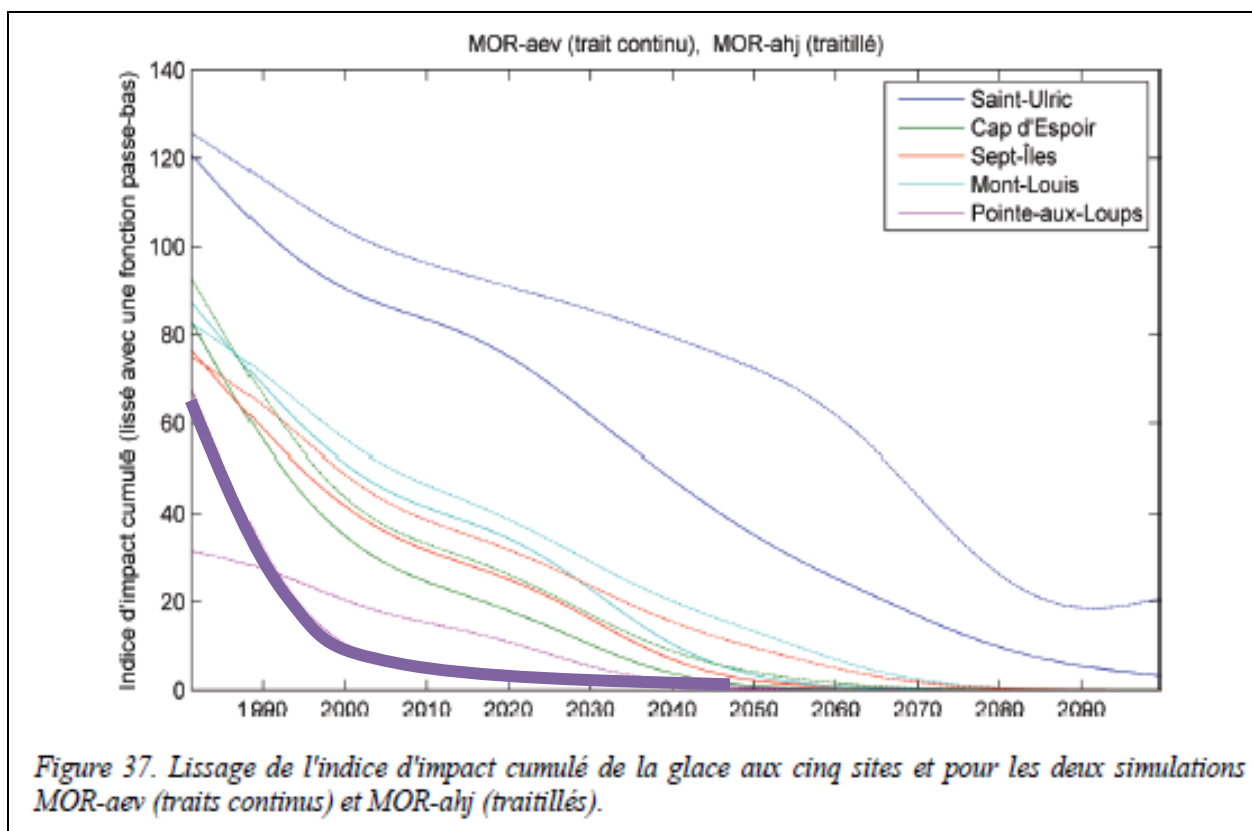


Figure 6 – Localisation de la station de calcul des vagues pour les Îles-de-la-Madeleine



Source : Neumeier et al., 2013, p. 91

Figure 7 – Indice d'impact cumulé de la glace dans cinq régions du Québec (mauve : Îles-de-la-Madeleine)

Rivière-Ouelle

Les vagues extrêmes et leur transformation ultérieure en jet de rive n'ont pas été considérées pour Rivière-Ouelle pour diverses raisons. Premièrement, aucune série historique d'observations de vagues n'était disponible pour ce secteur de l'estuaire moyen du Saint-Laurent. Ropars (2012) a récemment produit un rapport pour le ministère de la Sécurité publique utilisant de courtes séries (16 ans) de vents à Rivière-du-Loup et à l'île Rouge (embouchure du Saguenay), afin de calculer des séries de vagues grâce au modèle GENER (Desjardins et Ouellet, 1984), qui utilisent des formules basées sur le fetch pour modéliser les vagues. D'une part, l'accès aux données n'a pas été possible, d'autre part, les sorties GENER basées sur la formule de fetch SPM84 (*Shore Protection Manual 1984*) ont été critiquées pour leur surévaluation des vagues (Neumeier et al., 2013).

Deuxièmement, selon une étude sur les ondes de tempêtes dans le golfe du Saint-Laurent, les vagues de tempête susceptibles de produire des dommages dans ce secteur proviennent des secteurs nord-ouest et est et nord-est (tempêtes « bleues ») et (Savard et al., 2009 non-pub.). Ceci est supporté par l'étude de Ropars (2012) stipulant que les vents dominants à St-André de Kamouraska ont une distribution bimodale nord-nord-est et sud-ouest. Or, le secteur à l'étude est légèrement décalé et partiellement protégé dans ces deux directions : par la Pointe-aux-Orignaux du côté nord-est et par l'île aux Coudres, l'îlot à Chatigny et l'île aux Grues vers le sud-ouest. Les patrons de vagues sont complexes en raison de la présence de ces îles, ce qui limite le fetch de chaque côte dans l'axe de l'estuaire.

Troisièmement, les dommages de submersion seraient causés principalement par le franchissement de l'aboteau par le niveau d'eau, comme en témoignent les photographies historiques et plusieurs témoignages (voir photos Figure 8; Circé et al., 2016a). L'effet du jet de rive serait donc mineur dans le secteur de la MRC de Kamouraska. Un autre mécanisme de dommages aux terres et bâtiments serait celui de brèches dans l'aboteau comme ce fut le cas à St-Denis de Kamouraska en décembre 2010 (Circé et al., 2016a, entrevue EK06 – témoignage d'un agriculteur dont les terres ont été endommagées), mais il n'est pas intégré dans le calcul des récurrences puisqu'il est ponctuel.

Quatrièmement, une rencontre avec les experts en dynamique côtière du LDGIZC-UQAR a permis de confirmer la plausibilité de l'hypothèse selon laquelle les vagues ne constituent pas un facteur dominant dans les niveaux dommageables de submersion à ce site d'étude.

Ainsi, en raison de la limite dans la disponibilité des données, de la complexité des patrons de vagues, de l'impact somme toute mineur des vagues sur la submersion au site d'étude de Rivière-Ouelle / La Pocatière et de la plausibilité de cette hypothèse, seuls les niveaux d'eau ont été considérés dans la démarche.



Source : C. Morin fournies par la MRC de Kamouraska

Figure 8 – Submersion à St-André de Kamouraska en décembre 2010

2.1.2.2 Méthode de calcul des récurrences

Pour Maria, la courte étendue de la série empêche l'utilisation d'une méthode basée sur les extrêmes annuels. La méthode adoptée est basée sur le principe de dépassement de seuils (*peak-over-threshold*) qui consiste à estimer des paramètres d'échelle (*scale*) et de forme (*shape*) et en fonction de la taille de l'échantillon (Figure 9) pour déterminer un seuil d'extrême ($H_s = 0,7$ m). Ensuite, la série résiduelle d'extrêmes au-delà de ce seuil, illustrée à la Figure 10a, subit un ajustement à une distribution de Pareto généralisée (Figure 10b), afin d'obtenir des récurrences annuelles (Figure 10c) (Coles, 2001). Concernant la courte longueur de la série originale de vagues (10 ans), il est généralement accepté d'utiliser trois fois la longueur de la série. C'est pourquoi pour la suite, seules les récurrences inférieures à 30 ans ont été utilisées.

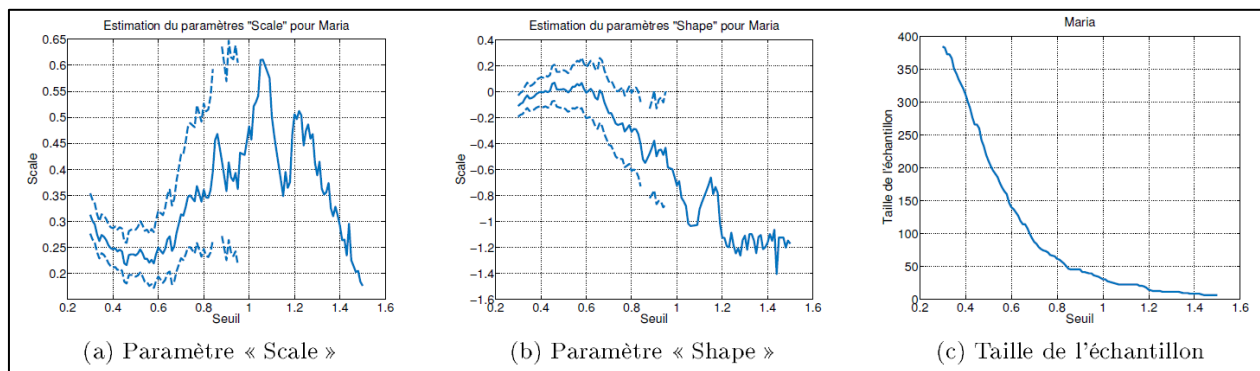
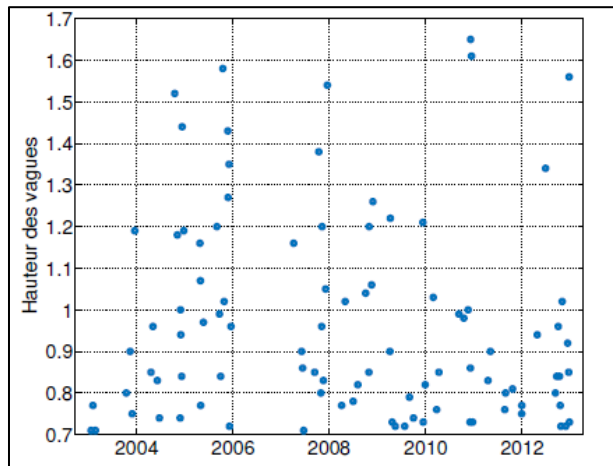
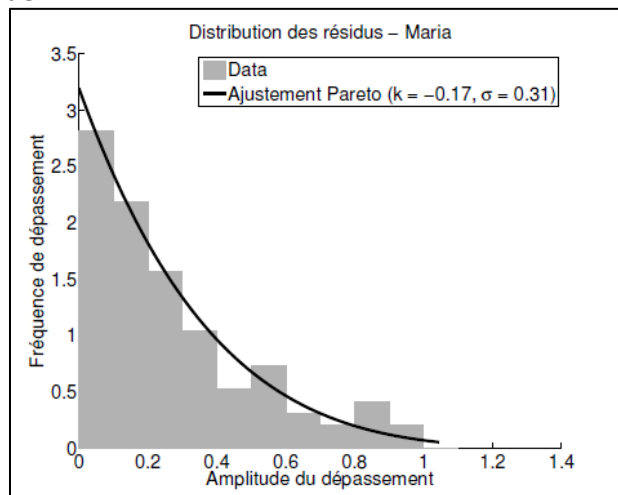


Figure 9 – Illustration des paramètres d'échelle, de forme et de l'effet de la taille de l'échantillon des données de vagues à Maria

A. Série temporelle des Hs extrêmes



B. Distribution des résidus



C. Récurrence des extrêmes

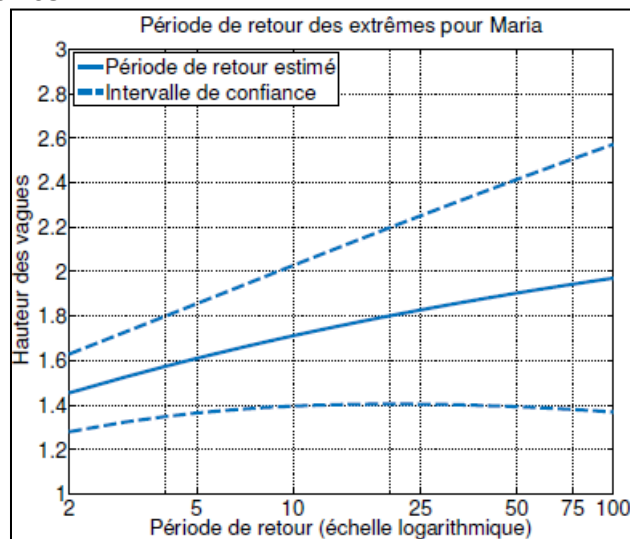
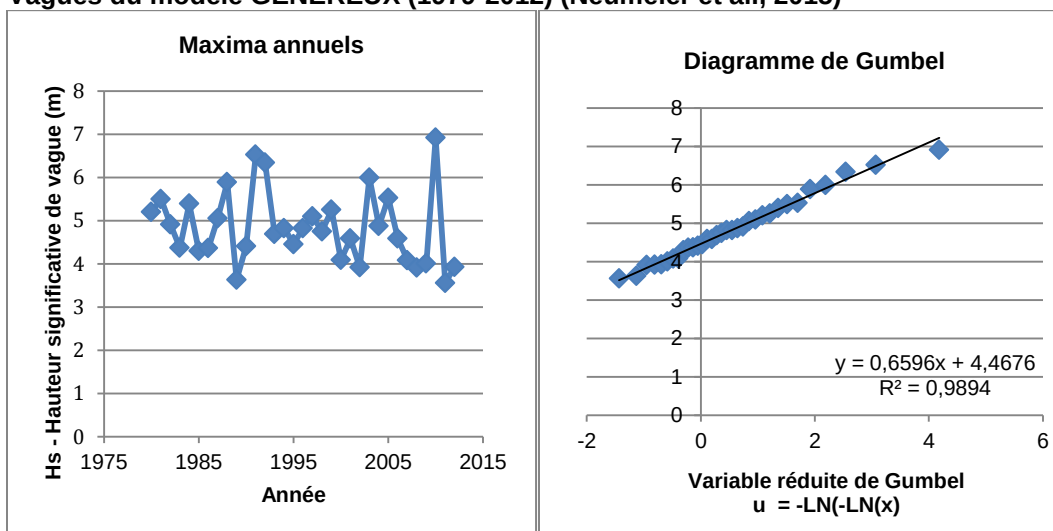


Figure 10 – Paramètres de la méthode de dépassement de seuil et d'ajustement des résidus à la distribution de Pareto généralisée pour Maria

Pour les Îles-de-la-Madeleine, la longueur de la série (au-delà de 30 ans) permettait d'utiliser une méthode basée sur les extrêmes annuels ajustés à la distribution statistique de Gumbel (Coles, 2001). La série de Neumeier et al. (2013) a été comparée à celle d'Environnement Canada, s'étendant entre 2004 et 2010 pour une station équivalente au large du récif de la Perle (47,34 N / 61,51 O) (Jacob et al., 2004) (Figure 11). Celle de Neumeier a été préférée car elle était nettement plus longue (30 ans comparé à 6-7 ans). Comme il est généralement admis de calculer des périodes de retour environ 3 fois la longueur de la série, celle de Neumeier présente un net avantage pour raffiner l'évaluation des dommages basée sur une série de périodes de retour. La courbe de Gumbel basée sur les maxima annuels avec la série de Neumeier possède aussi un r^2 supérieur. Il est cependant à noter que dans l'ensemble, les périodes de retour de Neumeier sont légèrement inférieures à celles d'Environnement Canada (pourrait être dû à l'absence de correction pour la glace?) et que les analyses menées plus loin concernant les événements historiques font douter de la justesse de son usage pour une reconstitution (concordance variable avec les événements extrêmes passés). En même temps, il a été démontré que la série d'Environnement Canada surestimait les hauteurs (Lambert et al., 2013). La fiabilité des statistiques d'ensemble créées à partir de la série de Neumeier semble robuste.

Pour Rivière-Ouelle, aucune vague n'a été considérée puisqu'aucune série historique d'observations de vagues n'était disponible pour ce secteur de l'estuaire moyen du Saint-Laurent. Cette approche est aussi cohérente avec les observations des épisodes de submersion. Une plus ample justification est présentée plus haut à la section 2.1.2.1.

A. Vagues du modèle GENEREUX (1979-2012) (Neumeier et al., 2015)



B. Vagues du modèle d'Environnement Canada (2004-2010) (Jacob et al., 2004)

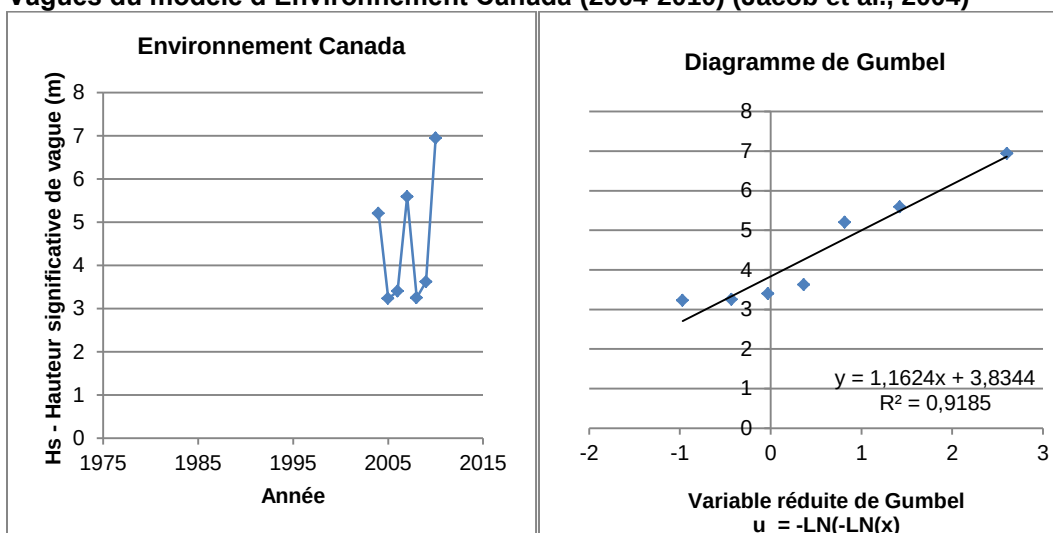


Figure 11 – Maxima annuels de vagues et diagrammes de Gumbel au large du récif de la Perle (Îles-de-la-Madeleine) pour pour A. les vagues du modèle GENEREUX et B. celles d'Environnement Canada

2.1.2.3 Résultats

Les récurrences historiques de hauteur significative des vagues au large (Hs) pour chacun des sites sont présentées au tableau 6.

Tableau 6 – Récurrences de la hauteur significative des vagues (Hs) (m) selon le site d'étude

Récurrence	Maria (Environnement Canada)	IDM (Neumeier)	IDM (Environnement Canada)
(ans)	(m)	(m)	(m)
2	1,45	4,71	4,26
5	1,60	5,46	5,58
10	1,70	5,95	6,45
15	1,78	6,23	6,94
20	1,80	6,43	7,29
25	1,85	6,58	7,55
30	1,45	6,70	7,77
35		6,80	7,95
40		6,89	8,11
45		6,97	8,25
50		7,04	8,37
60		7,16	8,58
70		7,27	8,76
80		7,35	8,92
90		7,43	9,06
100		7,50	9,18
R² diagramme de Gumbel	-	0,99	0,92

*En gris : À titre indicatif seulement, au-delà du seuil de 3x l'étendue de la série

2.1.3 La récurrences de jet de rive

Au niveau dynamique, le jet de rive est issu principalement de l'interaction entre la hauteur significative des vagues, leur période et la morphologie du littoral, en particulier la pente de l'estran qui agit comme dissipateur de l'énergie des vagues (Stockdon et al., 2006). La disponibilité des données de vagues et les pentes de l'estran ont donc mené à des méthodologies données distinctes pour chaque site, exposées une à la suite de l'autre : Maria et Carleton suivi des Îles-de-la-Madeleine. Pour le site de Rivière-Ouelle, l'absence de données de vagues n'a pas permis de réaliser un tel calcul. Cependant, cela ne devrait pas affecter la fiabilité des estimations de niveaux dommageables de submersion, tel que discutée plus haut à la section 2.1.2.1.

2.1.3.1 Maria et Carleton-sur-Mer

En ce qui concerne Maria, deux secteurs ont été traités distinctement : la portion à l'est de la coop IGA de la zone d'étude, et la portion à l'ouest de la coop IGA, jusqu'au secteur routier. Les calculs de la zone est de Maria, plus naturelle, ont été transférés à Carleton-sur-Mer. Comme les deux sont situés dans la même unité hydrosédimentaire, il est plausible de supposer que les pentes d'estrans et facteurs hydrodynamiques sont similaires.

Méthode pour la zone est de Maria et Carleton : Formule universelle du R2%

Le calcul du jet de rive dans la zone est de Maria a été effectué par Didier et al. (2014) et a été transféré à Carleton-sur-Mer. Les auteurs ont utilisé la formule universelle de Stockdon et al. (2006), qui prédit le niveau d'eau franchi par 2% des plus hauts jets de rives, d'après trois facteurs principaux : la pente de l'estran ($\tan\beta$), et la hauteur significative (h_0) et la longueur d'onde (L_0) des vagues au large :

$$R_{2\%} = 1,1 \left(0,35 \tan\beta (H_o L_o)^{1/2} + \frac{[H_o L_o (0,563 \tan\beta^2 + 0,004)]^{1/2}}{2} \right)$$

Pour la portion est, Didier et al. ont utilisé cette équation pour quantifier le jet de rive en utilisant des profils de plages récoltés au lidar terrestre (SMLT) qui ont permis d'obtenir une pente moyenne de 0,03. Pour l'évènement de décembre 2010, le jet de rive calculé a été de 0,41 m, ce qui s'ajuste aux niveaux réels mesurés dans les limites de l'incertitude.

Résultats pour la zone est de Maria et Carleton

Ainsi, à partir des paramètres de vagues et assumant une géomorphologie constante à travers le temps, Didier et al. ont calculé des récurrences de jet de rive pour le secteur à l'est de la coop IGA, tel que présenté au tableau 7.

Tableau 7 – Récurrences des caractéristiques de vagues et du jet de rive, et ratio jet de rive:hauteur de vagues (R:Hs) pour le secteur à l'est du IGA (Maria)

Réurrence	H _s	T _s	L _s	R _{2%^{Est}}	R _{2%^{Est}} :H _s
(ans)	(m)	(s)	(m)	(m)	-
2	1,45	4,93	37,98	0,36	0,25
5	1,60	5,17	41,76	0,40	0,25
10	1,70	5,33	44,38	0,42	0,25
20	1,78	5,45	46,40	0,44	0,25
25	1,80	5,49	47,08	0,45	0,25
30	1,85	5,57	48,46	0,46	0,25

Note : H_s : Hauteur significative; T_s : Période significative; L_s : Longueur d'onde significative; R_{2%} : Hauteur dépassée par 2% des jets de rive; R:H_s : Rapport jet de rive (*runup*) sur hauteur significative

Méthode pour la zone ouest de Maria : Calibration d'un paramètre empirique d'atténuation des vagues au large

Par contre, pour la zone à l'ouest, la modélisation du jet de rive est trop complexe, en raison de l'abondance d'infrastructures de protection situées en zone de pleines mers supérieures et ayant un effet très réflexif sur les vagues. Cela empêche l'utilisation de la formule universelle de Stockdon et al. (2006).

Il serait cependant factice d'utiliser les données de la zone est : un jet de rive de 0,41 m donne un niveau d'eau de 2,90 m, ce qui serait environ 80 cm en deçà des valeurs de submersion mesurées à 3,69 m lors de l'évènement de 2010 (Didier et al., 2014). Il était donc essentiel de trouver une manière d'établir des valeurs de jet de rive estimées à partir des valeurs empiriques, sans passer par l'équation de Stockdon, afin ultimement d'établir des récurrences de jet de rive spécifiques au secteur *ouest*.

Or, dans la zone *est*, la relation est linéaire entre la hauteur de vague et le jet de rive, on peut donc établir un ratio constant R:H_s (où R est pour *runup* – le jet de rive), soit d'environ 1:4 (0,25) pour la zone *est* (voir tableau 7). Autrement dit, dans ce secteur où la pente moyenne du littoral est de 0,03, 25% de la hauteur de vague se transfère sur la côte en jet de rive. Les 75% perdus seraient dissipés sous forme de friction en remontant l'estran.

Il a été possible de reproduire un tel ratio de manière empirique pour la zone *ouest*, avec des données concernant la tempête de décembre 2010. À partir des altitudes obtenues à l'aide du

LIDAR et de la surface inondée en 2010, le niveau total observé est de 3,95 m (meilleure estimation d'après une analyse visuelle), moins une marée observée de 2,49 m, ce qui donne un jet de rive estimé de 1,45 m pour l'évènement de 2010 et, par extension, un ratio $R:H_s$ de 0,89 pour la zone *ouest*, basé sur une hauteur significative de vagues de 1,63 m (tableau 8). En d'autres mots, à morphologie constante, la verticalité des structures diminue la friction et c'est plus du trois quarts de l'énergie des vagues qui est transférée (en énergie potentielle) en niveaux d'eau sur le terrain, contrairement à seulement 25% en zone *est* de plus faible pente moyenne).

Ce ratio empirique de 0,89 revient à utiliser une contrainte empirique dans l'équation de Stockdon qui correspondrait à une pente moyenne d'environ 0,21, ce qui est vraisemblable et proche de l'estimation de 0,25 que Didier et al. suggéraient. Dans tous les cas, c'est beaucoup plus réaliste que d'utiliser la pente moyenne de 0,03 du secteur *est*.

Pour valider cette démarche, l'évènement de 2005 et la cartographie empirique de 2005 et 2010 ont été utilisées (Figure 12). En appliquant ce ratio à l'évènement de 2005, un jet de rive de 1,2 m et un niveau total estimé de 3,38 m ont été calculés. Ce niveau de 3,38 m pour l'évènement de 2005 est environ 60 cm plus faible que celui de l'évènement de 2010. Considérant les données LIDAR et les différences de superficie inondées entre 2005 et 2010, c'est un niveau estimé qui est réaliste. Comme la route 132 a été inondée en 2010, mais pas en 2005, son niveau de submersion est donc situé quelque part entre les valeurs 3,38 et 3,69 m géodésiques. Ainsi, le ratio $R:H_s$ de 0,89 pour la zone *ouest* est valide et vraisemblable d'après les données empiriques.

Tableau 8 – Estimation du rapport R:Hs et du jet de rive pour la zone à l'ouest du IGA (Maria) à partir des événements de submersion de décembre 2005 et 2010, d'après les données de Didier et al., 2014

Événement extrême	Surcote*	Marée observée*	Hauteur de vagues (H _s)**	Niveau d'eau total***	Jet de rive (R) = Niv. total mesuré-marée observée	Rapport R:H _s
	(m)	(m géodésique)	(m)	(m)	(m)	-
2010-10-06 16:00	1,10	2,49	1,63	3,94	1,45	0,89
2005-12-02 18:00	0,97	2,18	1,35	Marée + runup estimé = 3,38 m	runup estimé = 0,89*H _s = 1,2 m	Idem que ci-haut

* Caractéristiques de la marée issues du modèle de Xu 2014

** Caractéristiques des vagues (modèle d'Env. Can.)

***Meilleure estimation entre LIDAR et inondation 2010.



Figure 12 – Meilleure estimation visuelle du jet de rive, basée sur la zone de submersion en 2010 (bleu clair) et les données altimétriques LIDAR (bleu foncé) pour le secteur ouest de Maria (triangle noir)

Résultats pour la zone ouest de Maria

Par extrapolation à partir de ce ratio $R:H_s$, il est ainsi possible de calculer des récurrences de jet de rive pour le secteur ouest, à partir des récurrences de vagues (Tableau 9).

Tableau 9 – Récurrence de jet de rive (R) estimé pour le secteur à l'ouest du IGA (Maria)

Récurrence	$R_{\text{estimé-Ouest}}$
(ans)	(m)
2	1,25
5	1,43
10	1,51
20	1,58
25	1,60
30	1,65

Ultimement, le jet de rive ne varie que d'une trentaine de cm entre une récurrence 2 ans et récurrence 30 ans. Donc, même si cette approximation entraîne une donnée 10 cm en dessous ou en deçà de la réalité, l'étendue des conséquences concerne seulement 2-3 bâtiments dans la zone ouest et ne change pas les conclusions de l'étude. Une analyse de sensibilité des résultats économiques sur les niveaux d'eau totaux renforcerait la robustesse des conclusions.

2.1.3.2 Îles-de-la-Madeleine

Méthode 1 : Calcul du jet de rive selon les équations de Stockdon

La méthode proposée par Didier et al. (2014) a été testée aux Îles-de-la-Madeleine :

- la formule universelle de Stockdon et al. (2006) utilisée par Didier et al. (2014) à Maria prédit le niveau d'eau franchi par 2% des plus hauts jets de rives, d'après trois facteurs principaux : la pente de l'estran ($\tan\beta$), la hauteur significative (h_0) et la longueur d'onde (L_0) des vagues au large. Les pentes de l'estran à La Grave et à Grande-Entrée avec des transects aux 60 m sur une couverture LIDAR aérienne (résolution horizontale 1 m; résolution verticale 30 cm) fournie par la municipalité des Îles-de-la-Madeleine. Dans les sites d'études, les pentes sont de 0,06, soit tout juste à la limite des côtes dissipatives selon le calcul du nombre d'Ibarren (de 0,3) proposé par Didier et al. (2014). Cette

interprétation a du sens vu la longueur de la plate-forme du plateau madelinien et les longues distances à parcourir entre le large du récif de la Perle et les côtes de La Grave et de Grande-Entrée.

- Cette pente a été utilisée pour estimer le jet de rive d'après les hauteurs de vagues. Toutefois, la formule universelle de Stockdon surestimaient d'environ 1 m le jet de rive considérant les niveaux d'eau marins atteints (issus de la série de Xu et Lefavre, 2015) et les niveaux observés sur le terrain lors des événements de la décennie 2000, tels que reconstitués par G. Tita (2015) à La Grave et à Grande-Entrée. Avec la formule des plages dissipatives (annexe 1 de Didier et al, 2014), les niveaux étaient sous-estimés d'environ 75 cm.
- Aucune de ces deux approches n'était satisfaisante et elles ont été rejetées.

Méthode 2 : Calibration d'un paramètre empirique d'atténuation des vagues au large

Basé sur le constat qu'à la fois à Maria dans la zone ouest et aux Îles-de-la-Madeleine, le ratio $R:H_s$ est constant (à deux chiffres après la virgule) pour des périodes de retour entre 2 ans 100 ans, une approche de calibration empirique d'un paramètre d'atténuation des vagues au large à partir des observations terrain a été adoptée. Pour la Grave, l'événement de décembre 2010 a été sélectionné puisqu'il a fait de nombreux dommages et pour lequel plusieurs mesures terrain ont été effectuées par G. Tita (2015). Pour Grande-Entrée, la campagne de terrain de Tita (2015) a permis de documenter avec fiabilité une seule maison témoin. Ainsi, par précaution le rapport $R:H_s$ de la Grave a été transféré, en supposant que l'atténuation des vagues était similaire. Vu des fetchs similaires depuis la station de vague du récif de la Perle autour de 30 km, cette hypothèse semble plausible. Le calcul des périodes de vagues (T_s) a été réalisé à partir d'une régression exponentielle entre H_s et T_s de la série originale de vagues de Neumeier (2015), tel que $T_s = a \cdot (H_s^b)$, où $a = 3,7973$ et $b = 0,5398$ ($r^2 = 0,89$). En ce qui concerne la longueur d'onde des vagues au large (L_s), nous avons utilisé la formule classique : $L_s = 1,56T_s^2$ (The Open University, 1999).

Le tableau 10 résume les caractéristiques de l'événement utilisé pour calibrer le coefficient d'atténuation des vagues du large en jet de rive à une valeur de 15,5%. Ce coefficient donne un jet de rive de 1,07 m pour l'événement de décembre 2010 à La Grave et un jet de rive de 0,38 m à Grande-Entrée pour l'événement de décembre 2008. Ces résultats s'ajustent bien aux niveaux réels mesurés dans les limites de l'incertitude. Ce ratio a été validé avec l'événement de

décembre 2008 à Grande-Entrée : il s'accorde aux événements observés à 5 cm près (0,33 m observé; 0,38 m prédit par le ratio R:Hs de 15,5%).

Tableau 10 – Récurrence des caractéristiques de vagues et du jet de rive pour La Grave et Grande-Entrée

Paramètres	Unités	La Grave	Grande-Entrée
		2010-12-21 au 23	2008-12-22
Niveau d'eau	(m géodésiques)	1,22 m	1,08 m
Hs – Vagues	(m)	6,87 m	2,45 m
Secteur des vagues		NNE	E à SSE
Niveau de submersion observé	(m géodésiques)	2,28 ± 0,28 m (n=3)	1,51 ± 0,29 m*
Runup empirique	(m géodésiques)	2,28-1,22 = 1,07 m	1,41-1,08 = 0,33 m
Ratio R:Hs		1,07 / 6,87 = 15,50%	15,5% = 0,38 m

*Le niveau de submersion observé à Grande-Entrée provient de 4 mesures côté mer et 4 mesures côté terre sur un seul bâtiment à partir de la couverture LIDAR aérienne.

Résultats

À partir de ces paramètres d'atténuation des vagues et assumant une géomorphologie constante à travers le temps nous avons calculé des récurrences de jet de rive valide pour les secteurs de La Grave et Grande-Entrée (Tableau 11).

Tableau 11 – Récurrences des vagues (Hs, Ts, Ls) et du jet de rive ($R:H_s = 15,5\%$) pour La Grave et Grande-Entrée

Récurrence	Hs	Ts	Ls	$R_{15,5\%}$
(ans)	(m)	(s)	(m)	(m)
2	4,71	8,76	38,75	0,73
5	5,46	9,49	41,98	0,85
10	5,95	9,95	44,01	0,92
15	6,23	10,19	45,11	0,97
20	6,43	10,37	45,87	1,00
25	6,58	10,50	46,45	1,02
30	6,70	10,60	46,92	1,04
35	6,80	10,69	47,31	1,05
40	6,89	10,77	47,65	1,07
45	6,97	10,83	47,94	1,08
50	7,04	10,89	48,20	1,09
60	7,16	10,99	48,65	1,11
70	7,27	11,08	49,02	1,13
80	7,35	11,15	49,35	1,14
90	7,43	11,21	49,63	1,15
100	7,50	11,27	49,88	1,16

Note : Hs : Hauteur significative; Ts : Période significative; Ls : Longueur d'onde significative; $R_{15,5\%}$: Hauteur du jet de rive calculé à partir d'un ratio $R:H_s = 15,5\%$.

2.2 Coréurrences des vagues niveaux d'eau pour le présent

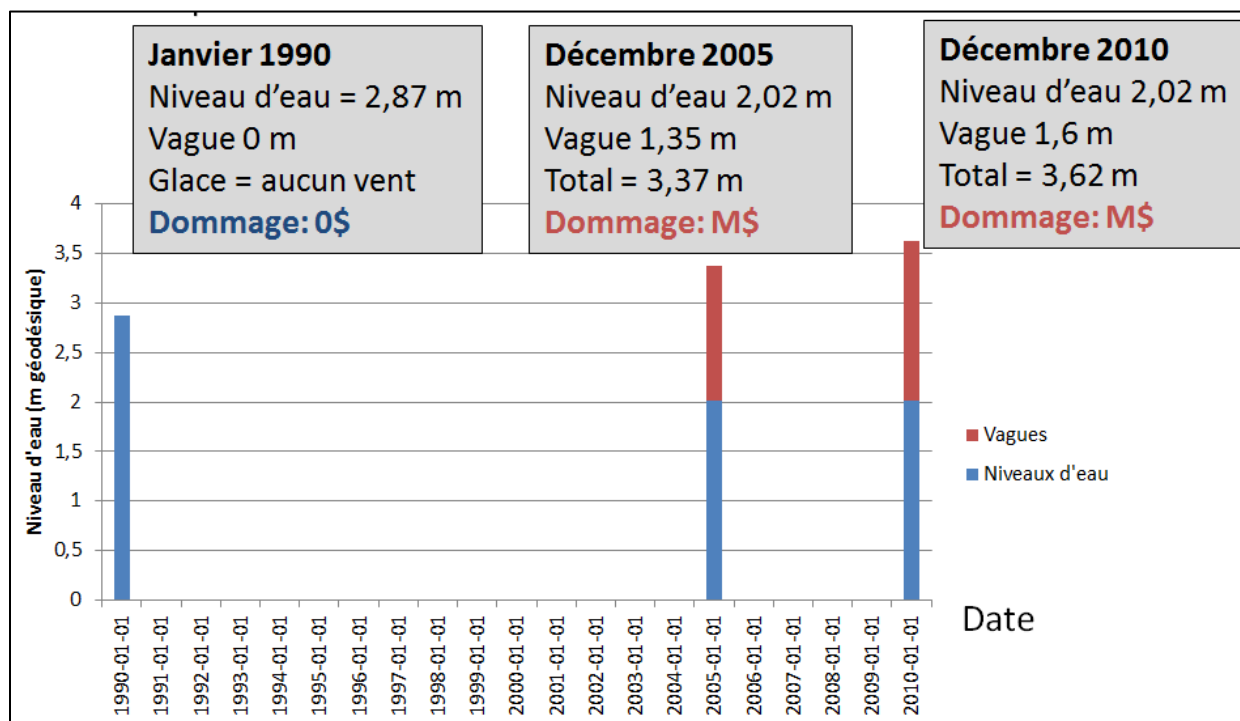
Étant donné que la submersion dépend à la fois des récurrences de niveaux d'eau et de vagues, il fallait ensuite construire des probabilités conjointes de récurrence de ces deux paramètres, à défaut de quoi il existerait une surestimation considérable de la probabilité réelle d'occurrence d'un événement dommageable combinant un niveau d'eau marégraphique extrême avec des vagues (transformées en jet de rive) extrêmes. La méthode retenue pour y arriver est basée sur 1) l'hypothèse des paramètres partiellement dépendants, menant à 2) la construction de coréurrences pour le présent.

2.2.1 L'hypothèse des paramètres partiellement dépendants

La méthode classique de construction de coréurrence est d'additionner les deux niveaux d'eau correspondant à une même récurrence, comme c'est le cas dans les rapports du BRGM en France (Balouin et Belon, 2012). Par exemple, 1,20 m de niveau d'eau géodésique de récurrence 2 ans (La Grave) + 0,73 cm de jet de rive dans le même secteur est pour une vague de récurrence 2 ans ($H_s = 4,71$ m). Cela donnerait un niveau total de récurrence 2 ans de 1,93 m géodésiques. Cette simultanéité des phénomènes s'appellerait la dépendance totale entre les paramètres. Il est logique que les plus grosses surcotes surviennent lorsqu'un système dépressionnaire survient (tempête), qui est souvent accompagné de forts vents, générant eux-mêmes des vagues.

Toutefois, ce n'est pas toujours le cas. En effet, parfois, les événements présentent des récurrences similaires, mais pas parfaites; comme c'était le cas durant l'épisode du 21 décembre 2010 aux Îles-de-la-Madeleine, où la vague maximale de 6,87 m avait une récurrence de 35-40 ans et le niveau d'eau de 1,22 m géodésique à La Grave d'environ 7 ans.

Dans le même ordre d'idée, dans la baie des Chaleurs, trois tempêtes en 1990, 2005 et 2010 ont atteint des niveaux totaux critiques, mais n'ont pas eu les mêmes impacts (Figure 13). Celle de 1990 est survenue en janvier en présence d'un couvert de glace, entraînant l'absence de vagues, alors que les dommages ont été nuls. D'un autre côté, celles de décembre 2005 et décembre 2010 ont fait des millions de dommages, alors qu'à la fois les vagues et les niveaux d'eau avaient atteint des niveaux d'extrêmes (voir section 2.2.2.1).



Note : Le montant exact des dommages n'est pas connu; il s'agit d'une estimation d'ordre de grandeur.

Figure 13 – Comparaison d'épisodes de tempêtes côtières dans la Baie-des-Chaleurs d'après la somme du niveau marégraphique et de la hauteur significative des vagues

Ainsi, certes il y a un degré de dépendance, mais il n'est pas maximal. La conséquence d'assumer une corrélation parfaite serait la surestimation des niveaux totaux extrêmes, donc la surestimation des dommages. Ainsi, pour tenir compte de ces modulations de coréurrences, la démarche est basée sur une hypothèse des paramètres partiellement dépendants, qui stipule que la récurrence extrême d'un des deux phénomènes ne coïncide pas parfaitement avec la récurrence de l'autre extrême (i.e. $P < 1$), mais elles sont reliées à un certain degré.

Outre la présence de vagues, deux autres facteurs réduisent la probabilité de dommages. Le premier est celui de la glace, puisqu'il empêche la formation de vague et permet d'éviter les dégâts malgré des surcotes de niveaux d'eau extrêmes.

Le deuxième est celui de l'orientation des vagues, puisque seuls certains secteurs sont à même de créer les dommages. C'est particulièrement évident dans des chenaux longitudinaux comme la baie des Chaleurs ou dans des environnements asymétriques, comme les îles-de-la-Madeleine. Les vents y rencontrent des obstacles physiques dans certaines orientations qui réduisent le fetch et empêchent l'attaque des vagues pour ces secteurs.

2.2.2 Les coréurrences vagues-niveaux d'eau pour le présent : construction d'un facteur de correction des niveaux d'eau

Pour tenir compte de l'hypothèse des paramètres partiellement dépendants et ses facteurs qui réduisent la probabilité de coréurrence, la démarche pour construire un paramètre de correction des récurrences de niveaux d'eau a été réalisée à partir d'une analyse des événements extrêmes passés et s'est déroulée selon les étapes suivantes :

- 1) Analyse des événements de niveaux d'eau extrêmes
- 2) Correction géodésique des niveaux d'eau et validation des extrêmes historiques
- 3) Calibration du facteur de correction des niveaux d'eau pour les coréurrences

2.2.2.1 L'analyse des événements extrêmes

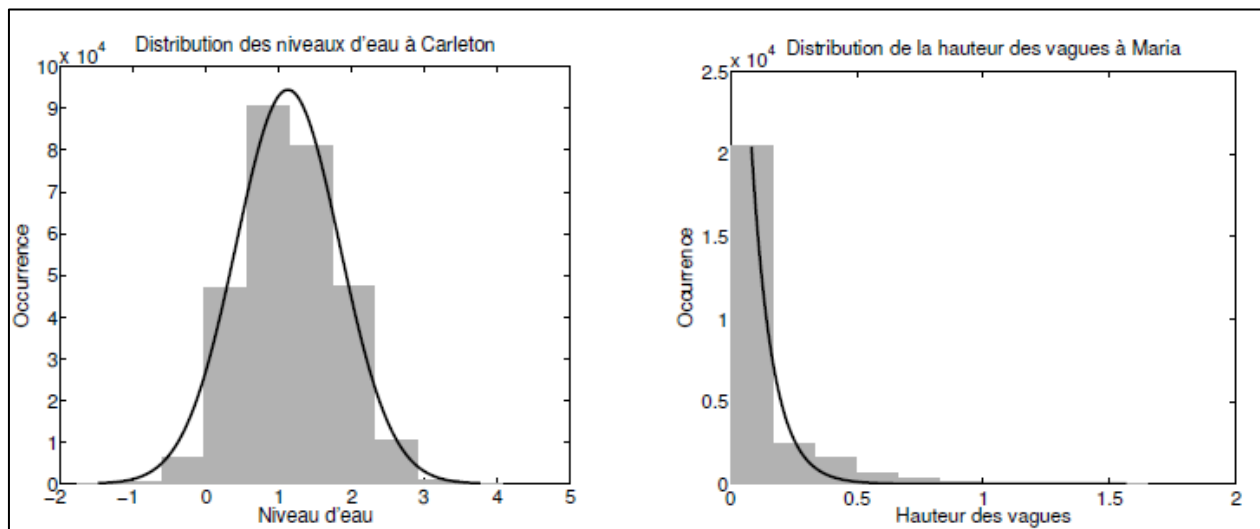
L'analyse des événements extrêmes visait à réaliser une analyse croisée des événements pour identifier les occurrences sous différentes conditions de niveaux d'eau, de vagues et de glace. Cette analyse est basée sur quatre hypothèses principales présentées ci-dessous : celles des seuils d'extrêmes de niveaux d'eau et de hauteur de vagues, celle de la durée des tempêtes, celle de l'orientation des vagues et celle de la durée de la saison englacée.

Seuils d'extrêmes de niveaux d'eau et de hauteur de vagues

Pour analyser les événements extrêmes, il a d'abord fallu déterminer des seuils d'extrêmes. Le plus petit maximum annuel a été utilisé comme seuil d'extrême (Tableau 12). Pour Maria et Carleton, étant donné la particularité d'une courte série de vagues, les seuils d'extrêmes ont été établis sur la base des histogrammes à 3 m marégraphiques (1,82 m géodésique) pour le niveau d'eau et de 1 m pour la hauteur significative des vagues (Figure 14). Cette différence méthodologique et sa faible portée sont discutées dans la section 4. Les données de hauteurs de vagues n'étaient pas disponibles pour Rivière-Ouelle.

Tableau 12 – Seuils d'extrêmes de niveaux d'eau et de hauteur de vagues selon le site d'étude

Seuils d'extrêmes	Carleton et Maria	Îles-de-la-Madeleine		Rivière-Ouelle
		La Grave	Grande-Entrée	
Niveaux d'eau				
Niveaux d'eau (m géodésiques)	1,82	1,26	0,97	3,28
Nb. (donnée horaire de niveaux d'eau)	160	531	396	1102
Vagues				
Hauteur significative de vagues (m)	1,00	3,56		Na
Nb. (donnée horaire de vagues)	85	1681		Na

**Figure 14** – Histogrammes de niveau d'eau à Carleton et de vague aux caps de Maria

Durée des tempêtes

À partir de ces seuils, les événements extrêmes de niveaux d'eau horaires ont été sélectionnés. En filtrant les niveaux d'eau consécutifs sur une durée maximale de 3 jours, soit l'hypothèse sur la durée d'un système météorologique, les données horaires extrêmes ont été réduites à des « événements extrêmes » uniques pour éviter les redondances (Tableau 13). À partir de cette sélection d'événements, les vagues correspondantes aux événements ont été jointes, sauf pour Kamouraska où aucune donnée de vagues n'était disponible.

Tableau 13 – Dénombrement des évènements extrêmes uniques selon le site d'étude

	Carleton et Maria	Îles-de-la-Madeleine		Rivière-Ouelle
		La Grave	Grande-Entrée	
Hypothèse sur la durée des tempêtes	3 jours	3 jours	3 jours	3 jours
Nb. niveaux d'eau horaires extrêmes	160	531	396	1102
Nb. évènements de niveaux d'eau extrêmes	71	124	90	340
Nb. évènements uniques avec données de vagues correspondantes	15	121	89	0

Orientation des vagues dommageables

Du côté des vagues, la distribution de l'orientation des vagues extrêmes a été analysée, autant du point de vue de la distribution statistique (Figure 15), que du point de vue des évènements dommageables documentés par les mesures terrain, archives ou témoignages.

Maria et Carleton

À Maria et Carleton, parmi la courte série de vagues (2004-2010), 100 % des vagues extrêmes provenaient du sud-est (Figure 15A). Ceci est confirmé par deux évènements dommageables bien documentés et pour lesquels les vagues étaient disponibles, le 22 décembre 2008 et le 6 décembre 2010. Ces deux évènements ont d'ailleurs été rapportés parmi les pires tempêtes ayant frappé la Gaspésie d'après l'analyse des archives de journaux (Bernatchez et al., 2012).

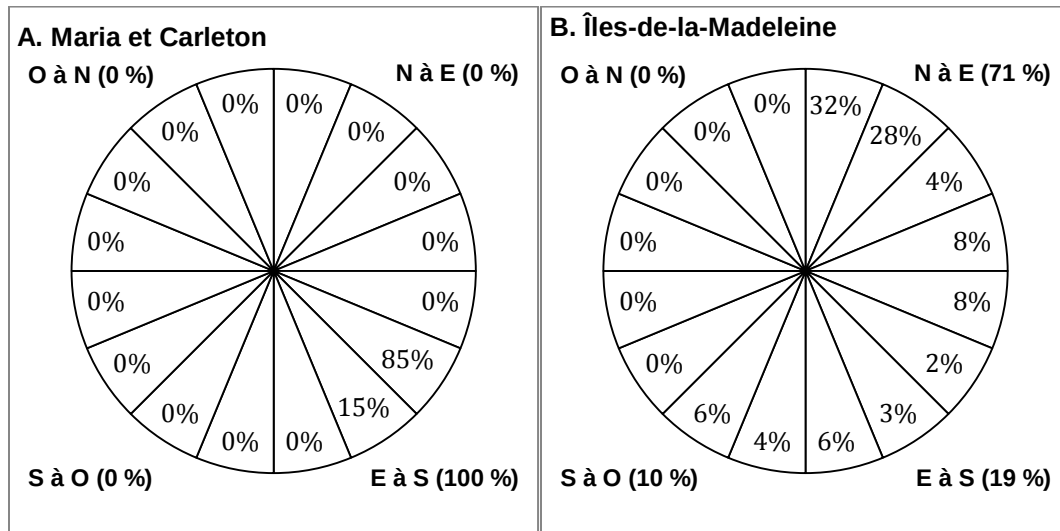
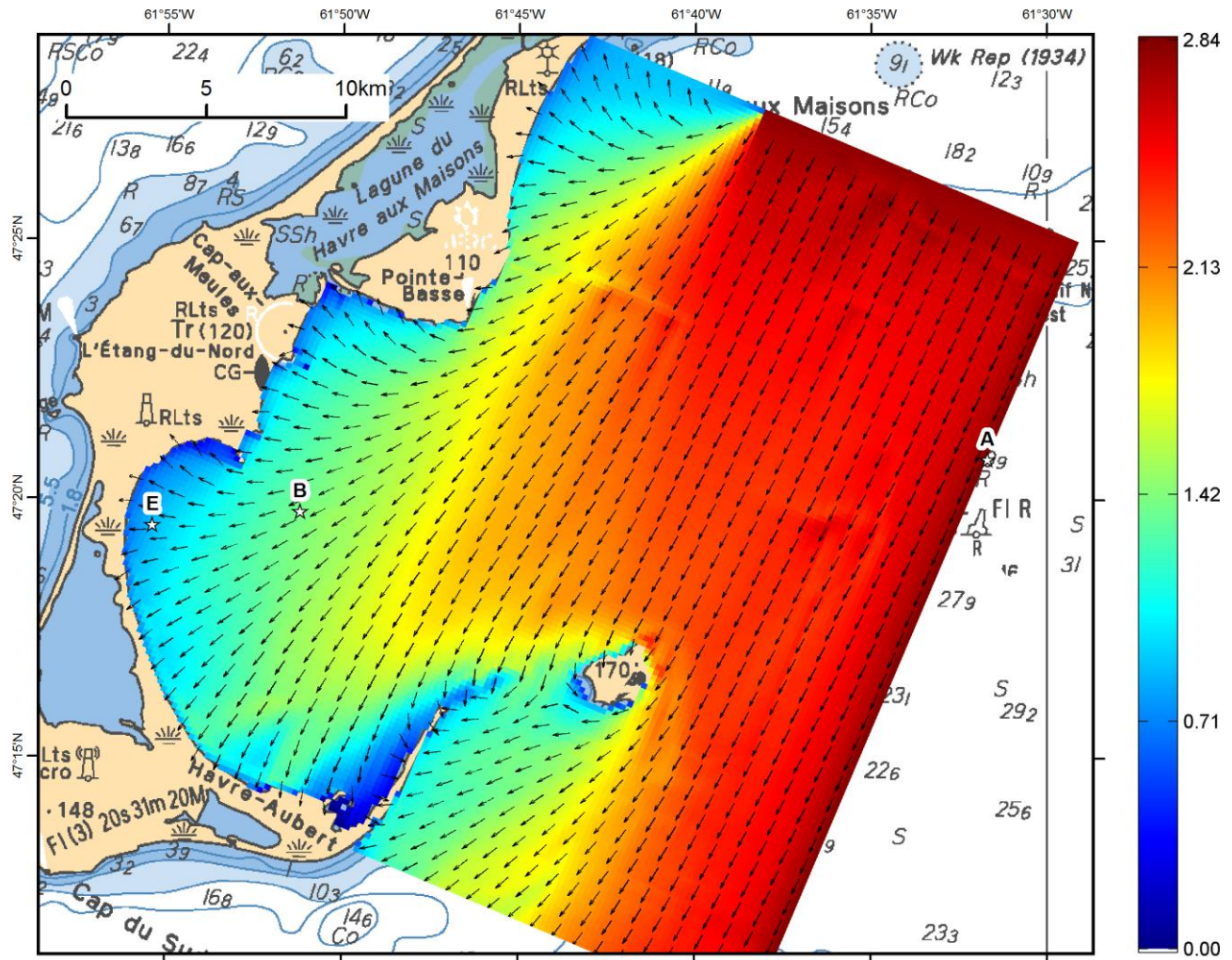


Figure 15 – Distribution de l'orientation des vagues extrêmes horaires pour A. Maria (n = 85; seuil de 1,00 m) et B. Îles-de-la-Madeleine (n = 1681; seuil de 3,56 m)

Îles-de-la-Madeleine

Pour les Îles, la distribution statistique des orientations de vagues extrêmes est davantage multidirectionnelle qu'à Maria. Elle montre que le premier quadrant (0-90 degrés) domine à 71% (Figure 15B). De manière cohérente, les données de modélisation des vagues réalisées par les chercheurs de l'ISMER montrent que le côté est des Îles ne peut être atteint par des vagues provenant de l'ouest, alors que les vagues provenant spécialement des secteurs NNE à E ont un potentiel dommageable plus critique, comme l'illustre la figure 16. En comparant cette distribution avec les événements ayant entraîné des dommages depuis les années 2000 décrits par Tita (2015; tableau 14), il ressort cependant que le sous-secteur NNE à E est le plus critique en termes de dommages, autant pour La Grave que pour Grande-Entrée. L'hypothèse a donc été restreinte à ces azimuts, malgré l'occurrence de certains autres secteurs au sein des vagues extrêmes.



Source : Neumeier, inédit.

Figure 16 – Modélisation de la hauteur et l'orientation des vagues provenant du nord-nord-est à l'est des Îles-de-la-Madeleine

Tableau 14 – Caractéristiques des vagues des événements dommageables décrits par Tita (2015) aux îles-de-la-Madeleine depuis les années 2000

Date	La Grave		Grande-Entrée		Dommages
	Hs	Secteur	Hs	Secteur	
	(m)	(°)	(m)	(°)	
2010-12-21	6,87	22,5-45,0	6,87	22,5-45,0	Forts
2010-03-24	3,41	90-112,5	3,41	90-112,5	Aucun
2010-01-02	3,86	67,5-90	3,86	67,5-90	Forts
2008-12-22	-	-	2,45	112,2-157,5	Aucun
2000-10-29	3,38	45,0-67,5	3,38	45,0-67,5	Forts

Rivière-Ouelle

Encore une fois, les données de vagues n'étaient pas disponibles pour Rivière-Ouelle.

En somme, les hypothèses retenues pour l'orientation des vagues dommageables pour chaque site d'étude sont présentées au tableau 15.

Tableau 15 – Hypothèse sur l'orientation (origine) des vagues dommageables selon le site d'étude

	Carleton et Maria	Îles-de-la-Madeleine		Rivière-Ouelle
		La Grave	Grande-Entrée	
Hypothèse des secteurs de vagues dommageables	SE - SSE (112,5°-157,5°)	NNE à E (22,5°-90°)		Na
Nb. données horaires de vagues	85	1681		Na
Nb. événements de niveaux extrêmes avec vagues dommageables	Na*	17 (14 %)	10 (11 %)	Na
Nb. événements de niveaux extrêmes avec vagues du secteur critique	Na**	65 (54 %)	39 (44 %)	Na
Nb. total d'événements de niveaux d'eau extrêmes	71	121	89	71

Note : * Avec la courte série de vagues à Carleton et Maria : 2 événements sur 15 (13 %) où les deux données (niveaux d'eau, vagues) sont disponibles; ** 14 événements sur 15 (93 %) où les deux données sont disponibles.

Saison englacée

En ce qui concerne les conditions englacées, elles empêchent le vent de souffler sur l'eau directement et ainsi, la formation de vagues. Les dégâts sont donc généralement évités en présence d'un couvert de glace, malgré des surcotes de niveaux d'eau extrêmes. L'hypothèse adoptée concernant la saison englacée est différente d'un site à l'autre (Tableau 16; Figure 17). En effet, à Carleton et Maria, situés au fond de la baie de Chaleurs, il a été supposé que les conditions calmes favorisent le maintien d'un couvert de glace sur une période de 4 mois (janvier-février-mars-avril), alors qu'en raison des conditions hydrodynamiques plus ouvertes aux Îles-de-la-Madeleine et de l'adoucissement hivernal déjà presque terminé tel que présentée précédemment (Figure 7, section 2.1.2.1), l'hiver a été réduit à seulement 3 mois (janvier-février-mars), ce qui est confirmé par la figure précédente. Pour Rivière-Ouelle, les conditions semi-ouvertes de l'estuaire avec le fort courant descendant du fleuve font supposer que la période est aussi plus courte que dans la baie des Chaleurs (janvier-février-mars). Bien sûr, certaines années le couvert s'installe en décembre, mais d'autres années il fond plus tard au printemps et cette variabilité est contenue dans ces hypothèses moyennes. À l'opposé, on appellera conditions d'eau libre les conditions océanographiques « estivales » (sans glace). La durée du couvert de glace dans chaque agglomération gagnerait à être mieux documentée pour étoffer ce type d'hypothèse. Toutefois, ces estimations sont, somme toute, conservatrices.

Tableau 16 – Hypothèse concernant la durée annuelle de conditions englacées selon le site d'étude

	Carleton et Maria	Îles-de-la-Madeleine		Rivière-Ouelle
		La Grave	Grande-Entrée	
Hiver (Mois avec couvert de glace)	JFMA	JFM		JFM
Évènements de niveau extrême en saison englacée (hiver)	34 (47 %)	57 (46 %)	48 (54 %)	19 (27 %)
Évènements de niveau extrême en saison d'eau libre (été)	37 (52 %)	67 (54 %)	41 (46 %)	52 (73 %)
NB. Total d'évènements de niveaux d'eau extrêmes	71	121	89	71

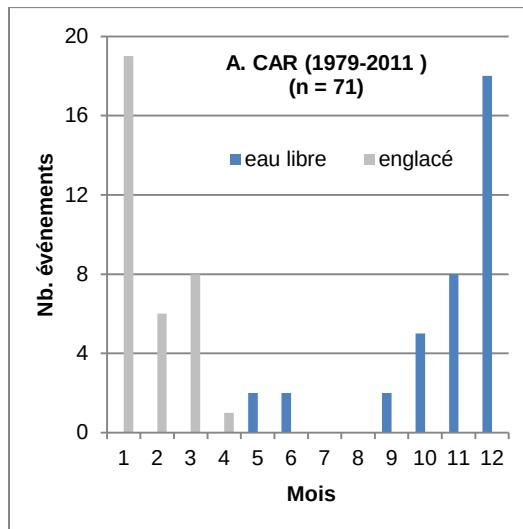
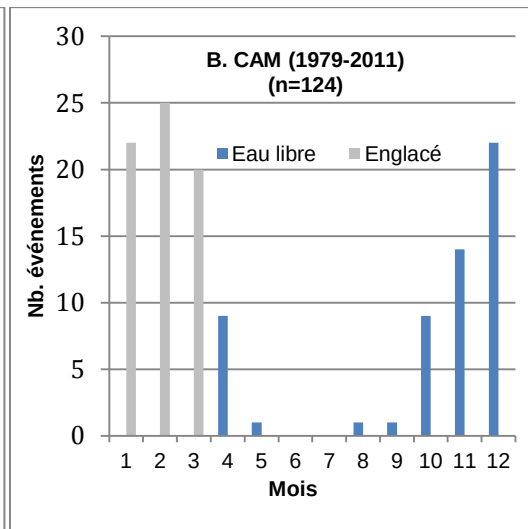
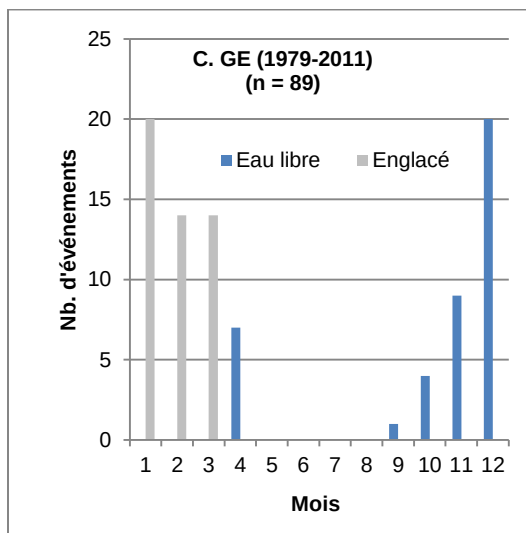
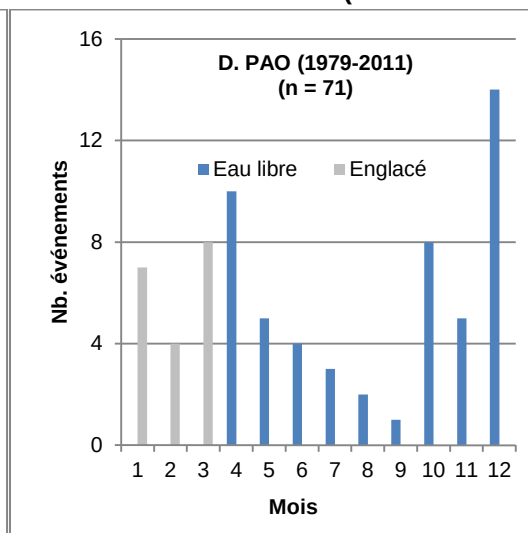
A) Carleton**B) La Grave (Cap-aux-Meules)****C. Grande-Entrée****D. Rivière-Ouelle (Pointe-aux-Orignaux)**

Figure 17 – Distribution mensuelle des événements extrêmes de niveaux d'eau A. Carleton et Maria, B. La Grave (Cap-aux-Meules), C. Grande-Entrée, D. Rivière-Ouelle (Pointe-aux-Orignaux)

2.2.2.2 L'analyse combinatoire des événements extrêmes pour calibrer un facteur de correction des récurrences de niveau d'eau

À partir de ces quatre hypothèses clé et des dénombrements effectués, une analyse croisée des événements extrêmes de niveau d'eau, de vagues, d'orientation critique des vagues et d'eau libre a ensuite été réalisée pour chacun des sites d'étude. La démarche était la suivante :

1. Représenter les dénombrements d'événements selon chaque combinaison possible dans un diagramme de Venn;
2. Sélectionner la probabilité de la configuration la plus dommageable à quatre facteurs (niveau extrême, vague extrême, vague d'orientation dommageable, saison libre de glace);
3. Transformer cette probabilité en facteur de correction selon les équations suivantes :

$$p = n_{\text{dom}} / n_{\text{tot}} * 100$$

$$1:p = 100/p = f$$

où n_{dom} = nb. événements de configuration la plus dommageable

n_{tot} = nb. total d'événements de niveaux d'eau extrêmes

p = probabilité de configuration la plus dommageable

f = facteur de correction;

4. Effectuer une régression de cette probabilité pour tenir compte de l'hypothèse des paramètres partiellement dépendants et l'appliquer aux niveaux d'eau (Maria seulement, voir l'explication au paragraphe ci-dessous);
5. Calcul des récurrences corrigées de niveaux d'eau extrêmes à partir de l'équation suivante :

$$N_{\text{corr}}(r) = N_i(r) * f$$

où $N_{\text{corr}}(r)$ = Niveau d'eau corrigé de récurrence r

$N_i(r)$ = Niveau d'eau initial de récurrence r .

Au départ, il a été supposé que les plus gros systèmes météorologiques entraînent les plus grandes surcotes en combinaison avec les plus hautes vagues. C'est selon cette hypothèse que la régression a été effectuée à Maria, entre la probabilité de dommages maximum présentée ci-bas et une probabilité maximale donnée (voir l'explication plus bas sur sa sélection).

Toutefois, la longueur des séries aux Îles-de-la-Madeleine a permis de vérifier cette hypothèse à l'aide d'une corrélation entre les hauteurs de vagues extrêmes et celle des niveaux d'eau extrêmes. Cette corrélation s'est avérée insignifiante ($r^2 = 0,03$ avec le niveau total et $0,12$ avec la surcote), ce qui a permis d'infirmer cette hypothèse et d'écarter cette étape (Annexe B). Cependant, vu les contraintes de temps, les résultats étaient déjà trop avancés pour recommencer les calculs pour Maria. La portée de cette erreur à Maria est plus importante pour les forts niveaux d'eau (réurrences les plus élevées), de l'ordre d'environ un décimètre.

Maria et Carleton

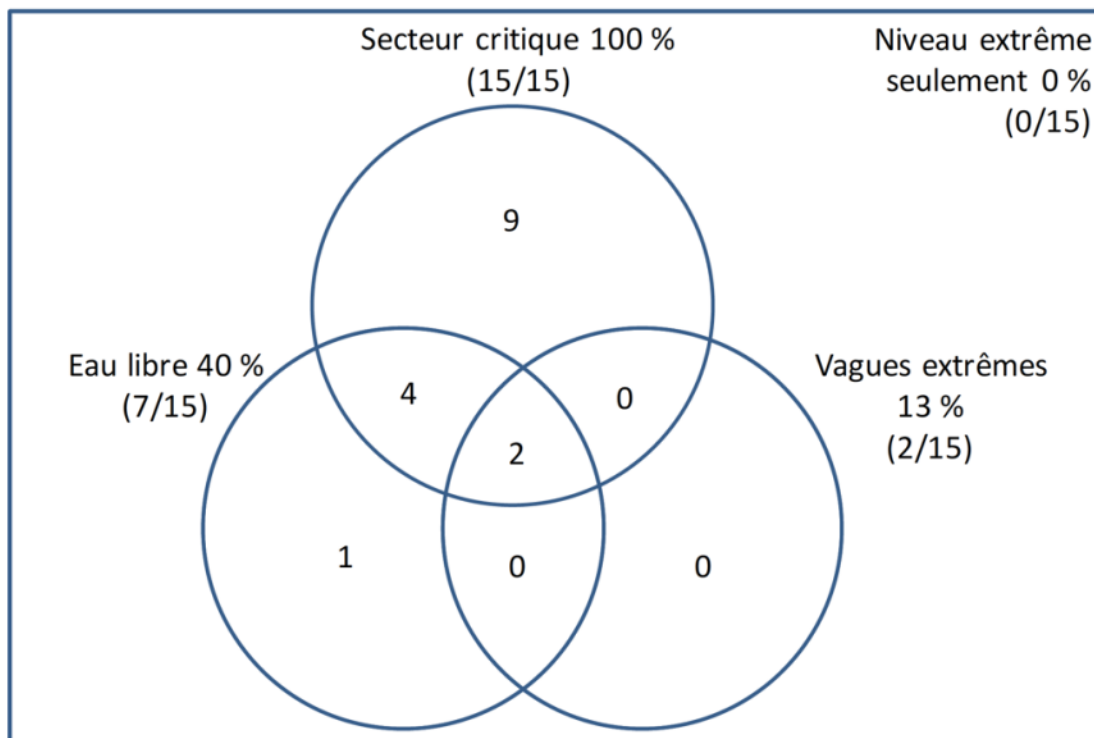
Pour Maria et Carleton, le diagramme de Venn a été réalisé sur les 15 événements extrêmes de niveaux d'eau où se superposait à la courte série de données de vagues (Figure 18A), ce qui donne une configuration de 2 événements sur 15 (13 %) où les conditions sont les plus optimales pour faire des dommages selon les quatre facteurs considérés. Toutefois, vu la taille de l'échantillon, il est préférable de valider ce taux en analysant le détail des 4 variables séparément, à partir des données horaires et en multipliant les probabilités (Figure 18B). Cette méthode alternative résulte en une configuration légèrement plus faible, à 10 %. La méthode alternative a été sélectionnée pour la suite parce que les proportions individuelles y sont plus robustes au niveau statistique. La transformation de cette probabilité va comme suit;

$$f = 1:10 = 100/10 = 10$$

Le facteur de correction combinatoire est donc d'une valeur de 10.

Comme expliqué plus haut, par la suite, une régression de cette probabilité pour tenir compte de l'hypothèse des paramètres partiellement dépendants a été appliquée aux niveaux d'eau entre 10:1 et une borne maximale de 3:1 entre le seuil d'extrême (1,82 m géodésique) et la valeur la plus extrême de la série (2,87 m géodésiques) (Figure 19). La borne maximale de 3:1 provient d'un état hypothétique qui se rapproche de la corrélation parfaite entre vagues extrêmes et niveaux d'eau extrêmes en conditions déglacées (48 % ou 2:1), mais qui n'est pas tout à fait parfaite étant donné des paramètres qui influencent le degré de dépendance, mais qui ne sont pas considérés dans l'analyse combinatoire comme des obstacles morphologiques (par exemple des barres d'avant-côte qui freineraient les vagues, mais non le niveau d'eau). À partir de cette régression, il résulte donc une relation mathématique pour corriger les divers niveaux d'eau extrêmes, variant entre des facteurs 10 et 3.

A. Diagramme de Venn basé sur les événements extrêmes uniques



B. Diagramme de Venn basé sur les données horaires individuelles

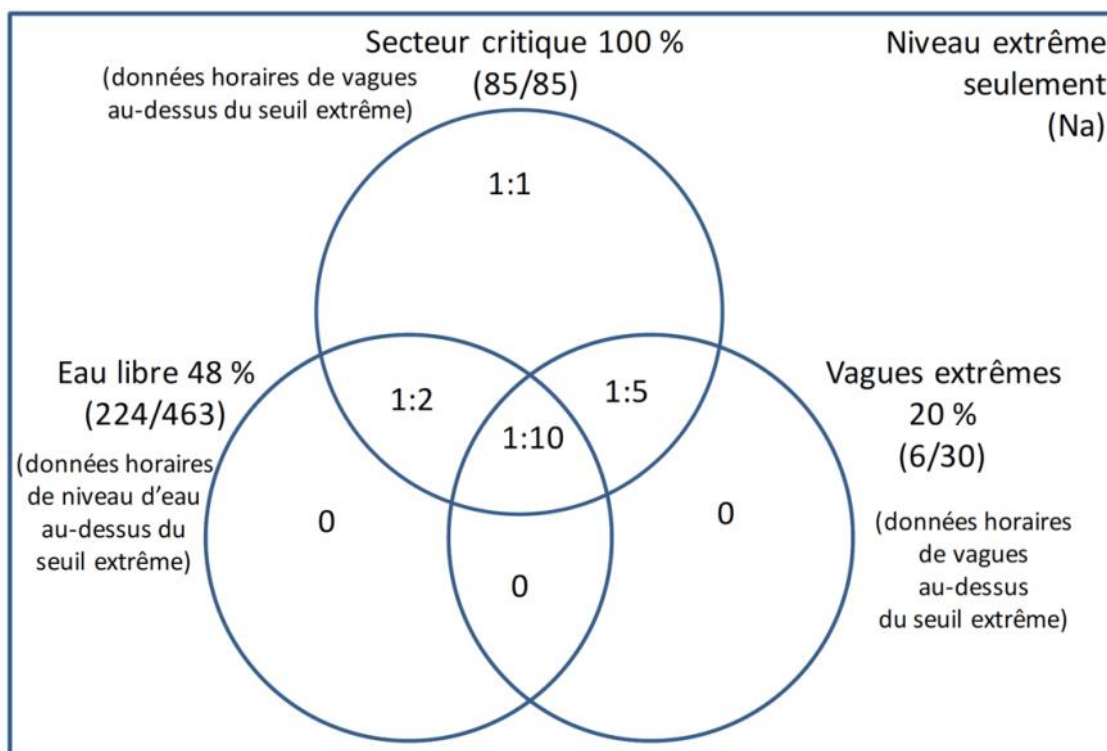


Figure 18 – Diagrammes de Venn selon deux méthodes différentes pour Maria

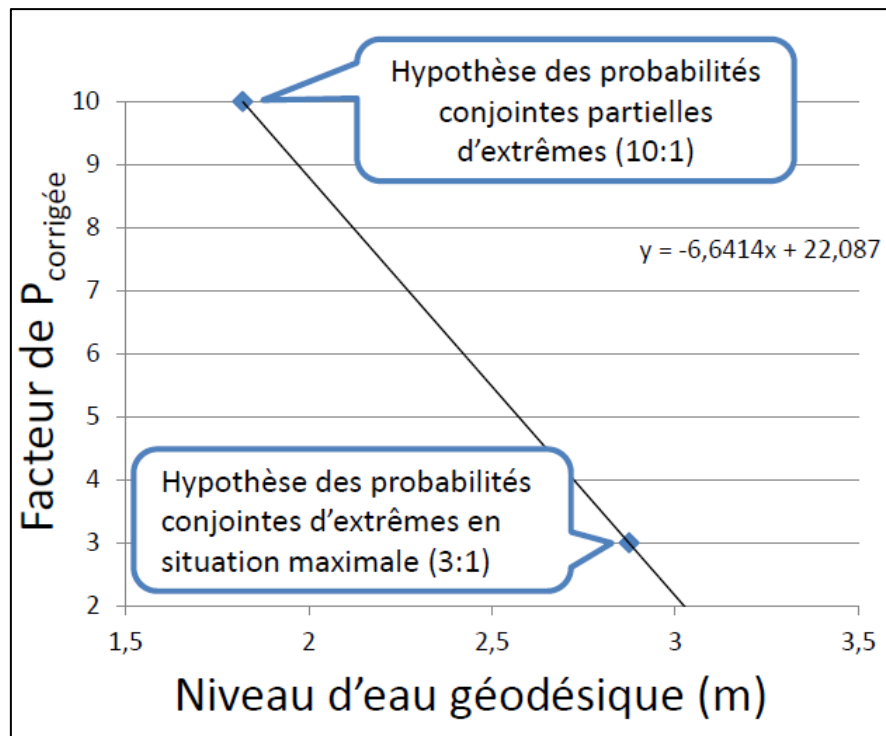


Figure 19 – Facteur de correction de la probabilité selon le niveau d'eau marégraphique pour Maria

Ainsi, l'analyse combinatoire produit un facteur de correction situé entre 3 et 10 en considérant un seuil de niveau extrême de 1,82 m géodésique, une saison d'eau libre durant 8 mois, une hauteur de vagues extrêmes de 1,0 m et un secteur critique de vagues du SE-SSE. Autrement dit, l'hypothèse des probabilités conjointes partielles d'extrêmes implique que cela prend entre 3 et 10 événements extrêmes plutôt qu'un seul pour qu'une combinaison favorable à ce que des dommages de submersion se produisent.

Le calcul des récurrences corrigées est ainsi possible, et illustré à la figure 20. Concrètement, cette correction implique une diminution de la fréquence des extrêmes. Par exemple, l'évènement de décembre 2010 passe d'une récurrence 32 ans à une récurrence 100 ans.

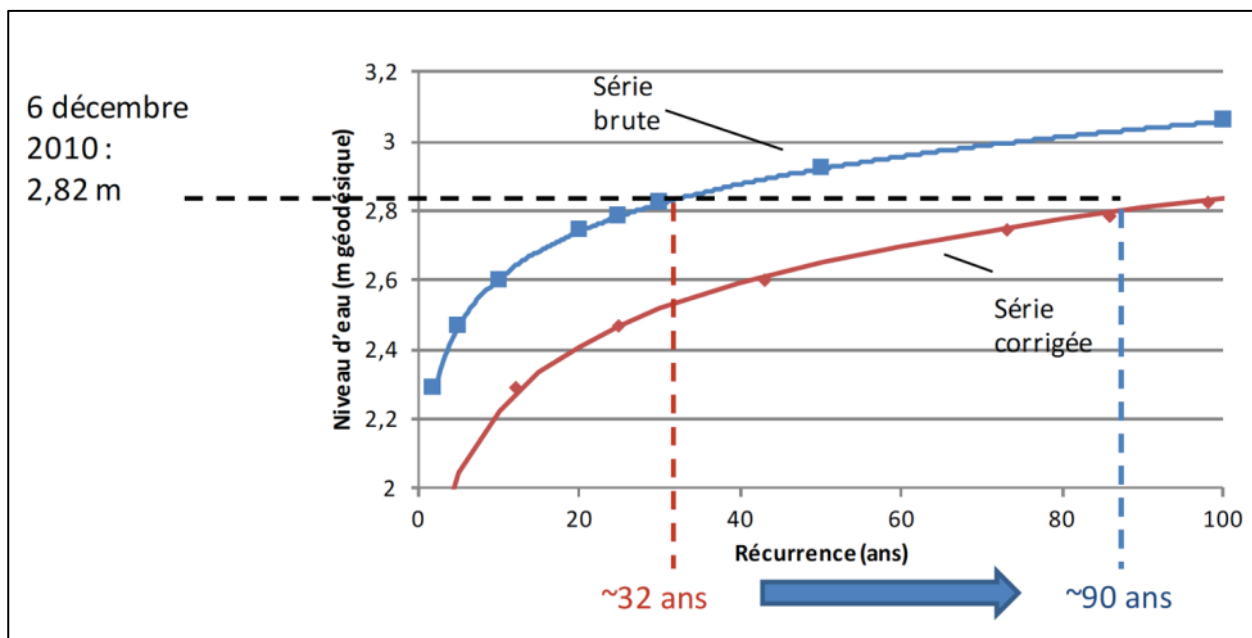


Figure 20 – Comparaison des récurrences brutes et corrigées pour Maria et Carleton

Îles-de-la-Madeleine

D'après la même démarche, il a été déterminé pour le secteur La Grave que

- environ 1 évènement de niveau extrême sur 7 s'est produit en combinaison avec des vagues extrêmes,
- un peu plus de la moitié des évènements (54%) se sont produits avec des vagues provenant du secteur critique,
- un peu moins de la moitié des évènements (45%) se sont produits en période d'eau libre.

En combinant les quatre facteurs, ce sont au total seulement 8 sur 121 (6 %) des évènements de niveau extrême qui sont survenus selon la configuration optimale pour créer des dommages (Figure 21). La transformation de cette proportion en facteur de correction s'appuie sur $p = 6$ et va comme suit :

$$f = 100/6 = 16,67$$

Le facteur de correction combinatoire a donc une valeur de 16,67 pour le secteur de La Grave.

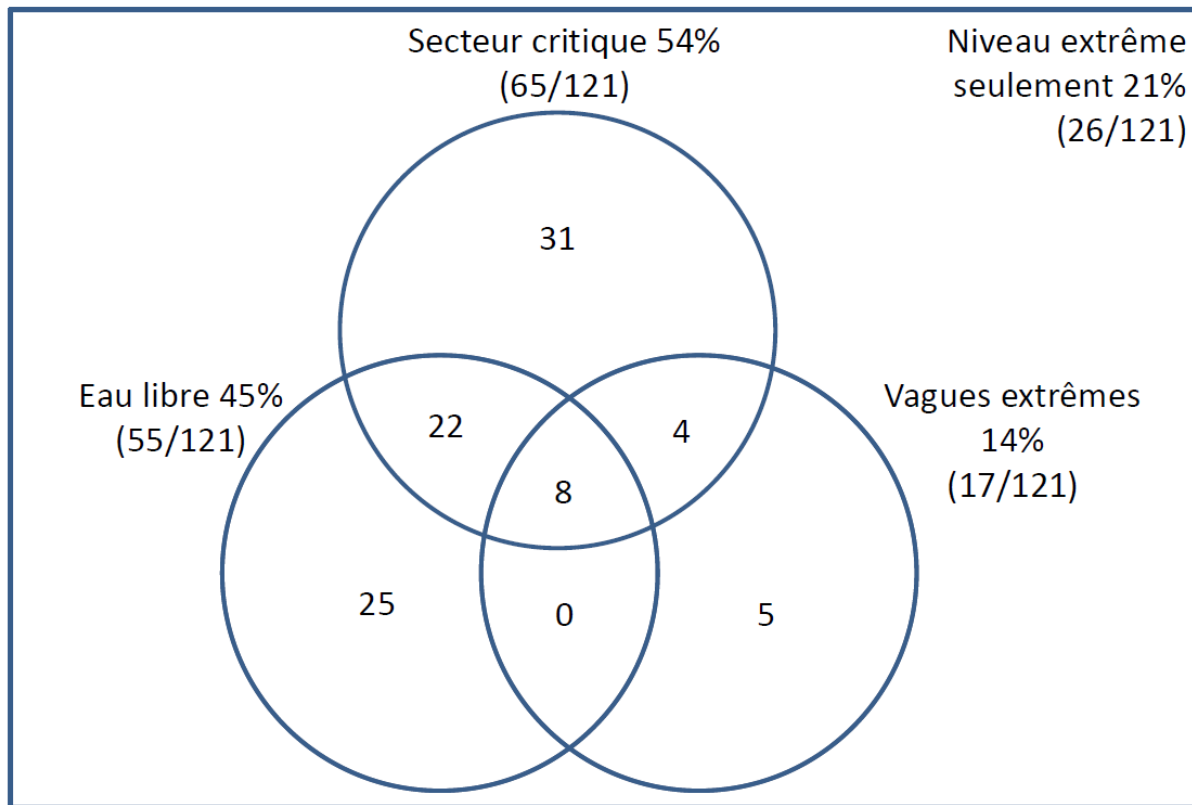


Figure 21 – Diagramme de Venn pour La Grave

Ainsi, l'analyse combinatoire produit un facteur de correction calibré à 16,67 pour le site de La Grave aux Îles-de-la-Madeleine, en tenant compte des niveaux d'eau extrêmes (0,98 m géodésique), de hauteurs de vagues extrêmes (3,56 m), du secteur critique provenant du NNE à l'est et d'une saison englacée durant 3 mois. Autrement dit, l'hypothèse des probabilités conjointes partielles d'extrêmes implique que cela prend près de 17 évènements extrêmes plutôt qu'un seul pour qu'une combinaison favorable à ce que des dommages de submersion se produisent.

À partir de ce facteur, les récurrences de niveaux d'eau ont été corrigées, tel qu'illustré à la figure 22. Ainsi, l'évènement de décembre 2010, qui était estimé être de récurrence être inter-annuel (3 ans) est en réalité multi-décennal (25 ans), si l'on tient compte de la possibilité réelle d'avoir des vagues extrêmes bien orientées et des conditions d'eau libre en même temps que le niveau d'eau extrême.

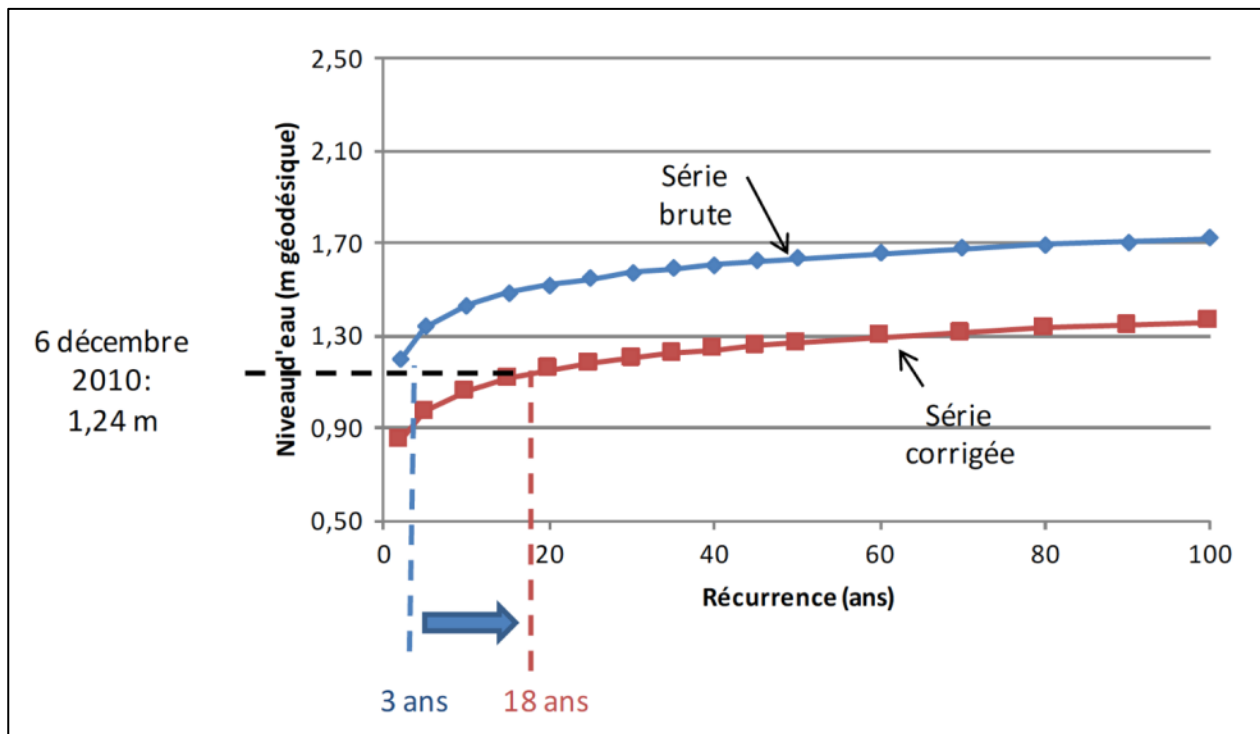


Figure 22 – Comparaison des récurrences brutes et corrigées pour La Grave, Îles-de-la-Madeleine

La même analyse a été réalisée pour Grande-Entrée (Figure 23). Les résultats montrent qu'un seul évènement sur 89 avait une configuration dommageable, alors qu'on sait que de multiples évènements ont fait des dommages de submersion à Grande-Entrée (Tita, 2015). De surcroît, vu l'absence de données fiables pour calibrer les hauteurs de jet de rive à Grande-Entrée (Tita, 2015), il a été choisi d'effectuer un transfert du facteur combinatoire de La Grave pour le cas de Grande-Entrée.

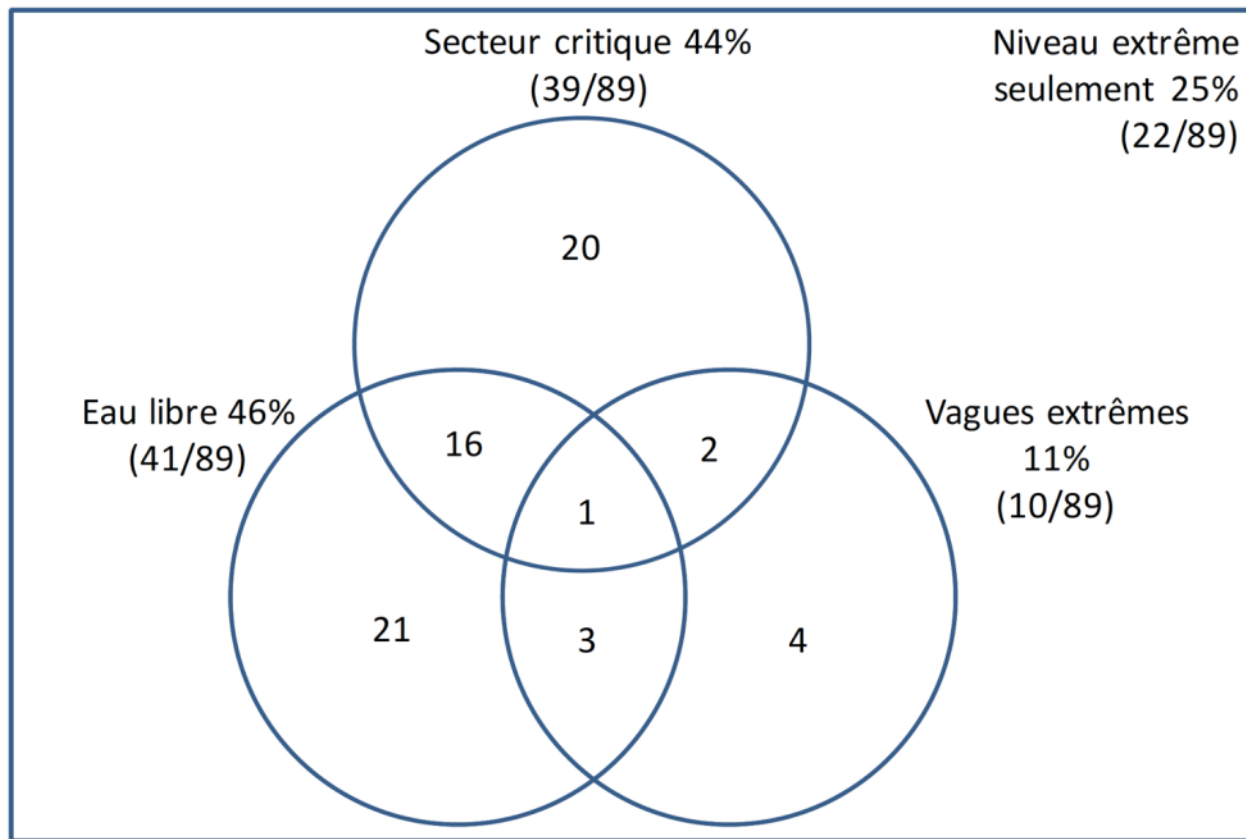


Figure 23 – Diagramme de Venn pour Grande-Entrée

Rivière-Ouelle : Validation des extrêmes historiques et facteur de correction constante des niveaux d'eau

Pour Rivière-Ouelle, vu l'absence de vagues et le choix d'exclure le jet de rive, l'analyse combinatoire a seulement porté sur la saison libre de glace (Figure 24).

Pour Rivière-Ouelle, seuls 73% des événements avaient une configuration pour faire des dommages en raison de la présence d'eau libre. Ainsi, le facteur de correction appliqué aux récurrences de niveaux d'eau a été calibré à 1,4. Toutefois, le rôle de l'analyse des conditions d'eau libre sert à corriger pour l'atténuation des vagues par la glace. Étant donné l'absence de vagues significative, la correction pour l'analyse combinatoire n'est donc pas pertinente et n'a pas été.

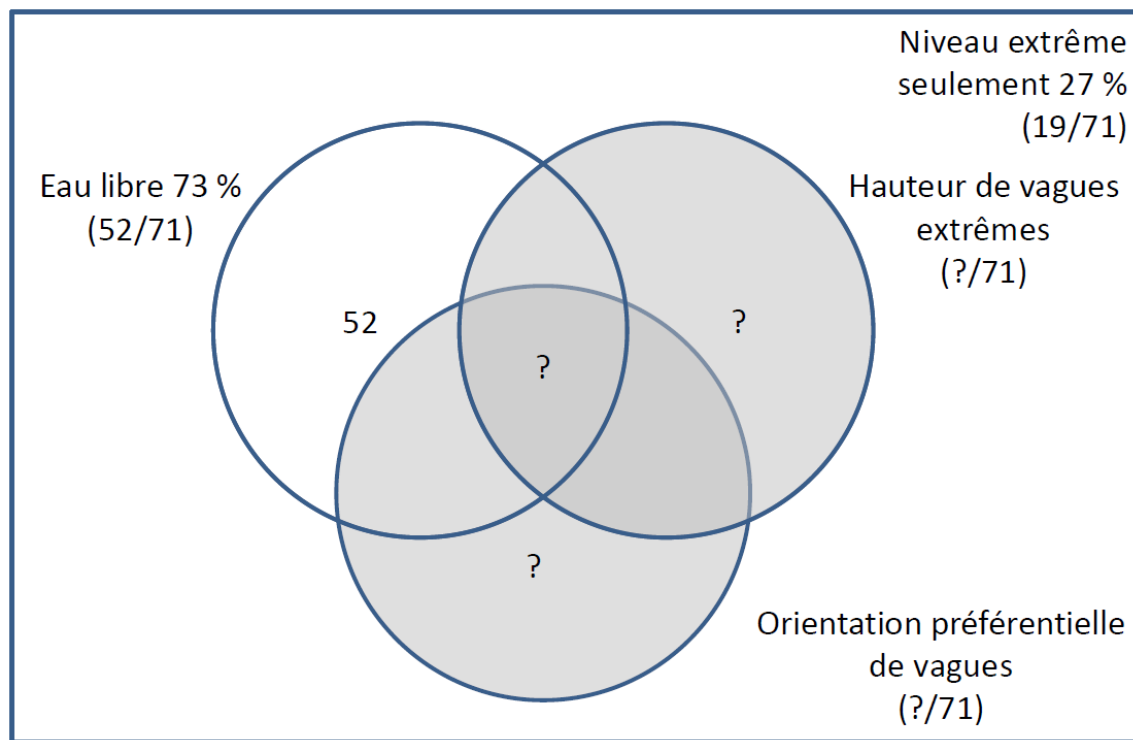


Figure 24 – Diagramme de Venn pour Rivière-Ouelle

D'un autre côté, les épisodes historiques ont tout de même été analysés pour calibrer les hauteurs de niveaux avec les niveaux de submersion observés sur le terrain. Au cours de travaux de terrain à la mi-novembre 2015, les traces d'un épisode de surcote du 29 octobre 2015 ont été observées à environ 30 cm du sommet de l'aboteau d'après la hauteur des herbes couchées ont été observées au début novembre 2015 (Figure 25). D'après les archives en ligne du Service Hydrographique Canadien, le niveau total à Pointe-aux-Orignaux a été de 3,19 m durant cet épisode, alors que le niveau géodésique de l'aboteau à cet endroit est de 3,9 m. En retirant un 30 cm pour tenir compte du fait que le niveau atteint n'a pas touché au sommet, cela fait un niveau géodésique de 3,6 m. La donnée marégraphique sous-estime donc de quelques décimètres le niveau géodésique réel de dommages atteint sur la berge. De même, le niveau marégraphique atteint lors de l'épisode de 2010, de 3,93 cm, a dépassé l'aboteau dont la moyenne d'altitude se situe autour de 4,0 à 4,1 m (voir le rapport de Kamouraska, Circé et al., 2016a).



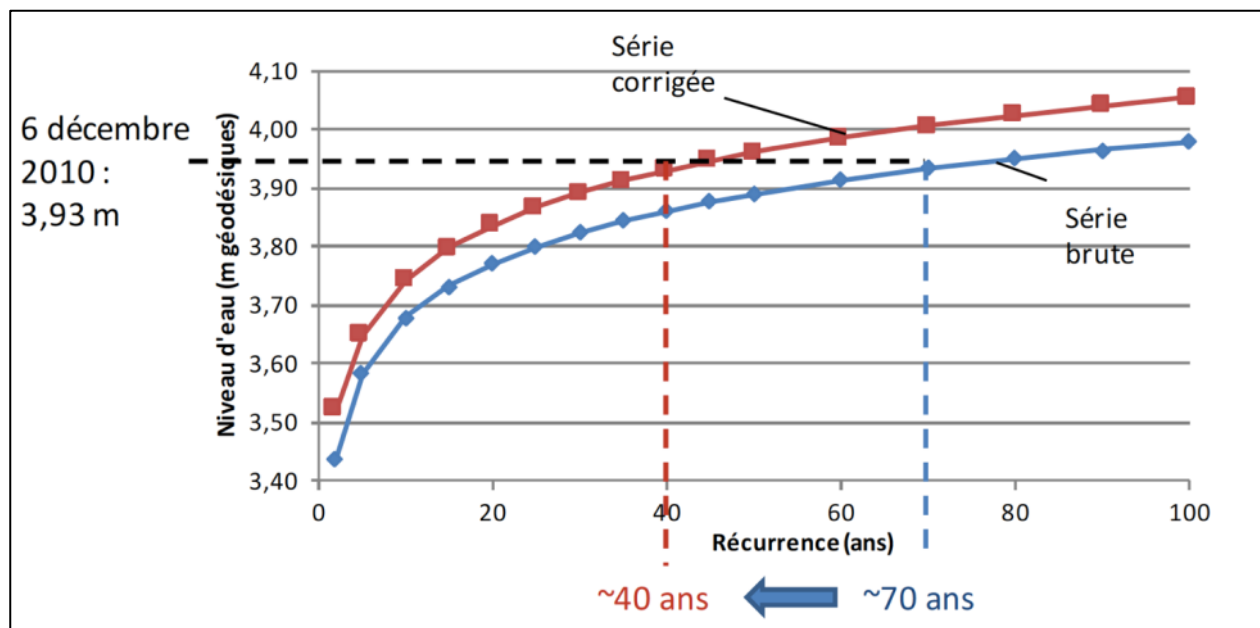
Source : Ouranos, 2015.

Figure 25 – Traces d'un niveau d'eau extrême le 29 octobre 2015 au site de la « pêche à l'anguille » à Rivière-Ouelle

Pour tenir compte de ce décalage en le niveau marégraphique et le niveau réel causant des dommages de submersion, un facteur de correction constant sur la série de données de niveaux d'eau a été développé. Les données pour le construire proviennent des hauteurs d'eau en 2010, et de témoignages et données historiques récoltées lors des entrevues dans le Kamouraska (Ouranos, 2016), tel que résumé au tableau 17. À partir de ces données, une approche conservatrice a été adoptée. Elles indiquent qu'au moins 3 événements de l'ampleur de 2010 ont été observés depuis 1884 : 2010, 1914 et 1884, soit environ 3 en 125 ans. En conséquence, le niveau d'eau géodésique de 2010 a été fixé à environ 40 ans. La correction constante à appliquer entre la récurrence calculée de 3,86 m est donc un ajout de 8 cm pour atteindre le niveau de 3,93 mesuré en 2010. Les récurrences corrigées sont illustrées à la figure 26.

Tableau 17 – Caractéristiques des événements historiques dans le Kamouraska

Date	Niveau géodésique atteint (m)	Commentaires/dommages (source)	Niveau au moins équivalent à 2010
1884-11-05	?	Similaire à 1914 (EK10)	X
1914-11-29	?	« Les journaux titraient "on a pas vu ça depuis 30 ans", l'eau a monté jusqu'aux fenêtres de la cave du bâtiment du syndicat des cultivateurs à St-André (min 10-20 cm de +) qu'en 2010 » (EK10)	X
1941-xx-xx	?	Tempête ayant détruit les aboiteaux construits en 1937 (EK10, MRC de Kamouraska)	
1983-12-xx	?	Dommages documentés par le ministère de la Sécurité publique (EK10)	
2010-12-06	3,93	Dommages de submersion par franchissement rapportés par les agriculteurs (EK08)	X
2015-10-29	3,6	OBSERVATIONS TERRAIN : Les herbes étaient couchées à 1 pied de hauteur du sommet de l'aboiteau à la pêche à l'anguille (aboiteau de Rivière-Ouelle/La Pocatière)	

**Figure 26** – Comparaison des récurrences brutes et corrigées pour Rivière-Ouelle

2.2.2.3 Synthèse de l'analyse combinatoire

Le tableau 18 présente la synthèse des éléments ayant mené à l'élaboration du facteur de correction des récurrences de niveaux d'eau totaux dans les différents sites d'étude.

Tableau 18 – Synthèse de la calibration du facteur combinatoire ou de correction géodésique selon le site d'étude

	Carleton et Maria	Îles-de-la-Madeleine		Rivière-Ouelle
		La Grave	Grande-Entrée	
Évènements de configuration dommageable	1	8	1	52
Total d'évènements	10	121	89	71
% d'évènements de configuration dommageable	10%	6%	Transféré de La Grave	73 %
Probabilité d'évènements dommageables comparée aux évènements de niveau extrême	1 :10	1 :16,67		1 :1,4
Facteur de correction des récurrences de niveau d'eau	10	16,67		(1,4) (non-utilisé)
Facteur de correction géodésique constante	Na	Na		+0,08 m

Ultimement, les ajustements combinatoires ont pour effet d'augmenter les récurrences (réduire les fréquences) d'évènements extrêmes dans les sites d'étude de Mara et Carleton, et des Îles-de-la-Madeleine, alors que l'ajustement géodésique à Rivière-Ouelle a l'effet inverse. En effet, l'évènement du 6 décembre 2010 ou du 21 décembre 2010 est utilisé comme guide pour bien saisir la variation induite par cette correction (Tableau 19).

Tableau 19 – Comparaison de l'effet du facteur de correction combinatoire selon les sites d'étude en se base sur l'évènement de décembre 2010

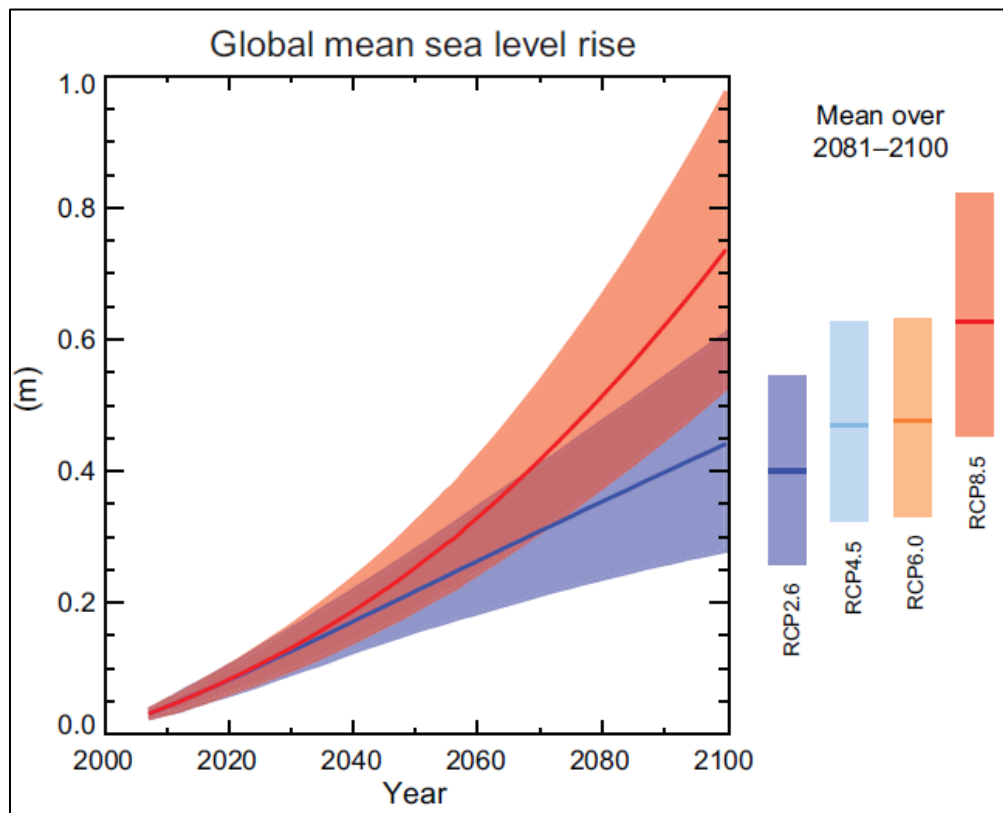
Évènement de décembre 2010	Carleton et Maria	Îles-de-la-Madeleine	Rivière-Ouelle
Réurrence brute (ans)	32	3	70
Réurrence corrigée (ans)	90	25	40
Effet de la correction sur la récurrence	Augmentation	Augmentation	Réduction

2.3. Les récurrences de submersion en conditions futures

En ce qui concerne les niveaux d'eau futurs, trois principaux paramètres modifieront les conditions hydrodynamiques actuelles : la hausse du niveau marin global, le mouvement isostatique du continent et l'adoucissement hivernal.

2.3.1 La hausse du niveau marin

En premier lieu, le niveau marin mondial augmente principalement en raison de la fonte des glaciers et de l'expansion thermique des océans, selon le dernier rapport du GIEC (2013b). La vitesse d'augmentation s'est accélérée depuis 2 décennies et c'est donc avec une faible incertitude que les scientifiques prévoient une hausse du niveau marin mondial, même si plusieurs scénarios sont envisagés. Le scénario de hausse du niveau marin tiré du 5^e rapport du GIEC (2013a) retenu par Didier et al. (2014) est le scénario RCP8.5, qui considère une augmentation croissante des gaz à effet de serre jusqu'en 2100. Ce scénario prévoit à l'échelle mondiale une moyenne de rehaussement de 53-98 cm d'ici 2100 (Figure 27). Il est le plus extrême, mais ce choix est aussi basé sur le fait que certains auteurs considèrent que ces scénarios sous-estiment les valeurs d'augmentation du 21^e siècle (e.g. Horton et al., 2014). Didier et al. (2014) ont réalisé une interpolation des valeurs annuelles à partir d'une polynomiale d'ordre 2 sur les valeurs décennales fournies par le GIEC. Les valeurs utilisées sont constantes pour tous les sites d'étude et se situent à 4 [0,03-0,05] cm, 13 [0,10-0,17] cm et 29 [0,22-0,37] cm comparativement au niveau de 1995, respectivement pour les années 2011, 2030 et 2055 (Tableau 20).



Source: GIEC (2013b) WG1-Summary for policy makers

Figure 27 – Scénarios d’augmentation du niveau marin relatif global en comparaison avec le niveau de 1985-2005, d’après la médiane et les intervalles de confiance 66-100%

Tableau 20 – Variation nette du niveau marin mondial en 2011, 2030 et 2055

Période de référence : 1995 (1984-2005)	Tous les sites d’étude
Variation nette 2011 (m)	+0,04
Variation nette 2030 (m)	+0,13
Variation nette 2055 (m)	+0,29

2.3.2 Le mouvement isostatique

En deuxième lieu, le niveau marin relatif dépend non seulement du niveau eustatique de l’océan, mais aussi du niveau isostatique du continent. En raison de la déglaciation initiée il y a quelque 18 000 ans, l’est du Canada subit encore un ajustement de son niveau isostatique. Les

rapports récents de James et al. (2014) de Han et al. (2015) et de Koohzare et al. (2008) ont été considérés pour cette analyse dans chaque site d'étude.

Dans tous les cas, les données de James sont les plus conservatrices et celles de Koohzare les plus pessimistes. Cette différence pourrait être due à la nature des données considérées : des données de marégraphes pour Koohzare (plus long terme, pourrait contenir la variation eustatique), contre des données de GPS pour James (plus courte série, dont il faut questionner la longueur). Cette incertitude est à évaluer pour le futur.

Toujours est-il que les valeurs de Koohzare ont été choisies par souci de cohérence avec l'analyse initiale de Didier et al. (2014) et parce qu'elles étaient les seules à permettre une extraction locale par interpolation graphique (Annexe C). En effet, les cartes à une échelle pancanadienne de Han et James ne permettaient pas d'extraire une donnée précise comparé à celle de l'est du Canada de Khoohzare.

Pour Carleton et Maria, l'ajustement sélectionné est un taux constant de -1,75 mm (subsidence), pour les Îles-de-la-Madeleine, le taux est de -3,5 mm/an (subsidence) et pour Kamouraska, le taux est de +1,25 mm/an (émersion) (Tableau 21).

Tableau 21 – Valeurs d'ajustement isostatique selon le site d'étude

Ajustement isostatique	Carleton et Maria	Îles-de-la-Madeleine	Rivière-Ouelle
Taux (m/an)	-0,00175	-0,0035	0,00125
Variation nette 2011 (m)	-0,02800	-0,0560	0,02000
Variation nette 2030 (m)	-0,06125	-0,1225	0,04375
Variation nette 2055 (m)	-0,10500	-0,2100	0,07500

En somme, pour la correction des récurrences pour le futur, le niveau marin mondial anticipé selon le scénario RCP 8.5 a été additionné aux variations isostatiques, avec 1995 comme année de référence dans le cas des deux variables. Cette somme sur 50 ans, mène à des augmentations nettes du niveau marin relatif maximales aux Îles-de-la-Madeleine (50 cm), intermédiaires à Carleton et Maria (40 cm) et minimales à Rivière-Ouelle (22 cm) (Tableau 22).

Tableau 22 – Valeurs nettes de variation du niveau marin relation selon le site d'étude

Niveau marin relatif	Carleton et Maria	Îles-de-la-Madeleine	Rivière-Ouelle
Variation nette 2011 (m)	+0,07	+0,10	+0,02
Variation nette 2030 (m)	+0,19	+0,25	+0,08
Variation nette 2055 (m)	+0,40	+0,50	+0,22

2.3.3 L'adoucissement hivernal

Un dernier paramètre affectant les conditions futures concerne le couvert de glace. L'adoucissement hivernal est une conséquence directe des changements climatiques au Québec et cela se traduit dans le golfe du Saint-Laurent par une réduction marquée du couvert de glace depuis deux décennies (Bernatchez et al., 2008). On attend aussi des hivers libres de glace d'ici 2050 dans le golfe du Saint-Laurent (Ruest et al., 2015; Senneville et Saucier, 2007). Un effet important sur les conditions hydrodynamiques consiste essentiellement en l'allongement de la saison d'eau libre, qui donnera donc lieu à plus de vagues sur l'année. Aucune projection fiable n'est disponible au sujet de la distribution future des extrêmes de vagues suivant cette modification. Il est donc difficile de quantifier cet effet sur les épisodes de submersion. Toutefois, le rapport de Neumeier soutient que la transition hivernale vers des saisons libres de glace est presque terminée aux Îles-de-la-Madeleine (Neumeier et al., 2013, alors qu'elle sera plus lente dans la baie des Chaleurs et l'estuaire figure 7 plus haut).

Ainsi, pour Carleton et Maria, l'analyse de la distribution saisonnière des événements de niveaux d'eau extrêmes susceptibles de présenter des vagues extrêmes a été répétée, cette fois-ci en se basant sur l'hypothèse que la saison englacée en 2055 ne s'étendrait que 2 mois par année (janvier-février). Cette hypothèse est plausible d'après les experts (Senneville et Saucier, 2007). Résultat : la proportion d'occurrences d'un événement extrême en saison déglacée augmente significativement. Elle était de 48% dans l'actuel et elle se situe à 78% lorsqu'on compte un hiver réduit à 2 mois. Conséquemment, les probabilités conjointes partielles d'extrêmes de 1 :10 deviendra 5 :1 $\times$ 4 :3 = 6,5 +/- 0,1 en 2055. Quant aux conditions d'extrêmes maximum, les probabilités conjointes d'extrêmes en situation maximale auront aussi tendance à augmenter. De 3:1, elles ne peuvent que se rapprocher de 2:1 en 2055. En termes de facteur de correction, il s'agissait de modifier la droite de régression qui sert à établir la

probabilité corrigée en fonction de ces deux paramètres (niveau marin augmenté et probabilité facteur de correction réduit en raison de l'augmentation des probabilités en situation d'hiver écourté (Figure 28). Pour 2030, les données sont issues d'une simple interpolation linéaire entre chaque probabilité (1:8,5 pour les extrêmes >3m; 1:2,5 pour les extrêmes maximums).

Pour Carleton et Maria, l'ajustement du niveau marin relatif s'additionne à l'augmentation de probabilité en raison de l'adoucissement hivernal.

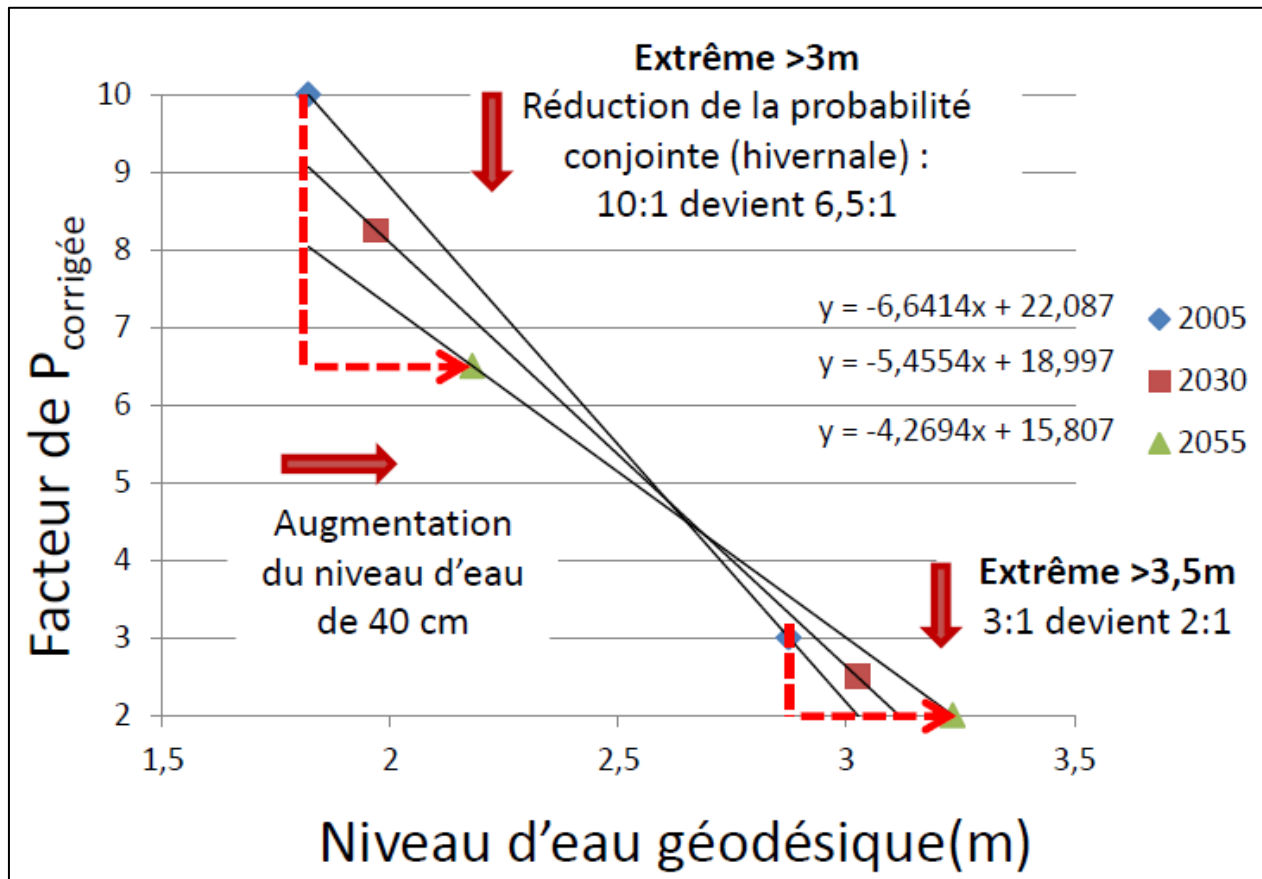


Figure 28 – Facteur de probabilité corrigée en fonction du niveau d'eau géodésique pour 2005, 2030 et 2055

Pour les Îles-de-la-Madeleine, les coréurrences futures supposent des hivers (déjà réchauffés) constants dans le temps. Pour Rivière-Ouelle, vu l'absence d'effet des vagues, les probabilités d'extrêmes ont été considérées constantes dans le temps.

2.3.4 Synthèse : La correction des récurrences de niveau d'eau pour le futur (sans jet de rive)

Considérant l'augmentation du niveau marin relatif et l'effet de l'adoucissement hivernal, les figures 29, 30, 31 et 32 présentent les récurrences actuelles et pour le futur pour chacun des sites. Encore une fois, l'événement guide du 6 décembre 2010 serait de récurrence corrigée d'environ 18 ans dans les conditions actuelles à La Grave, mais devrait devenir de récurrence 5 ans en 2030 et de récurrence inférieure à 2 ans en 2055. À Grande-Entrée, l'évènement de décembre 2010 n'était pas aussi exceptionnel, de récurrence 7 ans, et devrait devenir de récurrence quasi-annuelle en 2055.

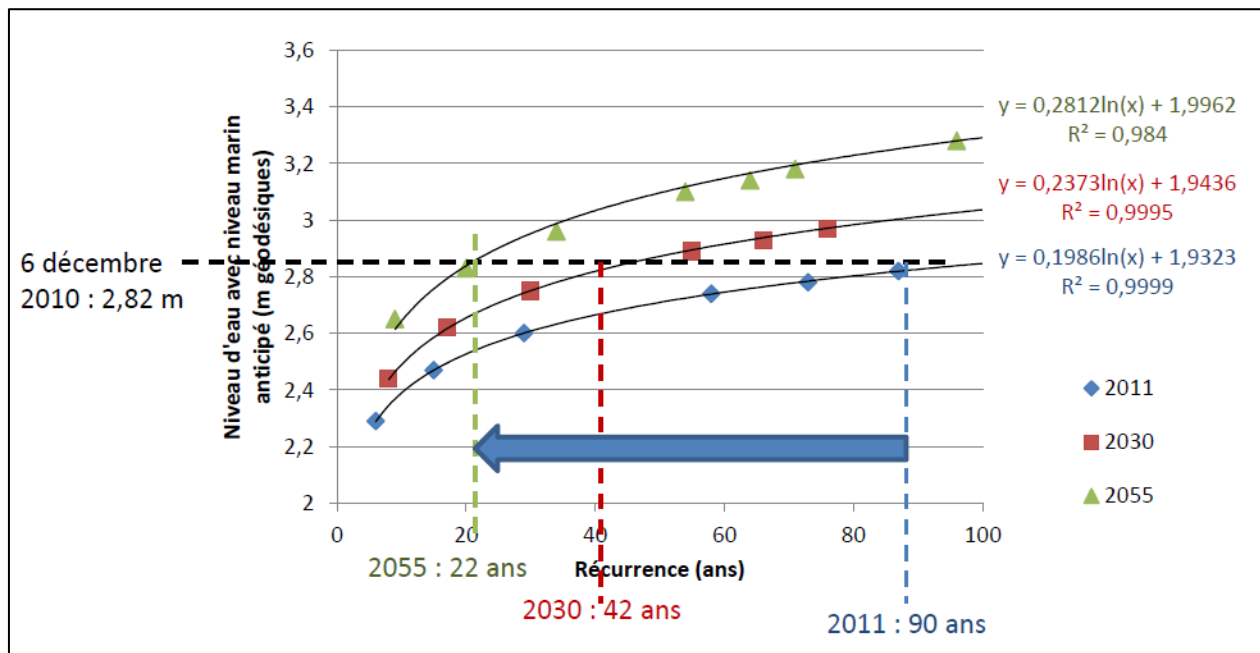


Figure 29 – Niveaux d'eau marégraphiques (par rapport au zéro géodésique) obtenus en se basant sur l'hypothèse des paramètres partiellement dépendants (modifié de Didier et al., 2014) pour Maria.

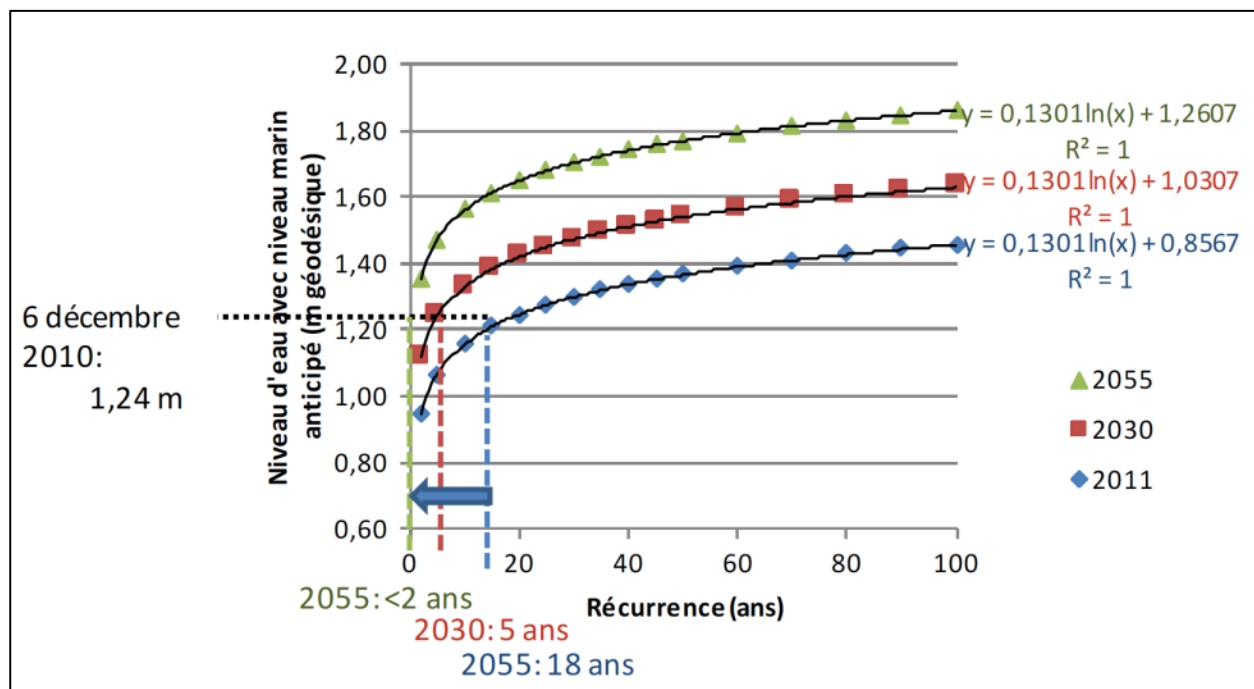


Figure 30 – Niveaux d'eau marégraphiques (par rapport au zéro géodésique) obtenus en se basant sur l'hypothèse des paramètres partiellement dépendants et en incluant le niveau marin relatif anticipé – La Grave

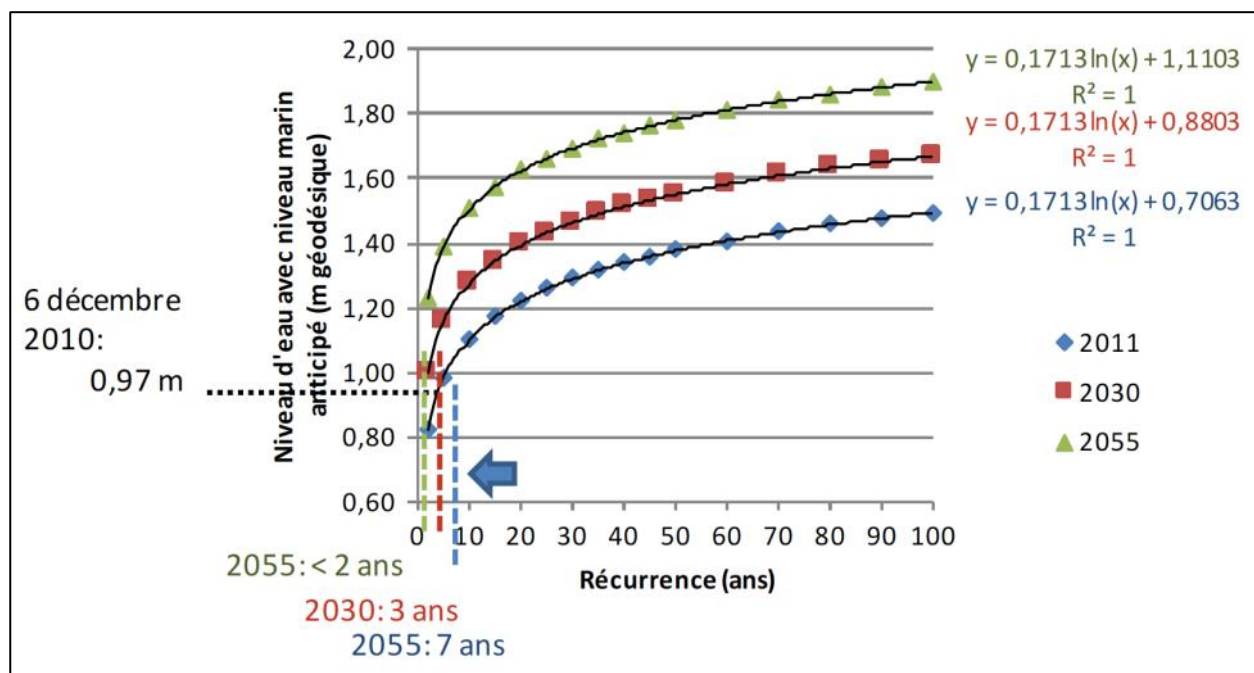


Figure 31 – Niveaux d'eau marégraphiques (par rapport au zéro géodésique) obtenus en se basant sur l'hypothèse des paramètres partiellement dépendants et en incluant le niveau marin relatif anticipé – Grande-Entrée

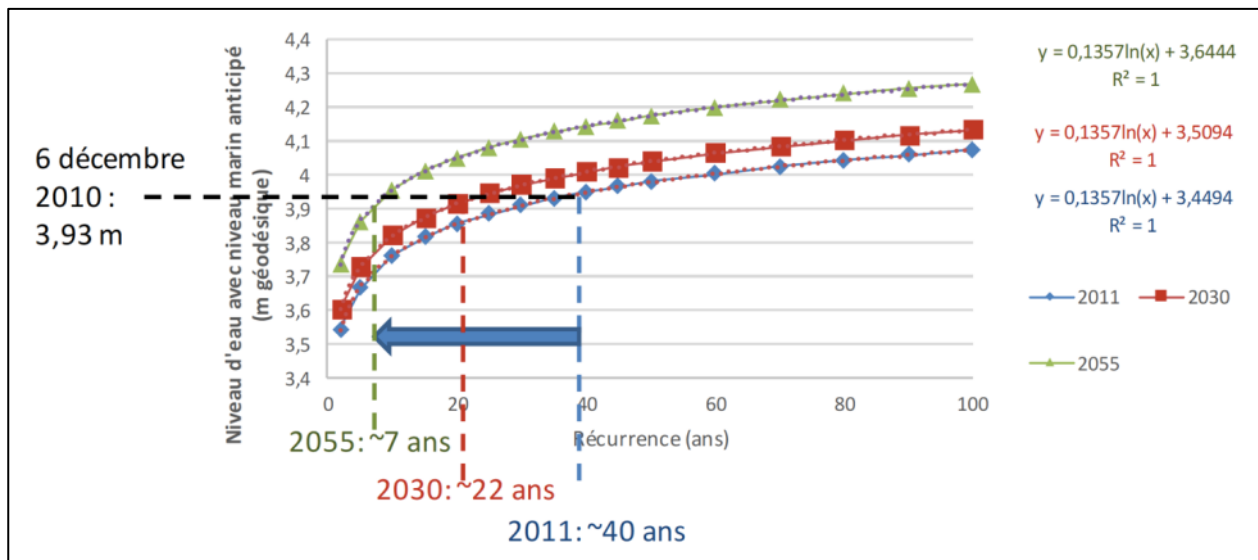


Figure 32 – Niveaux d'eau marégraphiques (par rapport au zéro géodésique) avec correction géodésique constante et en incluant le niveau marin relatif anticipé – Rivière-Ouelle



3. RÉSULTATS : NIVEAUX DE SUBMERSION

Les résultats comprennent des tableaux de niveaux de submersion pour chacun des sites d'étude, ainsi qu'une cartographie de la submersion pour La Grave et le Kamouraska.

3.1 Tableaux de niveaux de submersion

À partir des courbes précédentes et des récurrences de jet de rive, il est possible d'établir des niveaux extrêmes pour le futur en additionnant les niveaux de submersion, comprenant les surcotes, l'augmentation du niveau marin, le facteur de correction des coréurrences et les niveaux de jet de rive pour chacun des sites d'étude (Tableaux 23, 24, 25, 26, 26).

3.1.1 Maria et Carleton

Tableau 23 – Niveaux dommageables de submersion future selon l'hypothèse des paramètres partiellement dépendants pour le secteur à l'est du IGA à Maria et pour Carleton

Récurrence	Niveau marégraphique avec surcote corrigé pour les coréurrences + rehaussement marin			Jet de rive [$R = H_s \cdot 25\%$]	Niveau altitudinal de dommages de submersion		
	2011	2030	2055		2011	2030	2055
(ans)	(m géodésique)			(m)	(m géodésique)		
2	1,70	1,92	2,19	0,36	2,06	2,28	2,55
5	1,96	2,18	2,45	0,40	2,36	2,58	2,85
10	2,17	2,38	2,65	0,42	2,59	2,80	3,07
20	2,37	2,58	2,85	0,44	2,81	3,02	3,29
25	2,43	2,64	2,91	0,45	2,88	3,09	3,36
30	2,49	2,69	2,97	0,46	2,95	3,15	3,43
45	2,69	2,85	3,07	0,47	3,16	3,32	3,54
90	2,82	3,01	3,26	0,50	3,32	3,51	3,76

Source : Didier et al., 2014.

Note : En rouge, épisode du 6 décembre 2010, dont le niveau total est estimé à 4,27 m géodésiques (niv. eau = 2,82 m; jet de rive = 1,47 m); En gris : données hors de l'intervalle de confiance, non utilisées pour le calcul des dommages de submersion.

Tableau 24 – Niveaux dommageables de submersion future selon l'hypothèse des paramètres partiellement dépendants pour le secteur à l'ouest du IGA à Maria

Récurrence	Niveau marégraphique avec surcote corrigé pour les coréurrences + rehaussement marin			Jet de rive [$R = H_s \cdot 89\%$]	Niveau altitudinal de dommages de submersion		
	2011	2030	2055		2011	2030	2055
(ans)	(m géodésique)			(m)	(m géodésique)		
2	1,70	1,92	2,19	1,25	2,95	3,17	3,44
5	1,96	2,18	2,45	1,43	3,39	3,61	3,88
10	2,17	2,38	2,65	1,51	3,68	3,89	4,16
20	2,37	2,58	2,85	1,58	3,95	4,16	4,43
25	2,43	2,64	2,91	1,60	4,03	4,24	4,51
30	2,49	2,69	2,97	1,65	4,14	4,34	4,62
45	2,69	2,85	3,07	1,70	4,39	4,55	4,77
90	2,82	3,01	3,26	1,79	4,61	4,80	5,05

Note : En rouge, épisode du 6 décembre 2010, dont le niveau total est estimé à 4,27 m géodésiques (niv. eau = 2,82 m; jet de rive = 1,47 m); En gris : données hors de l'intervalle de confiance, non utilisées pour le calcul des dommages de submersion.

3.1.2 Îles-de-la-Madeleine

Tableau 25 – Niveaux dommageables de submersion futurs selon l'hypothèse des paramètres partiellement dépendants pour le secteur de La Grave

Récurrence	Niveau marégraphique avec surcote corrigé pour les coréurrences + rehaussement marin			Jet de rive $R = :H_s \cdot 15,5\%$	Niveau altitudinal de dommages de submersion		
	2011	2030	2055		2011	2030	2055
(ans)	(m géodésique)			(m)	(m géodésique)		
2	0,95	1,12	1,35	0,73	1,68	1,85	2,08
5	1,07	1,24	1,47	0,85	1,91	2,09	2,32
10	1,16	1,33	1,56	0,92	2,08	2,25	2,48
15	1,21	1,38	1,61	0,97	2,17	2,35	2,58
20	1,25	1,42	1,65	1,00	2,24	2,42	2,65
25	1,28	1,45	1,68	1,02	2,29	2,47	2,70
30	1,30	1,47	1,70	1,04	2,34	2,51	2,74
35	1,32	1,49	1,72	1,05	2,37	2,55	2,78
40	1,34	1,51	1,74	1,07	2,40	2,58	2,81
45	1,35	1,53	1,76	1,08	2,43	2,61	2,84
50	1,37	1,54	1,77	1,09	2,46	2,63	2,86
60	1,39	1,56	1,79	1,11	2,50	2,67	2,90
70	1,41	1,58	1,81	1,13	2,54	2,71	2,94
80	1,43	1,60	1,83	1,14	2,57	2,74	2,97
90	1,44	1,62	1,85	1,15	2,59	2,77	3,00
100	1,46	1,63	1,86	1,16	2,62	2,79	3,02

Note: En rouge: épisode du 6 décembre 2010 ayant fait des dommages à un niveau estimé autour de 2,29 m géodésique (niv.eau = 1,24 m géod.; jet de rive = 1,05 m)

Tableau 26 – Niveaux dommageables de submersion futurs selon l'hypothèse des paramètres partiellement dépendants pour le secteur de Grande-Entrée

Récurrence	Niveau marégraphique avec surcote + rehaussement marin corrigé pour les coréurrences			Jet de rive (m) $R = H_s * 15,5\%$	Niveau altitudinal de dommages de submersion		
	2011	2030	2055		2011	2030	2055
(ans)	(m géodésique)			(m)	(m géodésique)		
2	0,83	1,00	1,23	0,73	1,55	1,73	1,96
5	0,98	1,16	1,39	0,85	1,83	2,00	2,23
10	1,10	1,27	1,50	0,92	2,02	2,20	2,43
15	1,17	1,34	1,57	0,97	2,14	2,31	2,54
20	1,22	1,39	1,62	1,00	2,22	2,39	2,62
25	1,26	1,43	1,66	1,02	2,28	2,45	2,68
30	1,29	1,46	1,69	1,04	2,33	2,50	2,73
35	1,32	1,49	1,72	1,05	2,37	2,54	2,77
40	1,34	1,51	1,74	1,07	2,41	2,58	2,81
45	1,36	1,53	1,76	1,08	2,44	2,61	2,84
50	1,38	1,55	1,78	1,09	2,47	2,64	2,87
60	1,41	1,58	1,81	1,11	2,52	2,69	2,92
70	1,43	1,61	1,84	1,13	2,56	2,73	2,96
80	1,46	1,63	1,86	1,14	2,60	2,77	3,00
90	1,48	1,65	1,88	1,15	2,63	2,80	3,03
100	1,50	1,67	1,90	1,16	2,66	2,83	3,06

Note: En rouge: épisode du 6 décembre 2010 ayant fait des dommages à un niveau estimé autour de 1,80 m géodésique (niveau = 1,07 m géod.; jet de rive = 0,80 m)

3.1.3 Rivière-Ouelle

Tableau 27 – Niveaux dommageables de submersion futurs pour le secteur de Grande-Entrée

Récurrence	Niveau marégraphique avec surcote avec correction géodésique constante + rehaussement marin			Jet de rive	Niveau altitudinal de dommages de submersion		
	2011	2030	2055		2011	2030	2055
(ans)	(m géodésique)				(m géodésique)		
2	3,54	3,60	3,74	0,00	3,54	3,60	3,74
5	3,67	3,73	3,86	0,00	3,67	3,73	3,86
10	3,76	3,82	3,96	0,00	3,76	3,82	3,96
15	3,82	3,88	4,01	0,00	3,82	3,88	4,01
20	3,86	3,92	4,05	0,00	3,86	3,92	4,05
25	3,89	3,95	4,08	0,00	3,89	3,95	4,08
30	3,91	3,97	4,11	0,00	3,91	3,97	4,11
35	3,93	3,99	4,13	0,00	3,93	3,99	4,13
40	3,95	4,01	4,15	0,00	3,95	4,01	4,15
45	3,97	4,03	4,16	0,00	3,97	4,03	4,16
50	3,98	4,04	4,18	0,00	3,98	4,04	4,18
60	4,01	4,07	4,20	0,00	4,01	4,07	4,20
70	4,03	4,09	4,22	0,00	4,03	4,09	4,22
80	4,04	4,10	4,24	0,00	4,04	4,10	4,24
90	4,06	4,12	4,26	0,00	4,06	4,12	4,26
100	4,07	4,13	4,27	0,00	4,07	4,13	4,27

Note: En rouge: épisode du 6 décembre 2010 ayant fait des dommages à un niveau estimé autour de 3,93 m géodésique (niveau = 3,93 m géod.; jet de rive = 0 m)

3.2 Cartographie de la submersion

Ces niveaux peuvent aussi être cartographiés à l'aide d'une couche d'altitude comme une couverture LIDAR aérienne, ce qui a été fait pour La Grave et Kamouraska.

3.2.1 La Grave (Îles-de-la-Madeleine)

En premier lieu, 9 planches cartographiques sont présentées ici, pour trois intervalles de temps (l'actuel, 2030 et le 2055) et pour 3 récurrences de référence :

- 1:2 ans dans l'actuel (Figure 33)
- 1:20 ans dans l'actuel (Figure 34)
- 1:100 ans dans l'actuel (Figure 35)
- 1:2 ans en 2030 (Figure 36)
- 1:20 ans en 2030 (Figure 37)
- 1:100 ans en 2030 (Figure 38)
- 1:2 ans en 2055 (Figure 39)
- 1:20 ans en 2055 (Figure 40)
- 1:100 ans en 2055 (Figure 41)

En deuxième lieu, l'épisode du 21 décembre 2010 a été reconstitué et projeté dans le futur (2030, 2055), puisqu'il constitue une référence événementielle qui a marqué la mémoire collective :

- Reconstitution de l'épisode de décembre 2010 (Figure 42)
- Projection de l'épisode de décembre 2010 en 2030 (Figure 43)
- Projection de l'épisode de 2010 en 2055 (Figure 44.)

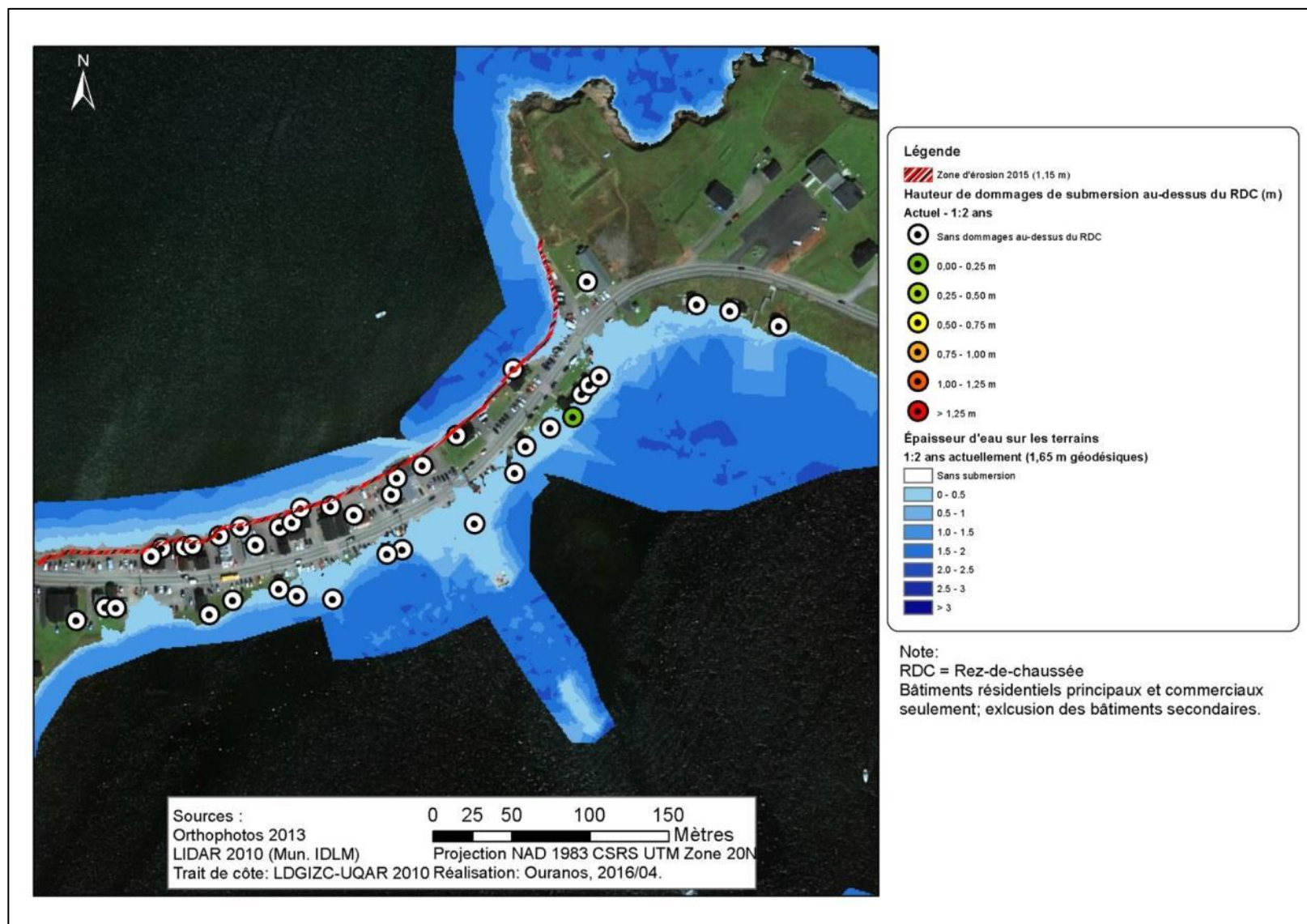


Figure 33 – Étendue de la submersion 1:2 ans dans l'actuel à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)

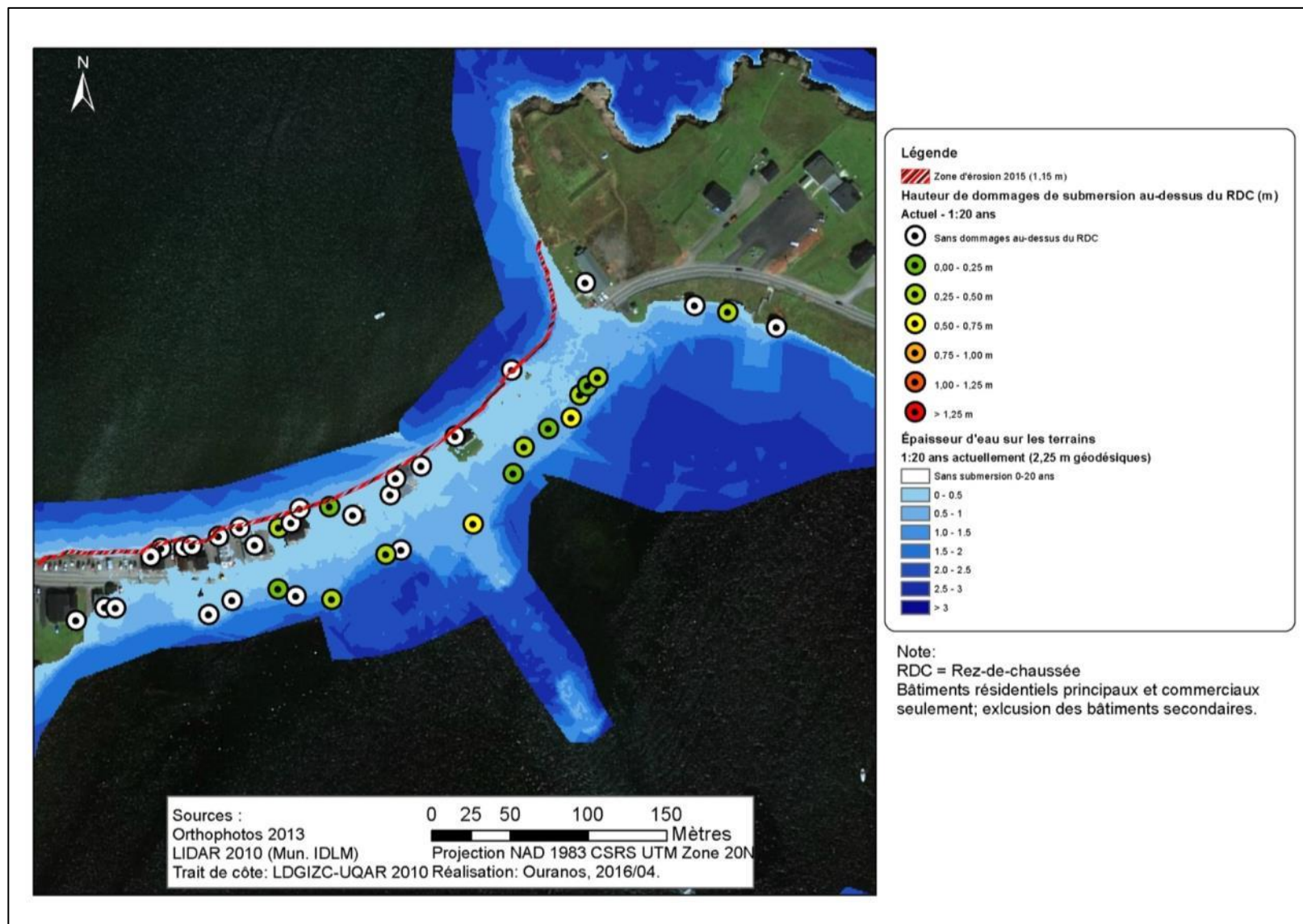


Figure 34 – Étendue de la submersion 1:20 ans dans l'actuel à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)

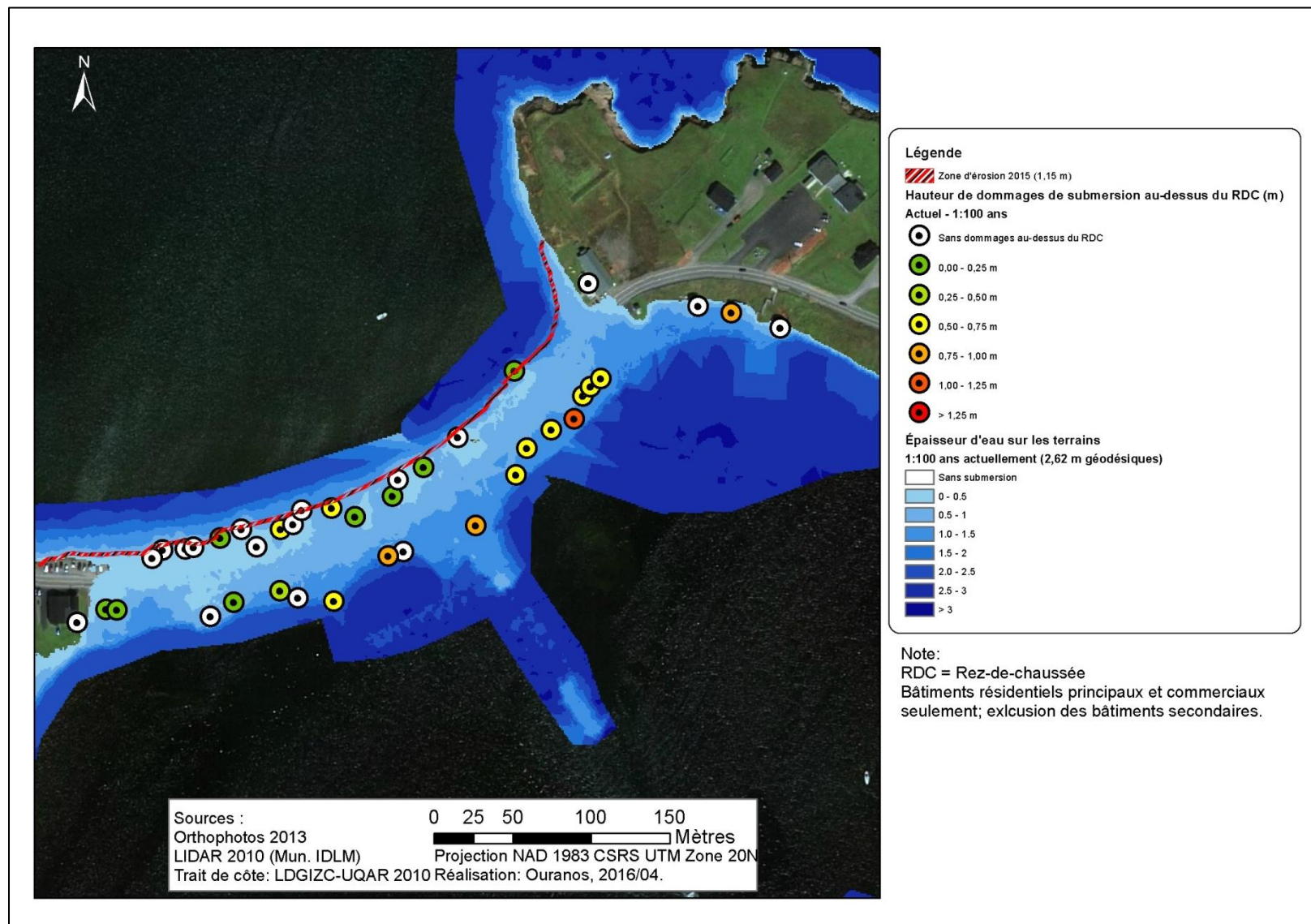


Figure 35 – Étendue de la submersion 1:100 ans dans l'actuel à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)

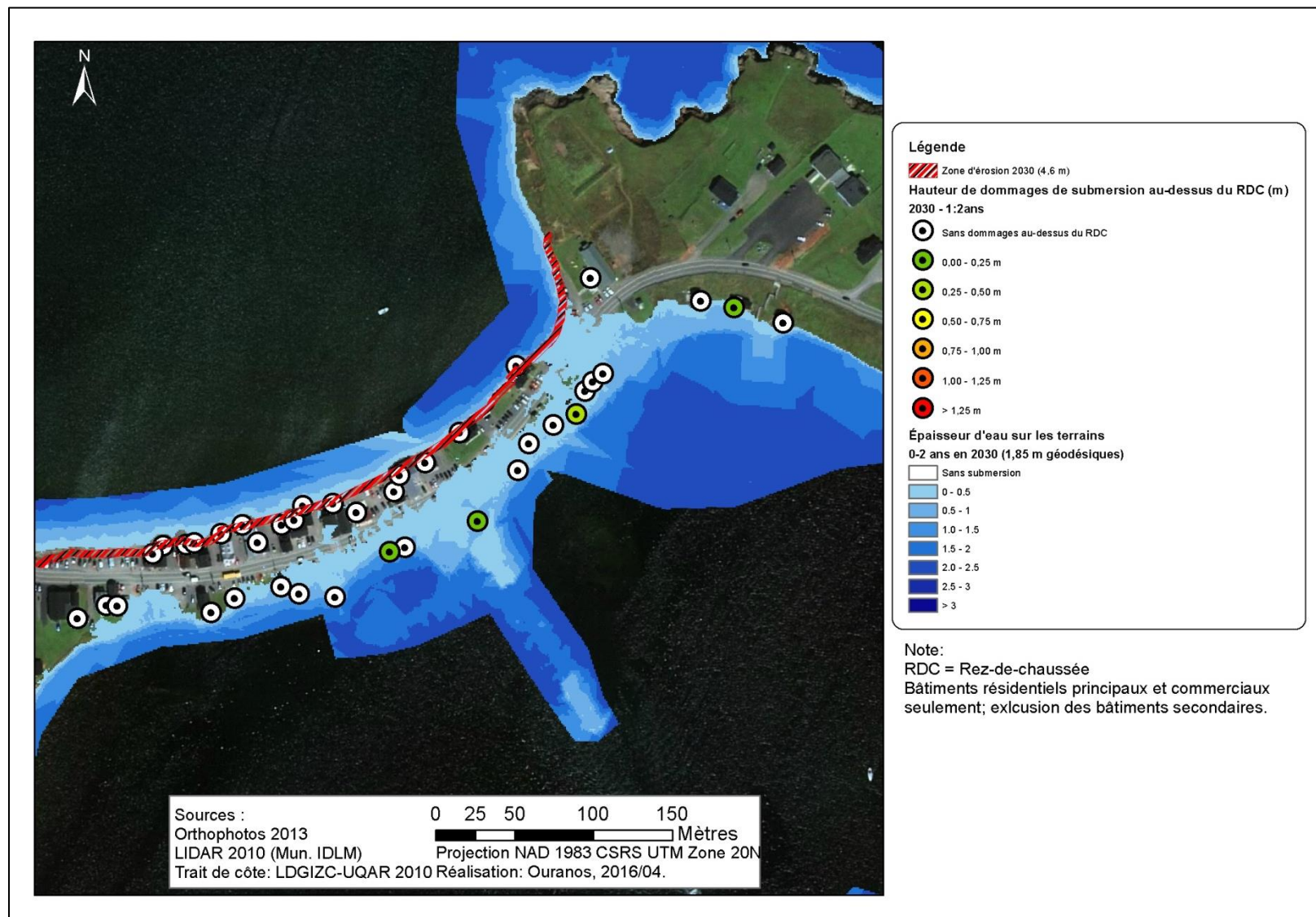


Figure 36 – Étendue de la submersion 1:2 ans en 2030 à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)

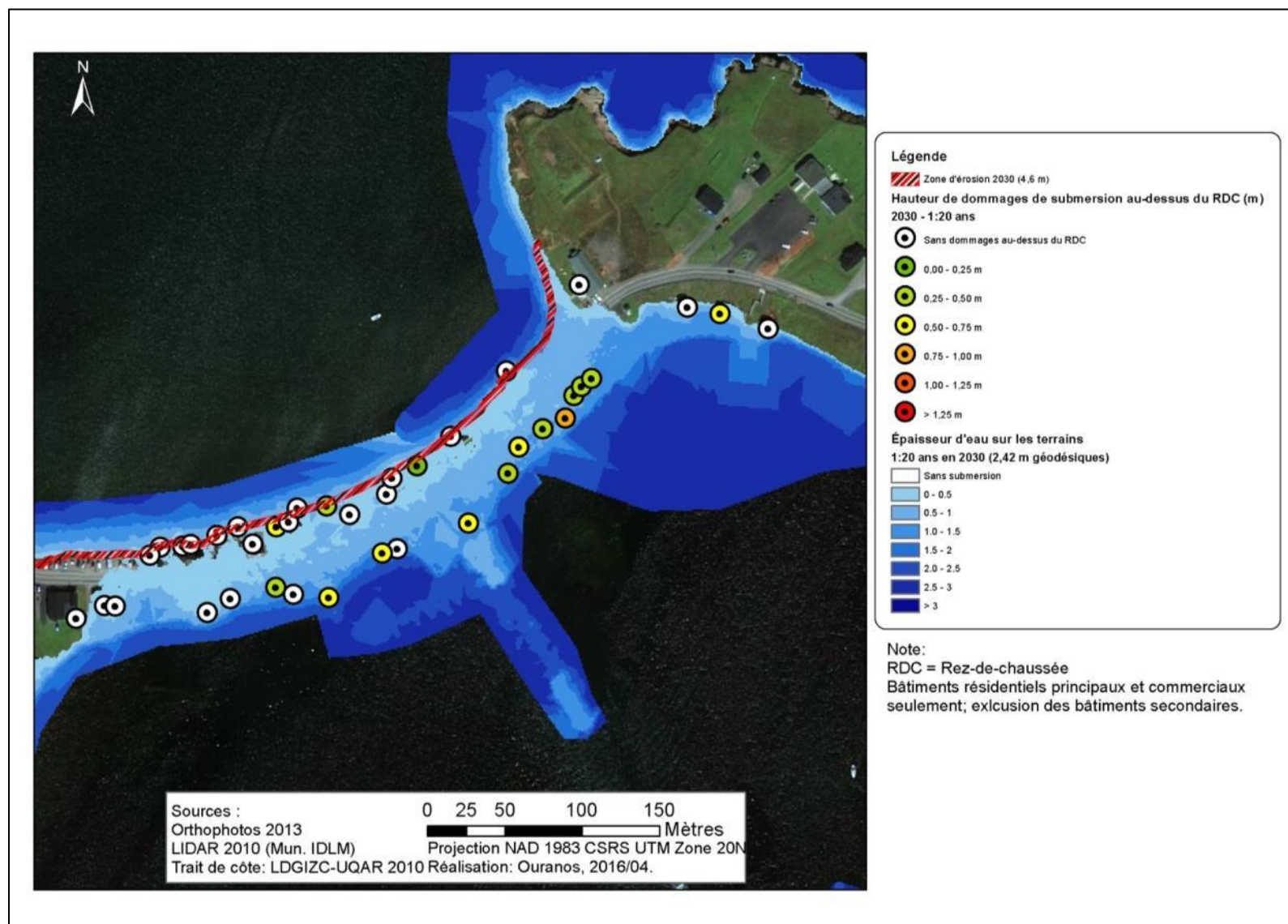


Figure 37 – Étendue de la submersion 1:20 ans en 2030 à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)

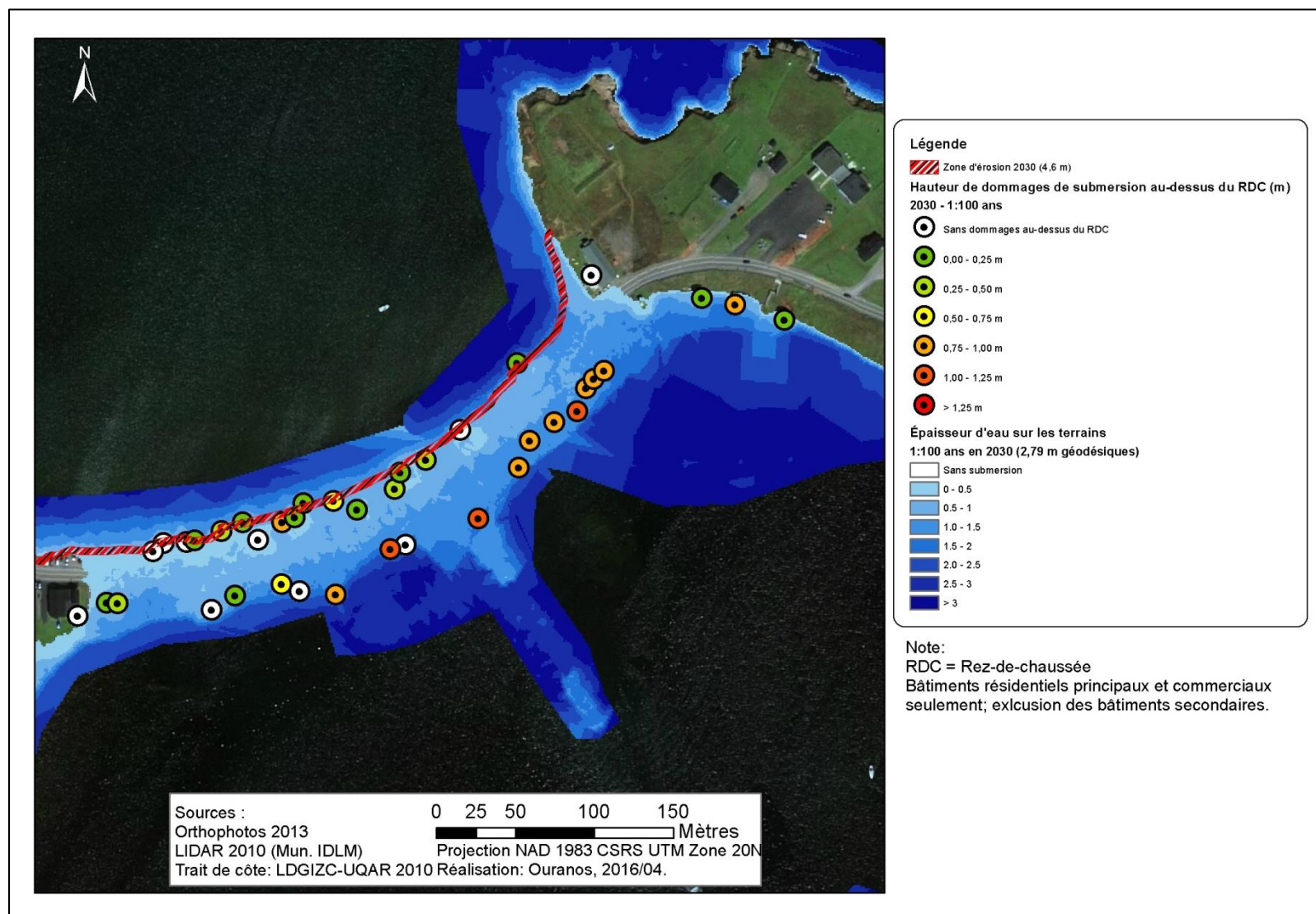


Figure 38 – Étendue de la submersion 1:100 ans en 2030 à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)

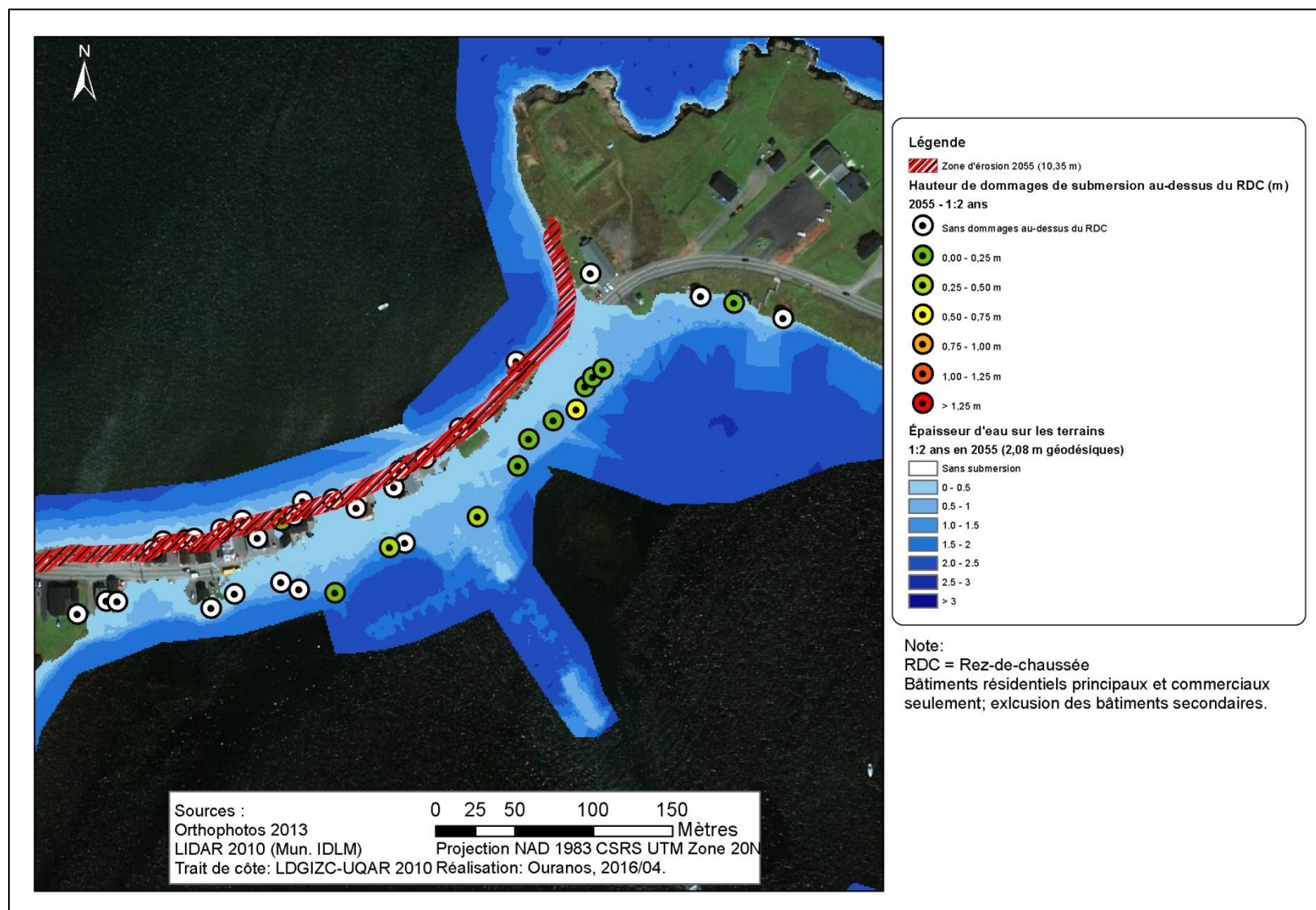


Figure 39 – Étendue de la submersion 1:2 ans en 2055 à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)

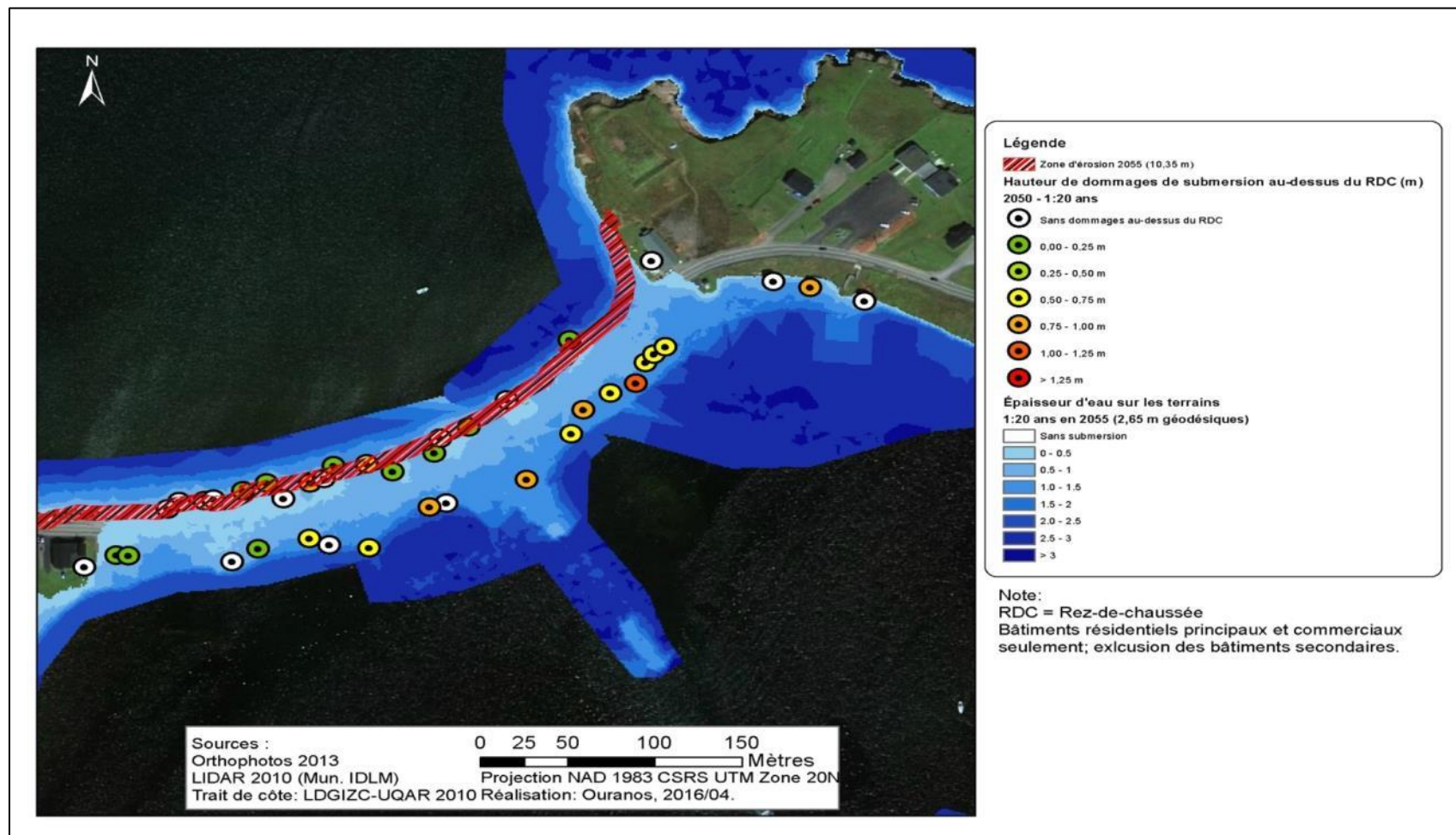


Figure 40 – Étendue de la submersion 1:20 ans en 2055 à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)

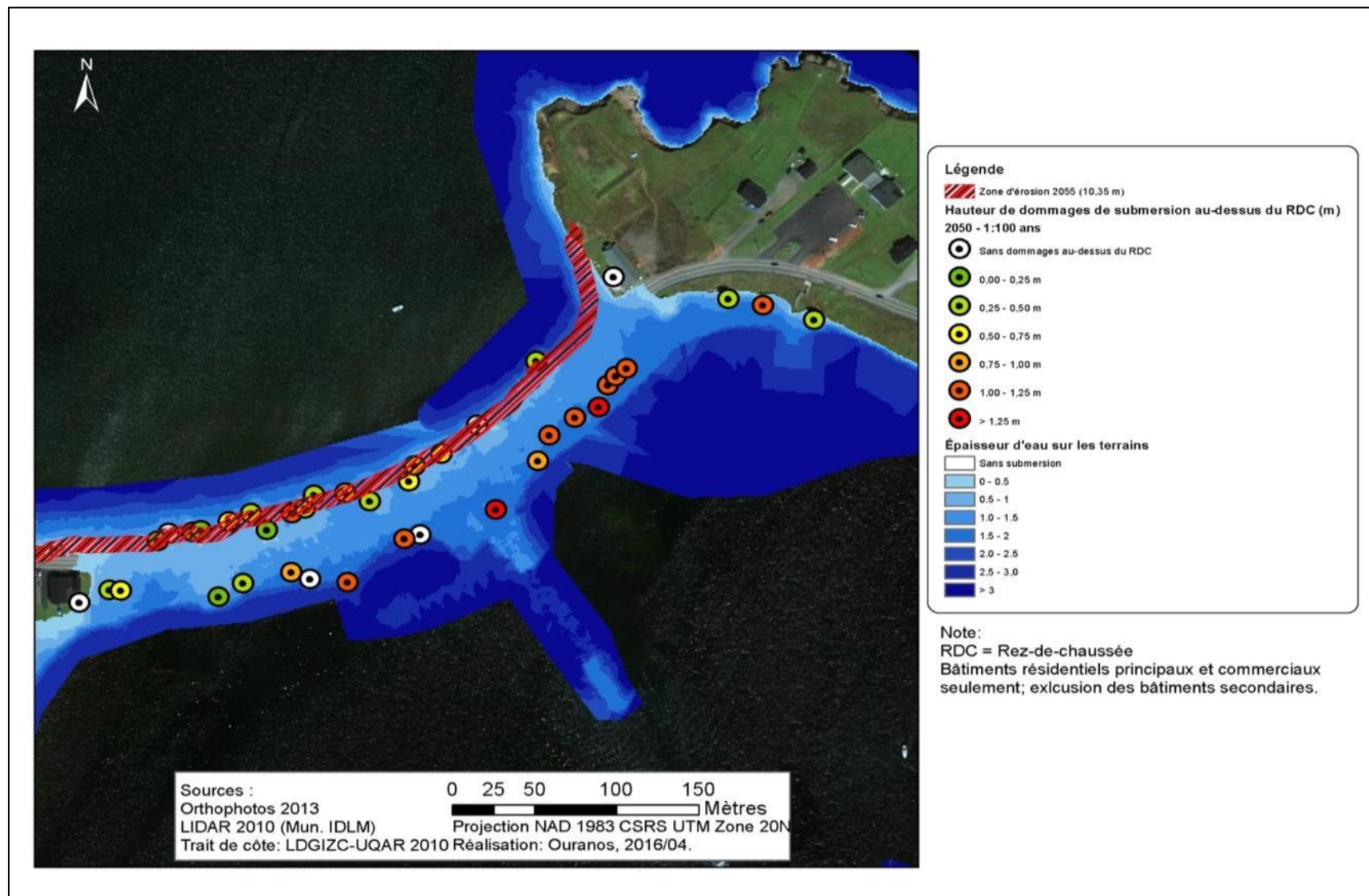


Figure 41 – Étendue de la submersion 1:100 ans en 2055 à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)

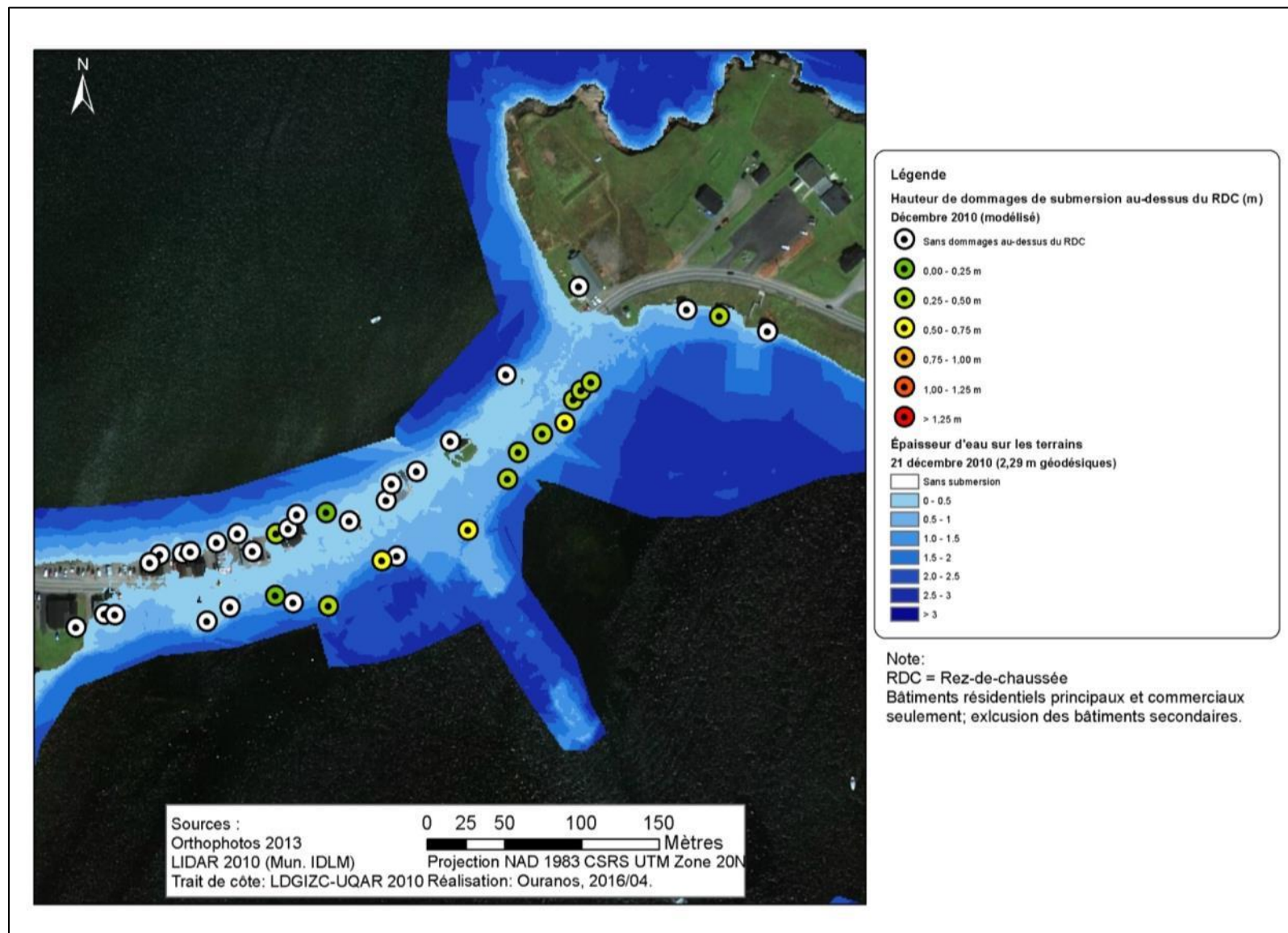


Figure 42 – Étendue de la submersion de l'épisode du 21 décembre 2010 (modélisé) à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)

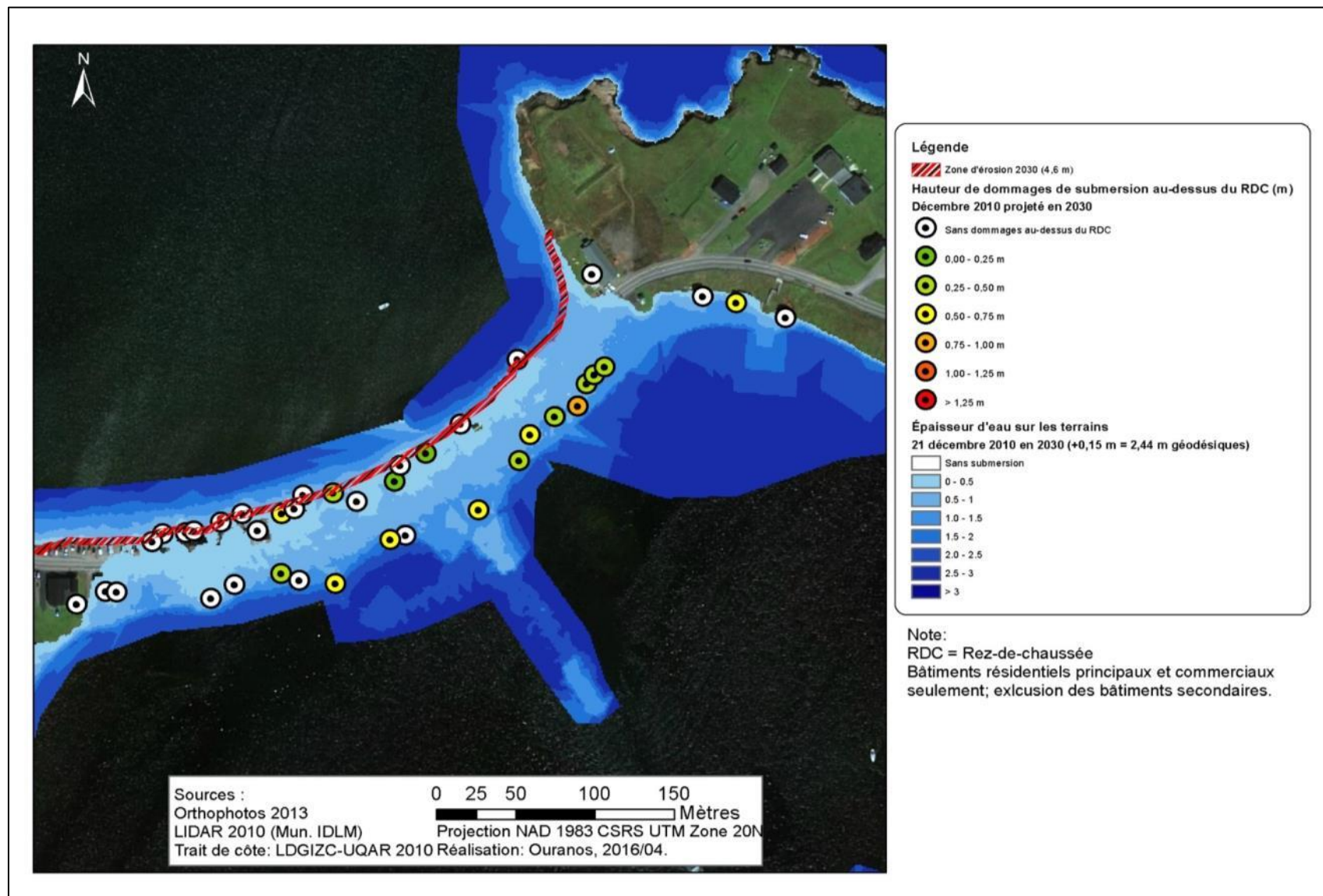


Figure 43 – Étendue de la submersion de l'épisode du 21 décembre 2010 projeté en 2030 à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)

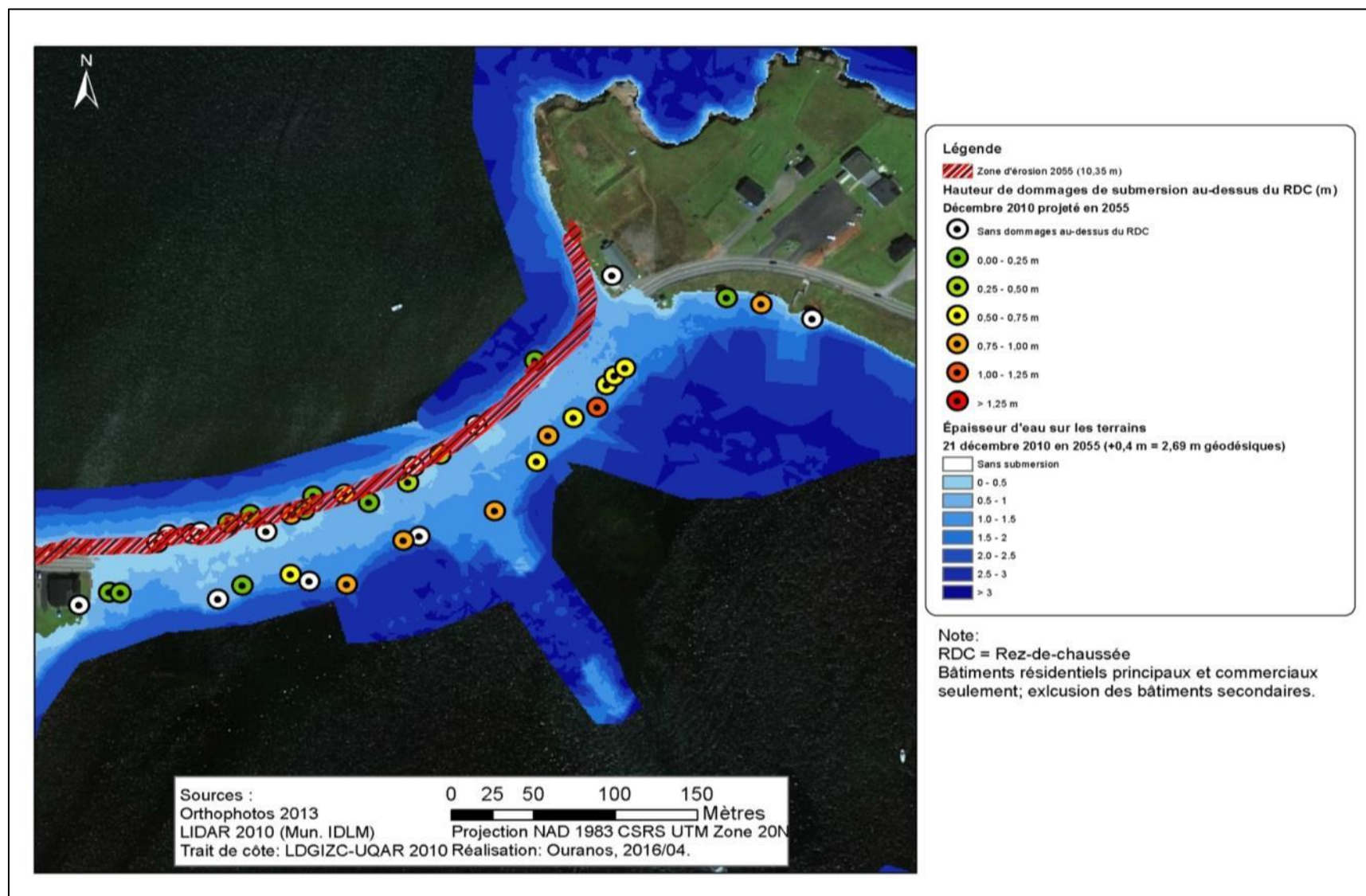


Figure 44 – Étendue de la submersion de l'épisode du 21 décembre 2010 projeté en 2055 à La Grave (Îles-de-la-Madeleine)

3.2.2 Rivière-Ouelle

Pour Rivière-Ouelle, 3 planches cartographiques suivantes sont présentées ici, pour trois intervalles de temps (actuel, 2030, 2055), illustrant l'étendue de la submersion où l'eau pourrait monter dans le cas de brèche ou de démantèlement de l'aboteau, pour l'ensemble des récurrences calculées (2-100 ans) :

- Actuel (ensemble des récurrences) (Figure 45);
- 2030 (ensemble des récurrences) (Figure 46)
- 2055 (ensemble des récurrences) (Figure 47)

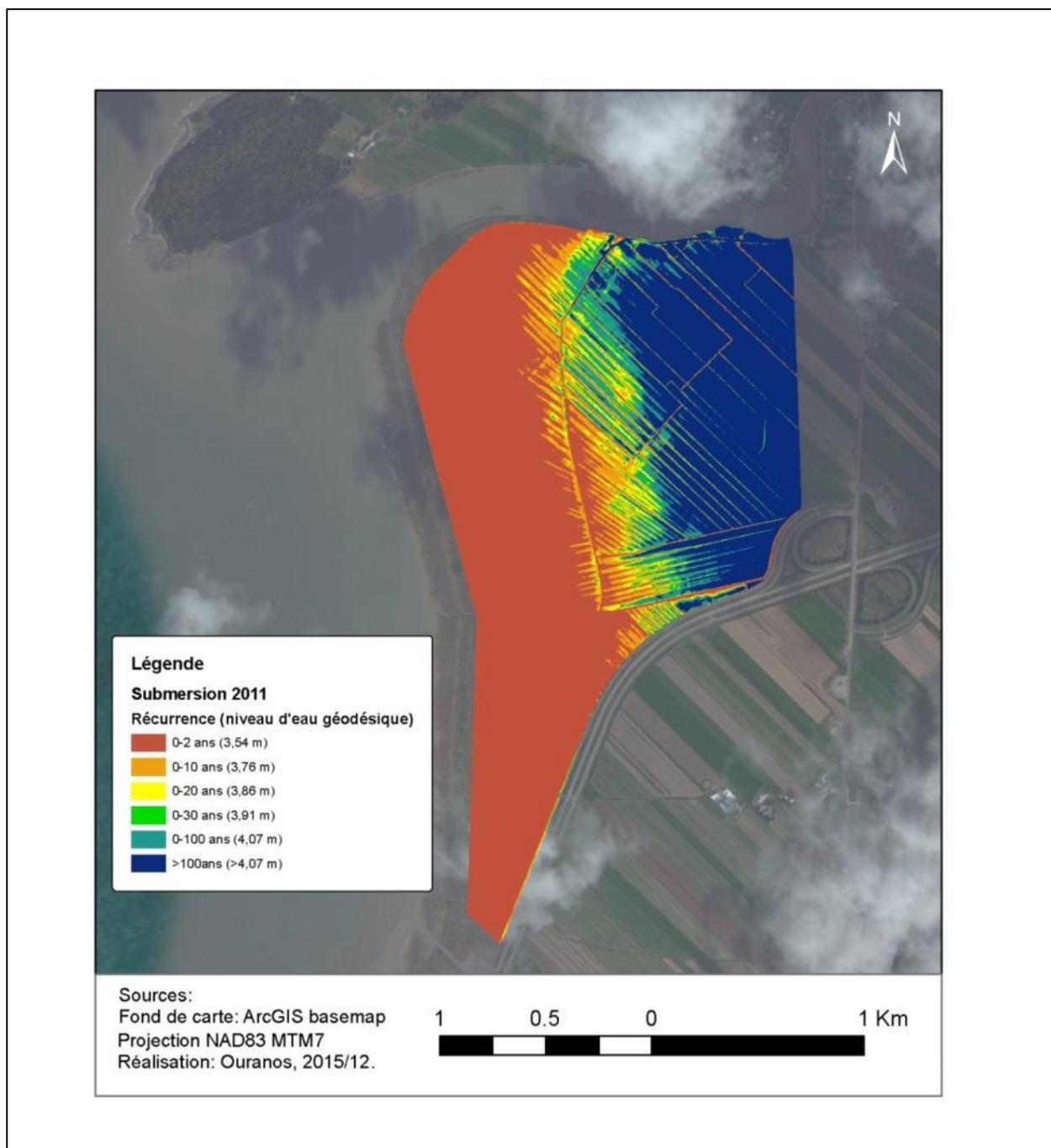


Figure 45 – Étendue de la submersion à Rivière-Ouelle pour les conditions actuelles

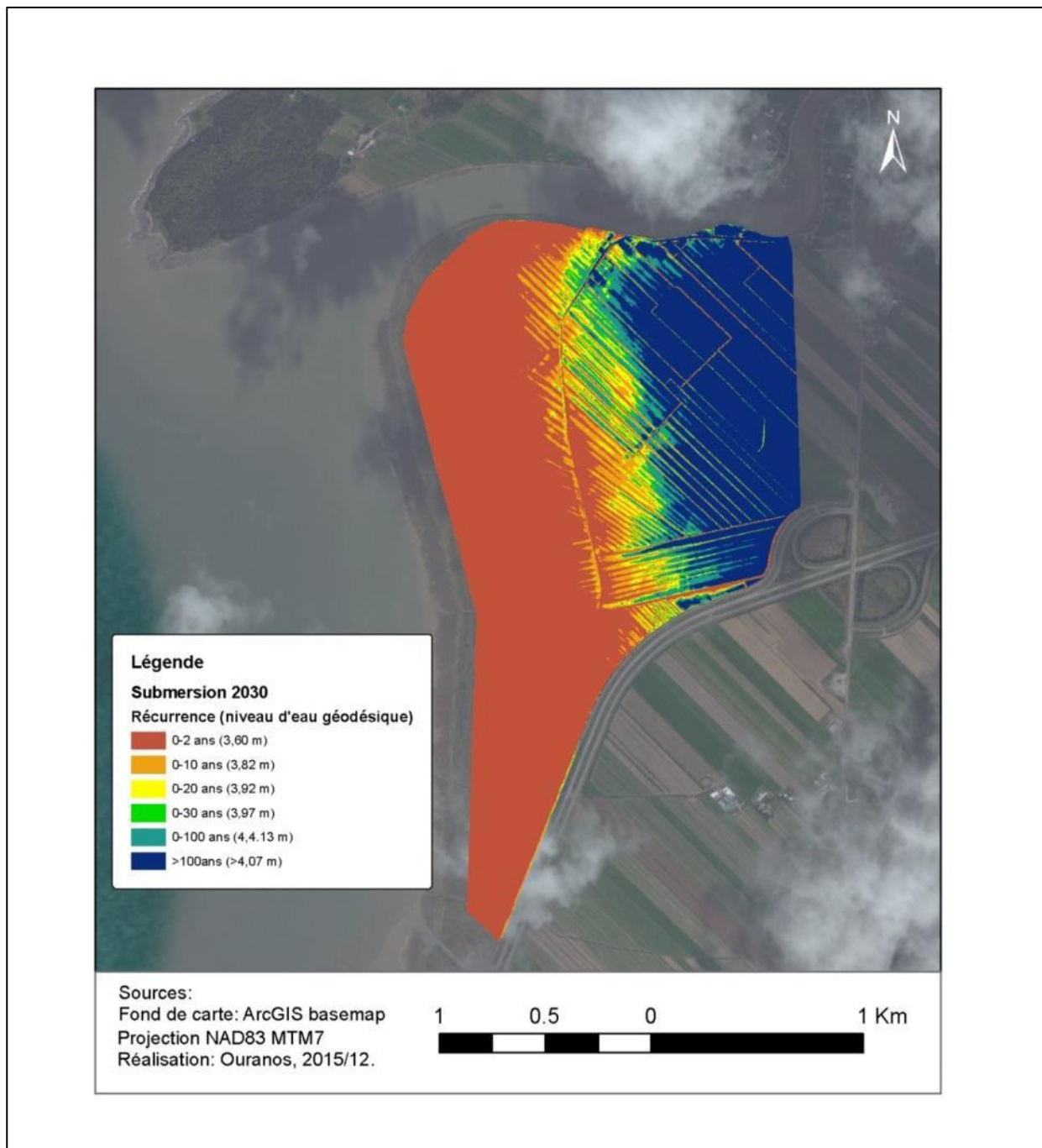


Figure 46 – Étendue de la submersion à Rivière-Ouelle pour les conditions de 2030

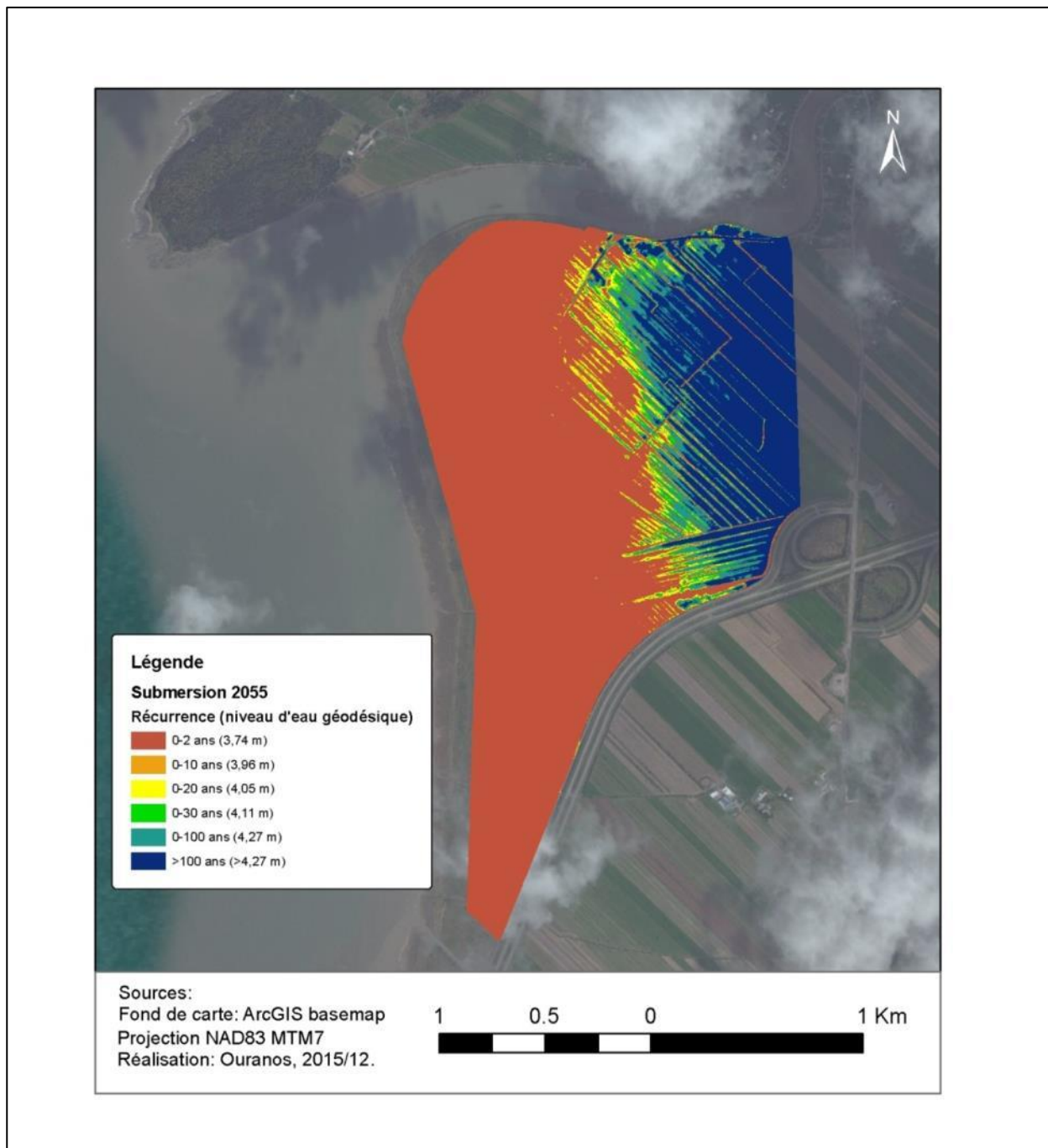


Figure 47 – Étendue de la submersion à Rivière-Ouelle pour les conditions de 2055



4. DISCUSSION

4.1 Contributions principales

La plus grande contribution de cette démarche a été la calibration des hauteurs de jet de rive pour le secteur Ouest de Maria et pour le site de La Grave, à partir des séries de données les plus à jour de vagues et de niveaux d'eau. Les mesures de terrain combinées au LIDAR ont permis de calibrer un paramètre d'atténuation des vagues provenant du large spécifique aux sites de Carleton et Maria, et du côté est des Îles-de-la-Madeleine (valide pour La Grave et Grande-Entrée). Pour Maria, le jet de rive a ainsi été estimé entre 1,25 et 1,65 m pour des récurrences entre 2 ans et 30 ans. Pour les Îles, il a été estimé entre 0,73 et 1,16 m de hauteur pour le site de La Grave pour des récurrences entre 2 et 100 ans. Ces valeurs sont presque au moins le double que le jet de rive calculé à Maria par Didier et al. (2014), ce qui est cohérent avec des hauteurs de vagues au large également plus élevées aux Îles et une atténuation moins forte dans le cas d'un profil de plage artificialisé par la présence d'un mur pour le cas de Maria zone ouest. Ces efforts ont mené à la cartographie des niveaux dommageables de submersion pour le secteur de La Grave.

Dans le cas de Rivière-Ouelle, l'absence de série de vagues et les évidences que le jet de rive n'avait pas une contribution majeure dans la submersion ont plutôt mené directement à la calibration des hauteurs dommageables de submersion. Elles sont minimalement de 3,24 m géodésiques dans l'actuel (1:2 ans) et maximalement de 4,27 m géodésiques (1:100 ans). Ces calculs ont aussi mené à la réalisation d'une cartographie des niveaux dommageables de submersion pour le secteur de Rivière-Ouelle.

Le troisième résultat intéressant est l'analyse croisée des événements de niveaux d'eau extrêmes, qui a permis de calibrer un paramètre de correction des corrélures niveaux d'eau-vagues extrêmes pour les sites de Maria et Carleton, et ceux Îles-de-la-Madeleine. Cette démarche a été faite à titre exploratoire plutôt qu'avec une méthode basée sur des seuils d'extrêmes. Toutefois, cette piste mériterait d'être investiguée davantage en utilisant des statistiques combinatoires permettant de déterminer la distribution des différentes combinaisons de vagues et de niveaux d'eau extrêmes.

4.2 Incertitudes principales

Du côté des incertitudes, elles sont multiples et ne seront pas toutes abordées en détails ici.

Il est à souligner que la donnée avec la plus faible incertitude est le taux d'événements ayant une configuration pour produire des dommages de submersion (1:16,67 événements) avec un échantillon d'une taille n de 121.

Les plus grandes incertitudes concernent les paramètres et variables suivants :

- Incertitude sur le jet de rive : adoption d'un paramètre empirique d'atténuation des vagues du large, faute de formule donnant des résultats satisfaisants en regard des épisodes mesurés sur le terrain;
- Durée de la saison hivernale : pour les Îles l'actuel (3 mois) et le futur (3 mois) sont constants et cette absence de variation est une hypothèse approximative;
- Linéarité du facteur de correction des corélures dans le temps (2011, 2030, 2055) : il est possible que les plus hauts niveaux d'eau se rapproche d'une situation de dépendance totale avec les vagues extrêmes, même si la corrélation statistiques des niveaux extrêmes et vagues extrêmes est pratiquement nulle (Annexe C); de même, à Maria, les courtes durées des données ne permettaient de générer suffisamment d'événements à configuration optimale pour confirmer cette hypothèse.
- Niveau marin mondial : ces incertitudes appartiennent au domaine des experts mondiaux, mais elles influencent les niveaux locaux (Horton et al., 2014). Bien que le choix du scénario RCP 8.5 paraît alarmiste, les experts s'entendent pour dire que les scénarios du GIEC AR5 sous-estiment l'augmentation attendues.

- Variations isostatiques : il pourrait avoir surestimation de la vitesse d'enfoncement d'environ 1 mm/an puisque Koozhare est le scénario le plus pessimiste en comparaison avec Han et al. (2015) et James et al., (2014).
- Importance des mesures de terrain à Grande-Entrée et Rivière-Ouelle : peu de bâtiments sont présents dans ces secteurs et cela a limité la possibilité d'y calibrer le jet de rive.
- Méthode de dépassement du seuil à Maria et Carleton : pour le choix du seuil de niveau d'eau extrême à Maria et Carleton, l'utilisation du plus petit maximum annuel plutôt que la méthode de l'histogramme aurait haussé le seuil d'une vingtaine de cm (à 2,01 m géodésique). Les retombées sur les résultats sont mineures considérant l'ensemble des incertitudes. Toutefois, ce choix implique un plus petit nombre d'extrêmes analysés, et la probabilité de coréurrence pourrait être sous-évaluée, car l'échantillon considéré comporte possiblement davantage d'événements de forts niveaux d'eau, mais sans vagues extrêmes, ce qui entraîne une surcorrection du facteur selon l'hypothèse des paramètres partiellement dépendants et donc une sous-estimation des probabilités de submersion de l'ordre de quelques centimètres. Considérant des incertitudes importantes comme celle de l'altitude du LIDAR (20 à 30 cm), l'impact sur les résultats est cependant négligeable.

Enfin, l'interprétation des données d'événements extrêmes suggère une limite importante relative à la série de vagues. En effet, une étude sur les événements côtiers dommageables dans l'est du Québec révèle que 18 épisodes de vagues de tempête ont touché les Îles-de-la-Madeleine, dont 6 avec submersion (d'après Bernatchez et al., 2012). Parmi les 8 événements identifiés dans la présente étude, seul l'événement de décembre 2010 était recoupé avec la base de données de l'UQAR. D'une part, une partie des événements de cette base de donnée pourrait avoir touché les Îles sans avoir touché La Grave, comme celui du 21-22 décembre 2008 qui a fait des dommages à Grande-Entrée répertoriés par Tita (2015) et qui était dans la banque de données de l'UQAR. D'autre part, la série de niveau d'eau de Xu à elle seule permet d'identifier les 6 événements avec submersion de l'UQAR. La limite dans l'identification des événements proviendrait donc de la série de vagues. Malgré sa validité sur des statistiques d'ensemble comme le confirme le faible décalage par rapport à la série d'Environnement Canada, cette série semble donc limitée en termes de reconstitution des événements passés, comparativement à la série de niveau d'eau. La reconstitution d'événements de vagues constitue une piste de recherche prometteuse.

4.3 Différences méthodologiques

Le tableau 28 résume les principales différences méthodologiques entre les sites d'étude.

Tableau 28 - Résumé des principales différences méthodologiques

Site	Maria		Carleton-sur-Mer	Îles-de-la-Madeleine		Rivière-Ouelle	
Secteur	Ouest	Est		La Grave	Grande Entrée		
Méthode de calcul des récurrences	Ajustement à la distribution de Pareto généralisée			Ajustement à la distribution de Gumbel			
Données de vagues	Données d'environnement Canada 2004-2007			Données de Neumeier et al. 1979-2011	Aucune donnée		
Méthode de calcul du jet de rive	Ratio R:Hs	R2%	Ratio R:Hs	Ratio R:Hs	Ratio R:Hs		
Correction des niveaux d'eau	Analyse combinatoire	Analyse combinatoire	Analyse combinatoire	Analyse combinatoire	Correction géodésique constante		
Conditions futures	Niveau marin relatif + adoucissement hivernal	Niveau marin relatif	Niveau marin relatif	Niveau marin relatif	Niveau marin relatif		

4.3.1 Méthode de calcul des récurrences

Les récurrences historiques ont été calculées grâce à la théorie des valeurs extrêmes (Coles, 2001). Pour les séries de vagues et de niveaux d'eau communes à Maria et Carleton, en raison de la courte longueur de la série de vagues (11 ans), il fallait proscrire une approche par maximums annuels. La préférence est donc allée pour une méthode de dépassement de seuil suivie d'un ajustement à la distribution de Pareto. Aux Îles-de-la-Madeleine et dans à Rivière-Ouelle, où les séries de niveaux d'eau et de vagues s'étendent sur plus de 30 ans, la méthode plus traditionnelle par maximums annuels suivie d'un ajustement de la distribution de Gumbel a été utilisée. La différence entre les deux méthodes pour les niveaux d'eau à Carleton et Maria est inférieure à 1 cm, sauf pour le 0-2 ans (3 cm). Dans le contexte du projet des analyses coûts avantages, cette différence a une portée mineure : il s'agit de quantités qui sont bien inférieures

à l'incertitude sur l'altitude de bâtiments (LIDAR : 3 à 30 cm) et qui sont captées dans les analyses de sensibilité sur les niveaux de submersion. La distribution de Gumbel a quand à elle été préférée pour les derniers sites d'étude pour sa robustesse statistique (r^2 toujours supérieur à 0,95) et pour sa simplicité d'utilisation (chiffrier modèle disponible sur demande).

Pour les Îles, la sortie d'un rapport en 2013 (Neumeier) où plusieurs problèmes avec le modèle de vagues GENER ont été réglés a permis de s'appuyer sur des séries de vagues plus longues (33 ans). Ceci a permis d'obtenir des récurrences 100 ans avec confiance. La limite principale est dans la fiabilité de la reconstitution historique, comme discuté plus haut dans les incertitudes principales (4.2). Par contre, les statistiques d'ensemble ont s'ajustent de manière très satisfaisante avec la distribution de Gumbel, ce qui permet d'avoir confiance dans les récurrences de vagues.

Pour Rivière-Ouelle, caractérisé par l'absence de données de vagues, voir la section 2.1.2.1 expliquant la portée somme toute mineure de cette limitation.

4.3.2 Calcul du jet de rive

Le rapport de Didier et al. (2014) pour Maria a fourni une méthodologie basée sur l'équation universelle de Stockdon et al. (2006) et des chiffres pour les récurrences de vagues et de jet de rive. Toutefois, la démarche était limitée au secteur à l'est du IGA, où les profils de pente étaient naturels. Or, cette méthode ne fonctionne pas pour le secteur à l'ouest du IGA, où le trait de côte est artificialisé par la présence d'un mur de protection. Pour contourner cet obstacle, une relation linéaire entre la hauteur de vague et le jet de rive a été établie (ratio constant $R:H_s$). Ceci revient à dire qu'un pourcentage fixe de l'énergie des vagues se transfère sur la côte en jet de rive. La portion résiduelle est dissipée sous forme de friction en remontant l'estran ou réfléchi vers la mer. Cette proportion a été calibrée empiriquement avec les données LIDAR aérien et DGPS durant les événements de décembre 2010, et validé avec la cartographie de la submersion de l'épisode de décembre 2005 (Bernatchez et al., 2011). Dans tous les cas, il s'agit d'une approche nettement plus réaliste que d'utiliser la pente moyenne naturelle du secteur est.

Cette démarche basée sur la calibration d'un facteur d'atténuation des vagues a été répétée pour les secteurs de La Grave et de Grande-Entrée aux Îles-de-la-Madeleine, puisque l'équation universelle de Stockdon et al. (2006) surestimait du double les hauteurs de jet de rive comparé à la hauteur réelle des dommages de submersion durant les épisodes récents documentés par Tita (2015). Dans les deux secteurs des Îles, un ratio de 15,5% de la hauteur des vagues étaient

le plus à même de reproduire les hauteurs de jet de rive des épisodes de submersion documentés sur le terrain.

La méthode par calibration d'un facteur empirique d'atténuation des vagues ($R:H_s$) pour le secteur anthropique de Maria et pour les Îles-de-la-Madeleine, calée sur les observations de terrain, les témoignages et le LIDAR, a ainsi permis d'estimer des hauteurs et récurrences de jet de rive réalistes relativement à l'hydrodynamique et la géomorphologie spécifiques aux sites à l'étude. Même si cette approximation entraîne une donnée de 10 cm en deçà ou au-delà de la réalité, l'étendue des conséquences concerne à Maria et Grande-Entrée seulement 2-3 bâtiments. À La Grave, il s'agit d'un effet plus marqué, puisque le secteur comprend 44 bâtiments potentiellement soumis à la submersion. Pour l'analyse avantages-coûts, les récurrences de niveaux dommageables de submersion à chaque intervalle de temps permettent de dénombrer les bâtiments où le rez-de-chaussée est touché par un seuil critique fixe de dommages suffisants pour justifier l'immunisation ou le déménagement du bâtiment : la récurrence 0-20 ans. Ce critère est évalué pour chaque bâtiment pour l'actuel, 2030 et 2055. Ainsi, l'incertitude sur le jet de rive implique une variation dans le moment où le rez-de-chaussée d'un bâtiment serait touché par la récurrence 0-20 ans. Toutefois, les témoignages confirment déjà l'exposition fréquente à la submersion de part et d'autres du tombolo de La Grave (voir figure 48; Tita, 2015) et le danger en terme de prise de décision est surtout de sous-estimer les dommages probables. Or, l'analyse conclut déjà à une grande ampleur de dommages anticipés dans le cas de la non-intervention (autour de 40 M\$: Circé et al., 2016b) et il ne risque donc que d'être encore plus avantageux que d'intervenir. Ainsi, le seuil de submersion n'est pas un facteur critique dans l'ensemble, quoiqu'une analyse de sensibilité sur les niveaux dommageables de submersion permettrait néanmoins de renforcer la robustesse des résultats.



Source : Photo de D. Hébert tirée de Tita, 2015.

Figure 48 – Submersion à La Grave le 29 octobre 2000



5. CONCLUSION

Dans l'objectif de soutenir des analyses coûts-avantages d'options d'adaptation côtière au Québec, les niveaux dommageables de submersion ont été calculés pour les sites de Carleton et Maria, les Îles-de-la-Madeleine (La Grave et Grande-Entrée) et Rivière-Ouelle. La méthodologie est originale et s'appuie sur 1) les récurrences de niveaux d'eau total (convertis en niveaux géodésiques), 2) les récurrences de vagues transformées en jet de rive, 3) une analyse combinatoire pour tenir compte de la dépendance partielle entre les vagues et les niveaux d'eau, et 4) une correction pour les conditions futures de niveau marin relatif et d'adoucissement hivernal. Les résultats principaux consistent en tableaux de référence de niveaux dommageables de submersion pour des récurrences 1:2 à 1:100 ans pour chacun des sites à l'étude, ainsi que de planches cartographiques de submersion selon les récurrences et l'intervalle étudié (actuel, 2030, 2055), pour les sites de La Grave et Rivière-Ouelle. Les principales hypothèses méthodologiques et un sommaire des résultats des niveaux dommageables de submersion en 2055 sont présentés au tableau 29.

Le plus grand défi a été de répondre aux limitations des équations de Stockdon et al. (2006) afin de fournir des hauteurs de jet de rive peu importe la situation : en milieu anthropique (pour le secteur Ouest de Maria) et pour des plages aux limites des conditions dissipatives pour les Îles-de-la-Madeleine. L'approche adoptée a été la calibration empirique d'un facteur d'atténuation des vagues, grâce au rapport $R:H_s$, basé sur l'analyse des conditions océanographiques des événements extrêmes passés, des données haute résolution d'altitude (LIDAR) et des témoignages des hauteurs de dommages observés par les citoyens.

Les limites trouvent leur source surtout dans la multitude des sources de données qui comportent chacune leurs incertitudes propres. Par contre, il est nécessaire de fournir des outils décisionnels pour la gestion côtière dans un futur proche. Vu l'ampleur des changements océanographiques et climatiques attendus durant les prochaines décennies, attendre de construire des séries de vagues et niveaux d'eau sans erreur et calibrées sur le terrain n'est pas une option décisionnelle. Il est donc recommandé de poursuivre la recherche sur des méthodes statistiques pour réduire l'incertitude sur les coréurrences de niveaux d'eau pouvant causer de la submersion sur le littoral de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent.

Tableau 29 – Résumé des hypothèses relatives aux niveaux dommageables de submersion

Site	Maria		Carleton-sur-Mer		Îles-de-la-Madeleine			Rivière-Ouelle
Secteur	Ouest	Est	Avec jet de rive	Sans jet de rive	La Grave	GE	GE sans jet de rive	
Ajout niveau marin relatif (cm)								
- actuel	+4	+4	+4	+4	+10	+10	+10	+2
- 2030	+19	+19	+19	+19	+25	+25	+25	+8
- 2055	+40	+40	+40	+40	+50	+50	+50	+22
Hiver : Mois avec couvert de glace	JFMA	JFMA	JFMA	JFMA	JFM	JFM	JFM	Na
Facteur de correction des co-réurrences	3-10	3-10	3-10	3-10	16,67	16,67	16,67	Na
Jet de rive estimé pour décembre 2010 (m)	1,2	0,41	0,41	-	1,07	1,07	-	Na
Hauteur d'eau maximale estimée décembre 2010 (m géodésique)	3,69	2,90	2,90	2,49	2,24	2,61	1,55	3,93
Niveau total corrigé de submersion en 2055 (m géodésique)								
2 ans	3,44	2,55	2,55	2,19	2,08	1,96	1,23	3,74
10 ans	4,16	3,07	3,07	2,65	2,48	2,43	1,50	3,96
30 ans	4,62	3,43	3,43	2,97	2,74	2,73	1,69	4,11
100 ans	-	-	-	-	3,02	3,06	1,90	4,27



6. RÉFÉRENCES

- Bernatchez, P., G. Boucher-Brossard et M. Sigouin-Cantin (2012). Contribution des archives à l'étude des événements météorologiques et géomorphologiques causant des dommages aux côtes du Québec maritime et analyse des tendances, des fréquences et des temps de retour des conditions météorologiques extrêmes. Rimouski, Chaire de recherche en géoscience côtière - LDGIZC-UQAR pour/for Ministère de la sécurité civile du Québec, 140.
- Bernatchez, P., Fraser, C., Lefavre, D. (2008a) Effets des structures rigides de protection sur la dynamique des risques naturels côtiers : Érosion et Submersion. In : J. Locat, D. Perret, D. Turmel, D. Demers et S. Leroueil, (Éd.). Comptes rendus de la 4e Conférence canadienne sur les géorisques: des causes à la gestion. Presses de l'Université Laval, Québec, 594 p.
- Bernatchez, P., Fraser, C., Lefavre, D., Dugas, S., 2011. Integrating anthropogenic factors, geomorphological indicators and local knowledge in the analysis of coastal flooding and erosion hazards. *Ocean & Coastal Management* 54, 621-632.
- Bernatchez, P., C. Fraser, S. Friesinger, Y. Jolivet, S. Dugas, S. Drejza et A. Morissette (2008b). Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques. Rimouski, Chaire de recherche en géoscience côtière - Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières - Université du Québec à Rimouski, 256.
- Balouin, Y. et Belon, R. (2012) – Évaluation des submersions marines lors des tempêtes en Languedoc-Roussillon – Atlas cartographique. Rapport BRGM/RP-61306-FR ; 124 p.
- Circé, M., Da Silva, L., Duff, G., Boyer-Villemaire, U., Desjarlais, C., Morneau, F. (2016a) Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière à Rivière-Ouelle. Ouranos, Montréal. 65 p. + annexes
- Circé, M., Da Silva, L., Duff, G., Boyer-Villemaire, U., Corbeil, S., Desjarlais, C., Morneau F. (2016b) Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière aux Îles-de-la-Madeleine. Ouranos : Montréal. 175 p + annexes
- Coastal Engineering Research Center (1984) Shore protection manual. U.S. Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers.

- Coles, S., 2001. *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer, 208 p.
- Desjardins, L., Ouellet, Y., 1984. Modèles numériques utilisés pour la conception des ouvrages maritimes. Comptes rendus du Colloque sur la simulation numérique appliquée au domaine de la ressource hydrique, dans le cadre du 52e congrès annuel de l'ACFAS, 187–224.
- Didier, D., Bernatchez, P., Boucher-Brossard, G., Lambert, A., Fraser, C., Barnett, R.L., Van Wiertz, S. (2015) Coastal Flood Assessment Based on Field Debris Measurements and Wave Runup Empirical Model. *Journal of Marine Science Engineering* (3): 560-590, doi:10.3390/jmse3030560
- Didier, D., P. Bernatchez et A. Lambert (2014). Scénarios de submersion côtière pour la municipalité de Maria dans le cadre d'une analyse économique. Rimouski, Chaire de recherche en géoscience côtière - LDGIZC-UQAR for/pour Ouranos, 33 + annexes.
- GIEC. (2013a). Annex II: Climate System Scenario Tables [Prather, M., G. Flato, P. Friedlingstein, C. Jones, J.-F. Lamarque, H. Liao and P. Rasch (eds.)]. 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 and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- GIEC. (2013b). Summary for Policymakers. 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 and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Guimarães, P.V., Farina, L., Toldo, E., Diaz-Hernandez, G., Akhmatkaya, E., 2015. Numerical simulation of extreme wave runup during storm events in Tramandaí Beach, Rio Grande do Sul, Brazil. *Coastal Engineering* 95, 171-180.
- Han, G., Ma, Z., Chen, N., Thomson, R., et Slangen, A. (2015). Changes in mean relative sea level around Canada in the twentieth and twenty-first centuries. *Atmosphere-Ocean*, 53(5), 452-463.
- Horton, B. P., Rahmstorf, S., Engelhart, S. E., et Kemp, A. C. (2014). Expert assessment of sea-level rise by AD 2100 and AD 2300. *Quaternary Science Reviews*, 84, 1–6.
- Jacob, D., Perrie, W., Toulany, B., Saucier, F., Lefavre, D., et Turcotte, V. (2004). Wave Model Validation in the St. Lawrence River Estuary. *Proc. 7th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, October 21-25, Banff, Alberta, Canada, 14 p.
- James, T. S., Henton, J. A., Leonard, L. J., Darlington, A., Forbes, D. L., et Craymer, M. (2014). Relative Sea-level Projections in Canada and the Adjacent Mainland United States. *Geological Survey of Canada. Open File*, 7737(72), 10-4095.
- Koohzare, A., Vaníček, P., et Santos, M. (2008). Pattern of recent vertical crustal movements in Canada. *Journal of Geodynamics*, 45(2-3), 133–145.
- Laboratoire d'échohydrologie ECHO de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (2005) Corrigé de l'exercice « estimation des débits de crue pour différents temps de retour par la méthode statistique – Application au bassin versant de la Mentue à Yvonand (VD, Suisse) ». Cours d'Hydrologie

- générale (Prof. André Musy) : Annexe 1 : L'analyse fréquentielle, consulté en ligne 2015/11/23, <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/>
- Lambert, A., Neumeier, U., Jacob, D., et Savard, J.-P. (2013). Évaluation du modèle WAM opéré par Environnement Canada dans le Golfe du Saint-Laurent; résultats intermédiaires pour les années 2010-2011. Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski. Rapport technique remis au Ministère des Transports du Québec. Mai 2013.
- Neumeier, U., Ruest, B., Lambert, A., Bismuth, E., Dumont, D., Jacob, D., Savard, J.P., Joly, S., 2013. Modélisation du régime des vagues du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent pour l'adaptation des infrastructures côtières aux changements climatiques. Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec. Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, projet X009.1, 244 p.
- Nicholls, R.J.; Hoozemans, F.M.J.; Marchand, M. Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: Regional and global analyses. *Glob. Environ. Chang.* 1999, 9, S69–S87.
- The Open University (1999) *Waves, Tides and Shallow-water Processes*, second edition. Butterworth and Heinemann, and The Open University, Oxford, UK, 227 p.
- Rao, K.N.; Subraelu, P.; Rao, T.V.; Malini, B.H.; Ratheesh, R.; Bhattacharya, S.; Rajawat, A.S. Sea-level rise and coastal vulnerability: An assessment of Andhra Pradesh coast, India through remote sensing and GIS. *J. Coast. Conserv.* 2008, 12, 195–207.
- Resio DT, Bratos SM, Thompson EF (2002) Meteorology and wave climate. In: Vincent L, Demirbilek Z (eds) *Coastal engineering manual*, engineering manual 1110-2-1100. USACE, Washington, pp 1–72
- Ruest, B., Neumeier, U., Dumont, D., Lambert, A., 2013. Wave climate evaluation in the Gulf of St. Lawrence with a parametric wave model. In: Bonneton, P., Garlan, T. (Eds.) *Proceedings of Coastal Dynamics 2013*, SHOM, Brest (France), pp. 1363-1374.
- Ruest, B., Neumeier, U., Dumont, D., Bismuth, E., Senneville, S., Caveen, J., 2015. Recent wave climate and expected future changes in the seasonally ice-infested waters of the Gulf of St. Lawrence, Canada. *Climate Dynamics*, 46(1): 1-18.
- Ropars, Y. (2012). Réhabilitation de la digue des aboîtes de Saint-André-de-Kamouraska : Rapport technique. Rapport préparé pour le Ministère de la Sécurité publique, 26 pages.
- Savard, J.P., Rosu, C., Gachon, P., Pacher, G., Carrera, M. (2009, non-publié) Étude des tempêtes dans le golfe du Saint-Laurent : Rapport préliminaire. Ouranos : Montréal, 25 p. + annexes
- Senneville, S. et F.J. Saucier. (2007) Étude de sensibilité de la glace de mer au réchauffement climatique dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent. Institut des sciences de la mer, Rimouski, rapport préparé pour Ouranos, 28 p.
- Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M. IPCC. *Climate Change 2007. The Physical Science Basis*; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, 2007.
- Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., et Sallenger, A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53, 573–588.

Stocker, T.F.; Qin, D., Plattner, G.K.; Tignor, M.; Allen, S.K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V.; Midgley, P.M.; et al. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, 2013.

Tita, G. (2015) Niveaux d'eau des épisodes de submersion aux Îles-de-la-Madeleine. Rapport remis à Ouranos, G. Tita consultant, 17 p.

Xu, Z. et D. Lefavre (2015). Prévion des niveaux d'eau dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent en fonction des changements climatiques. Rapport interne au Ministère des Transports du Québec, janvier 2015, 97 p.



ANNEXE A

ORGANIGRAMME MÉTHODOLOGIQUE POUR CHAQUE SITE D'ÉTUDE

Les organigrammes de chacun des sites sont présentés ci-dessous :

- Maria et Carleton-sur-Mer (Figure A.1),
- Îles-de-la-Madeleine (Figure A.2)
- Kamouraska (Figure A.3).

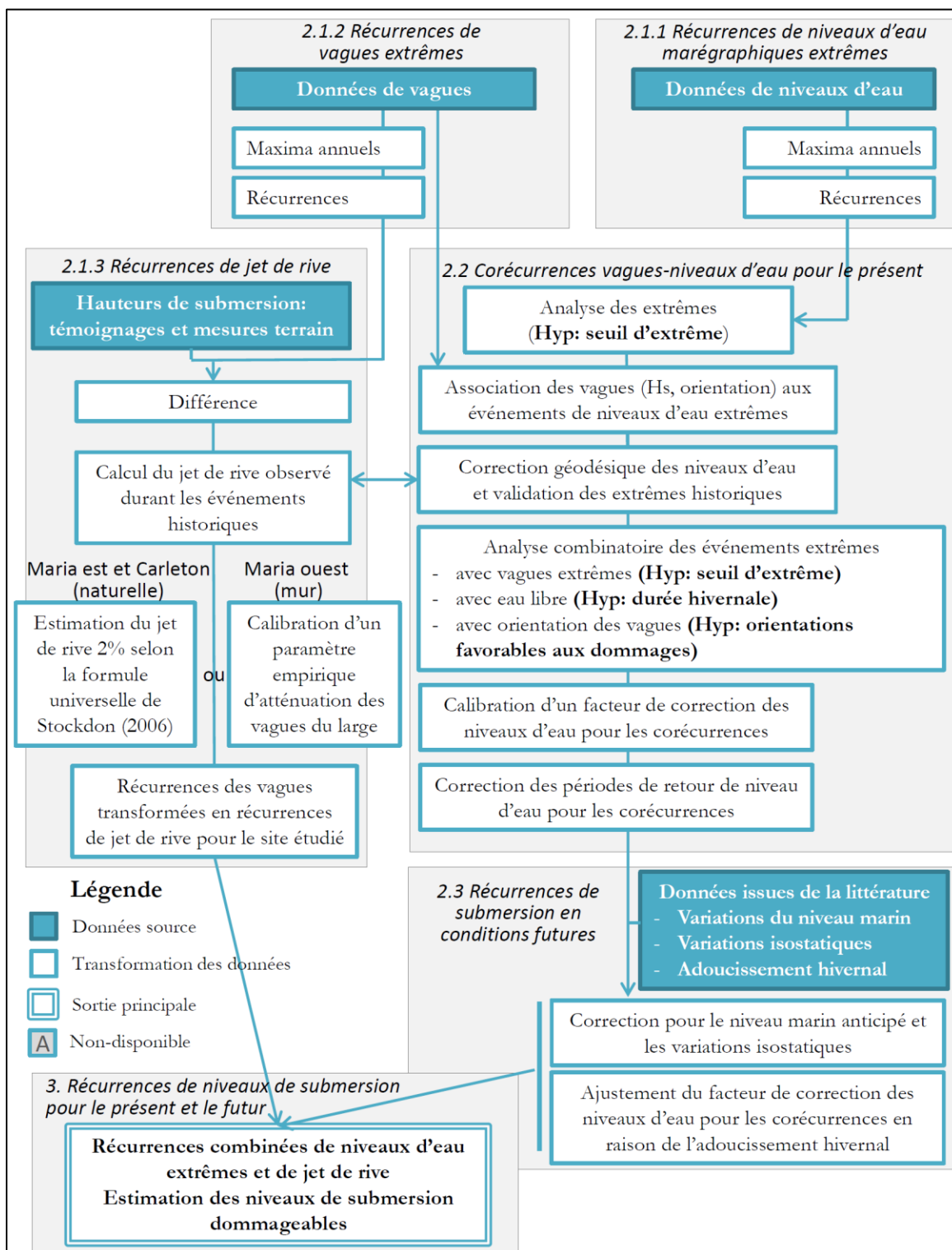


Figure A1 Organigramme méthodologique d'estimation des niveaux de submersion – Maria et Carleton-sur-Mer

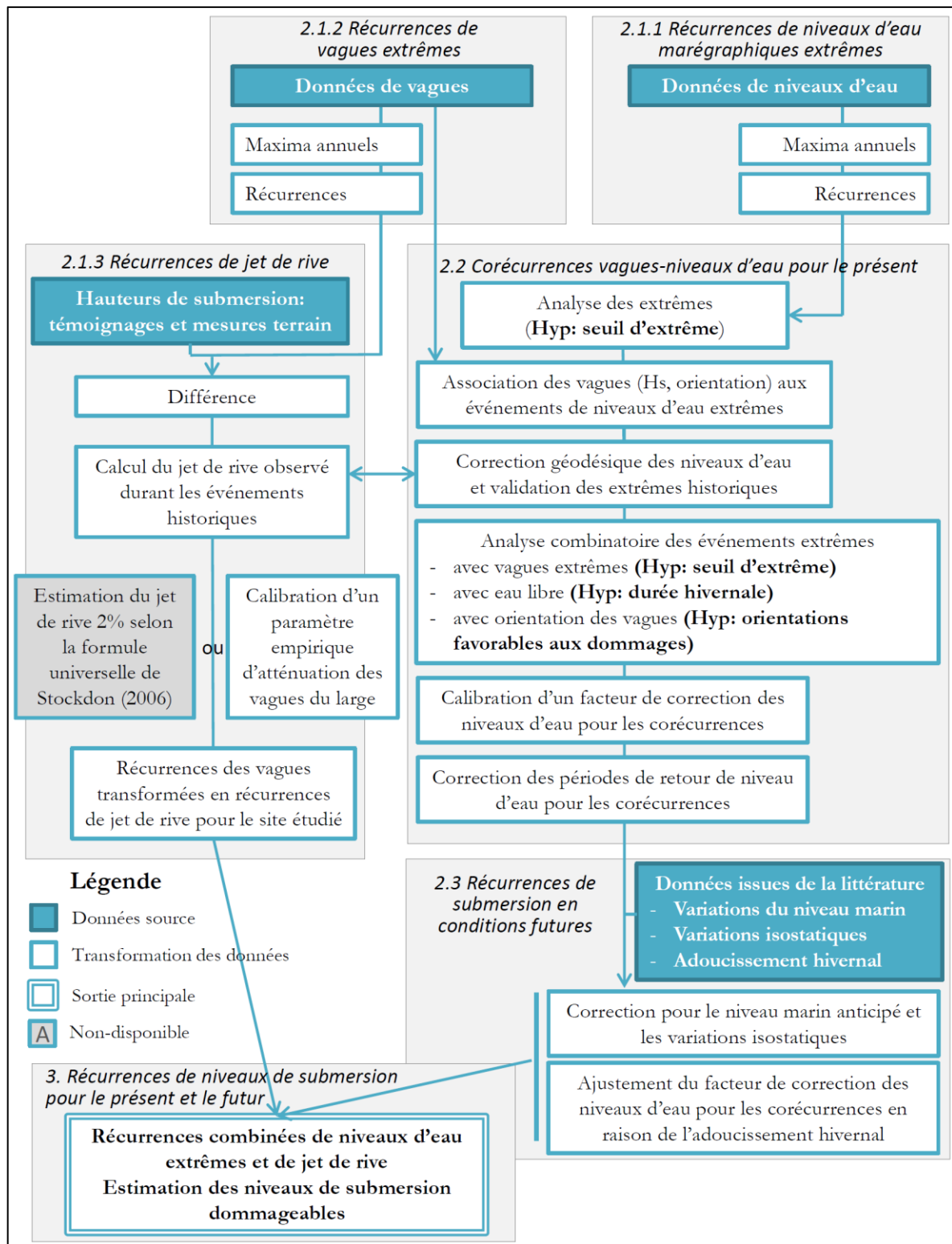


Figure A2 Organigramme méthodologique d'estimation des niveaux de submersion – Îles-de-la-Madeleine

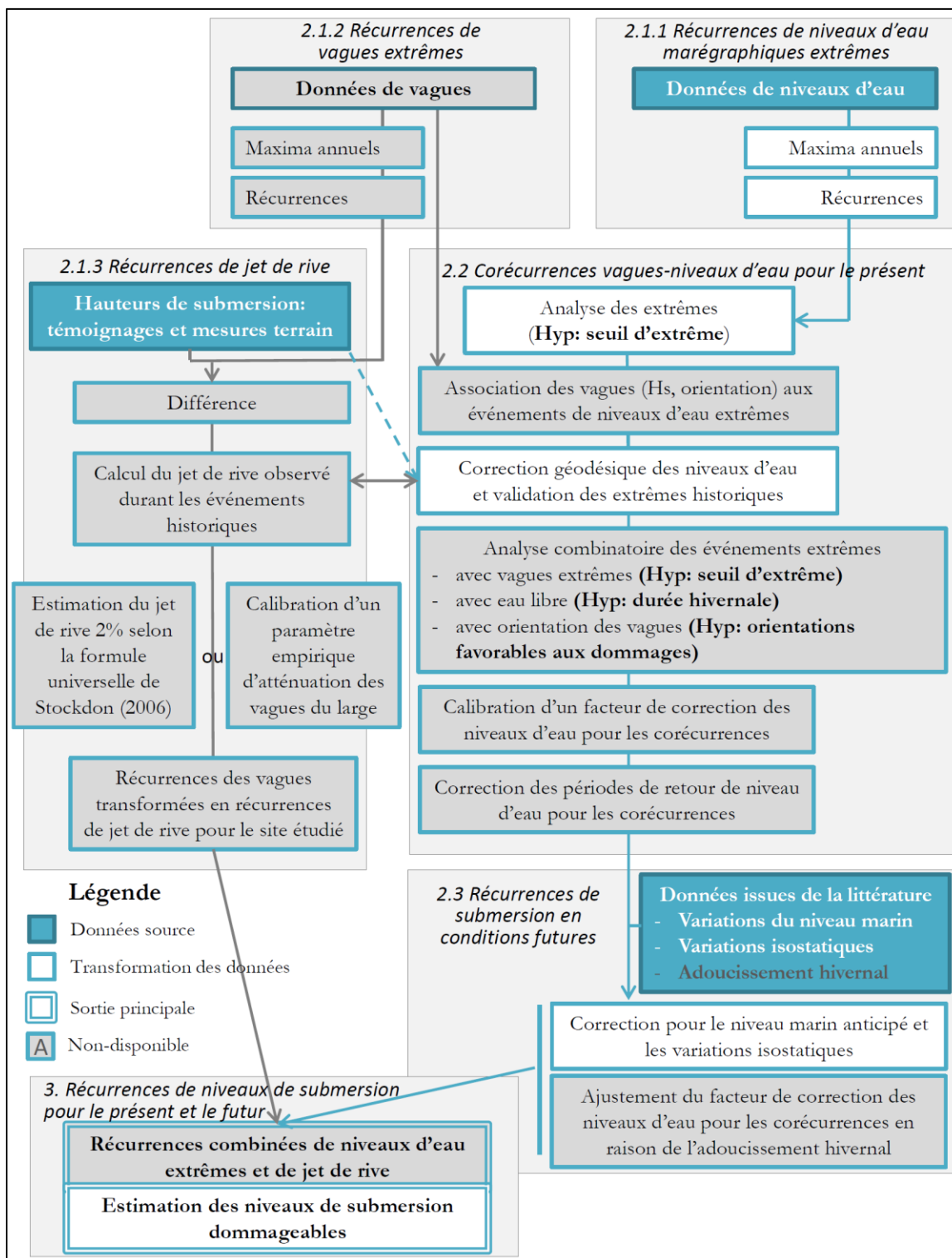


Figure A3 Organigramme méthodologique d'estimation des niveaux de submersion – Kamouraska

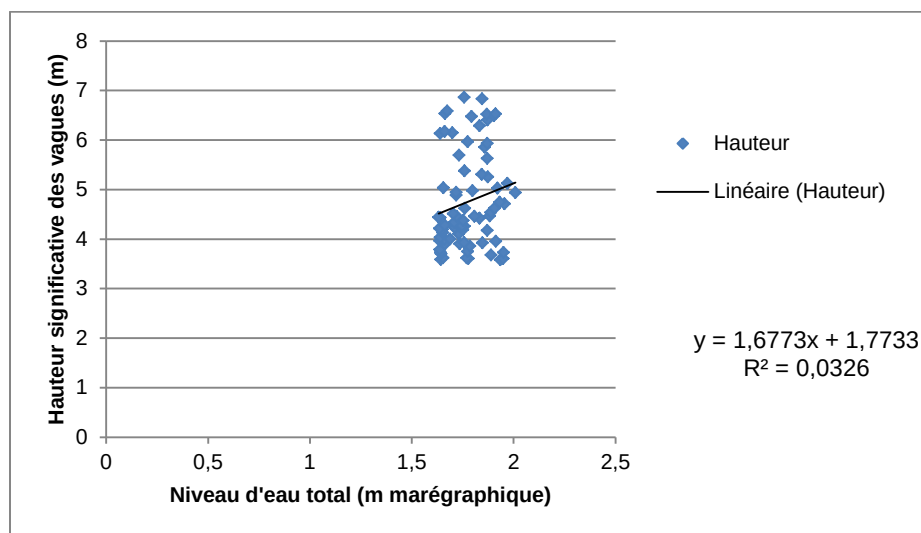


ANNEXE B

CORRÉLATION ENTRE LES NIVEAUX D'EAU EXTRÊMES ET LES VAGUES CORRESPONDANTES AUX ÎLES-DE-LA-MADELEINE (1979-2012)

La figure B.1 présente les corrélations entre les niveaux d'eau extrêmes et les vagues correspondantes aux Îles-de-la-Madeleine.

A. Hauteur significative des vagues extrêmes en fonction des niveaux d'eau extrêmes (n = 526)



B. Hauteur significative des vagues extrêmes en fonction des surcotes associées aux niveaux extrêmes (n = 526)

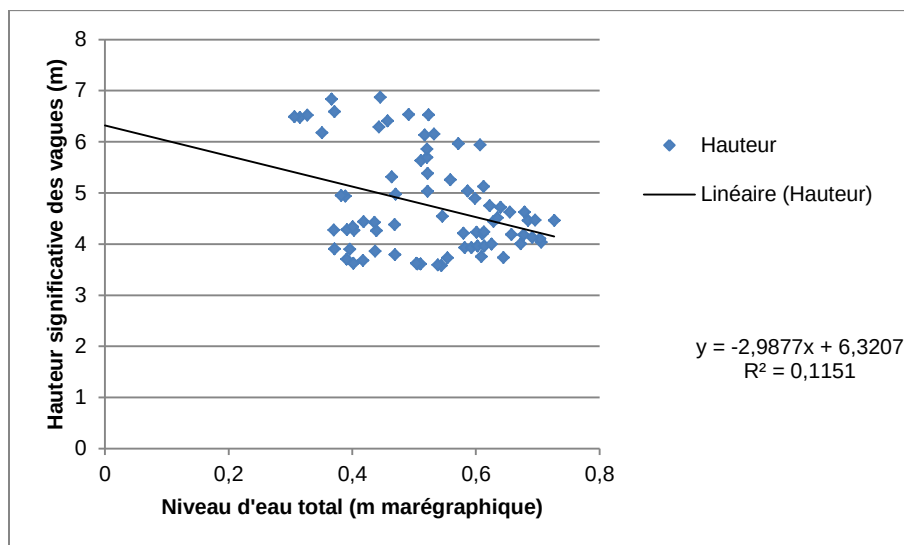


Figure B.1 Hauteur significative des vagues extrêmes en fonction A. des niveaux d'eau extrêmes et B. surcotes extrêmes pour les Îles-de-la-Madeleine

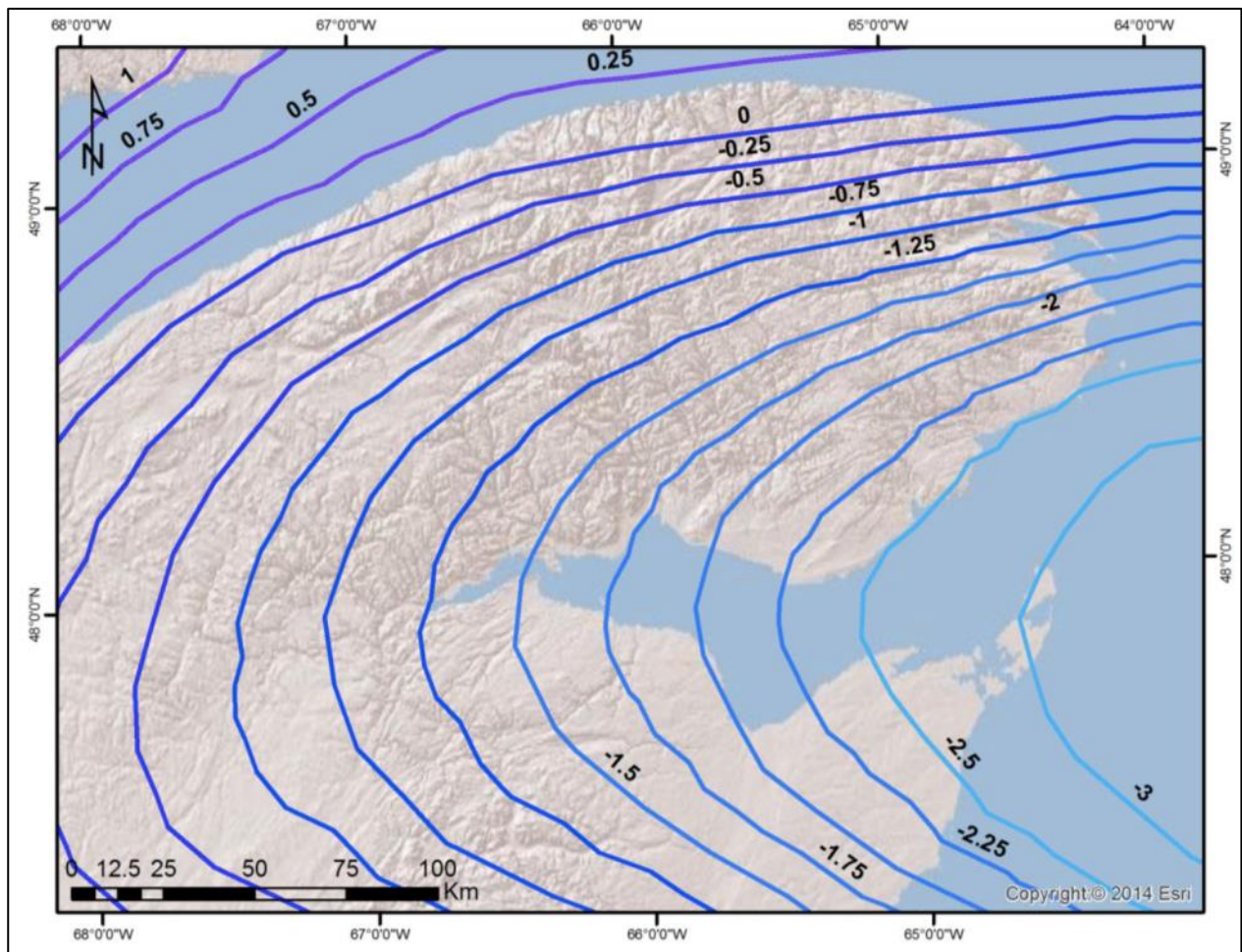


ANNEXE C

VARIATIONS ISOSTIQUES

L'interpolation graphique pour chacun des sites d'étude est présentée ci-dessous :

- Carleton et Maria (Figure C.1)
- Îles-de-la-Madeleine (Figure C.2; C.3)
- Rivière-Ouelle (Figure C.4)



Source : Didier et al. (2014)

Figure C.1 Courbes d'ajustement isostatique en Gaspésie et dans le Nord du Nouveau-Brunswick

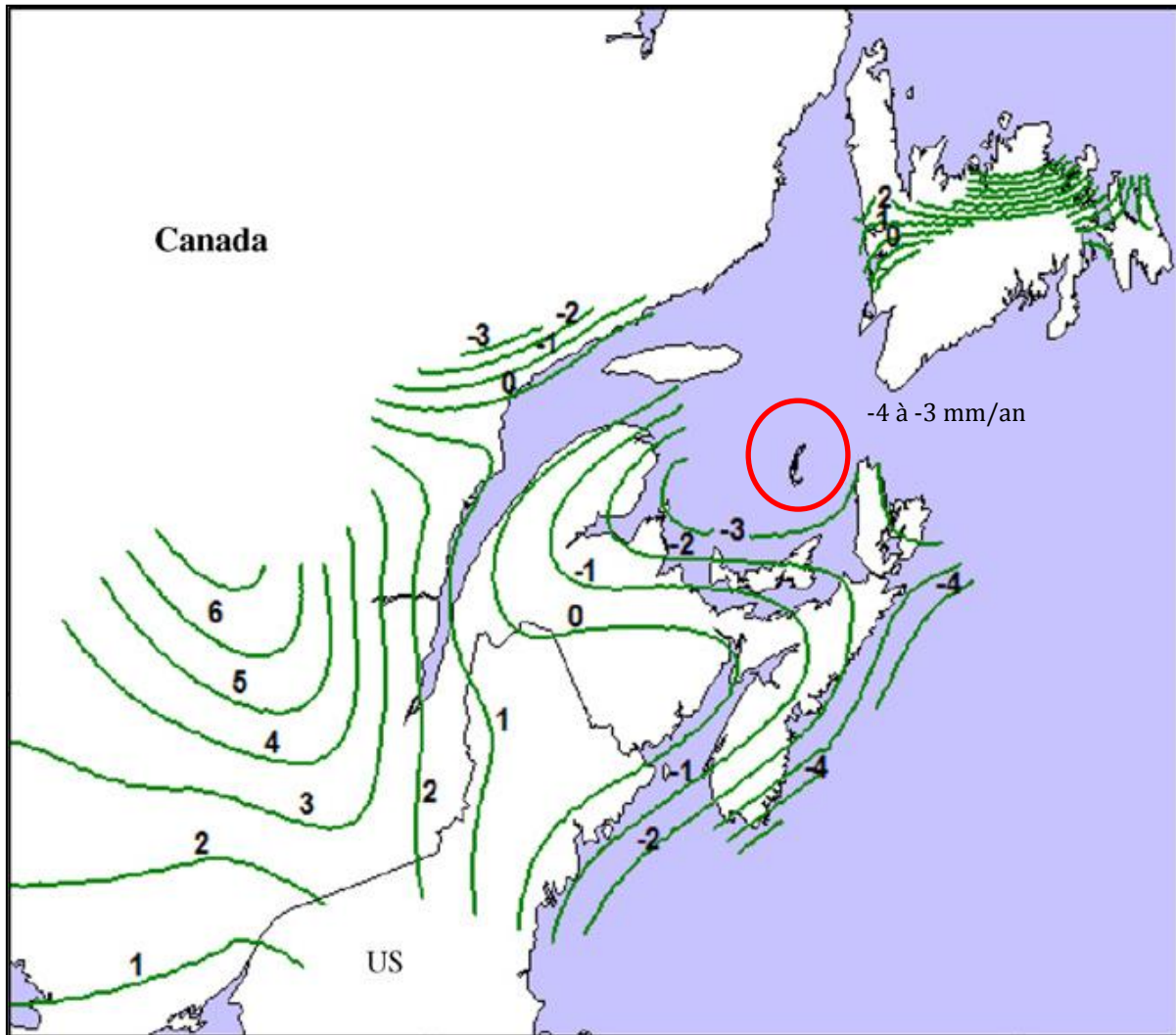
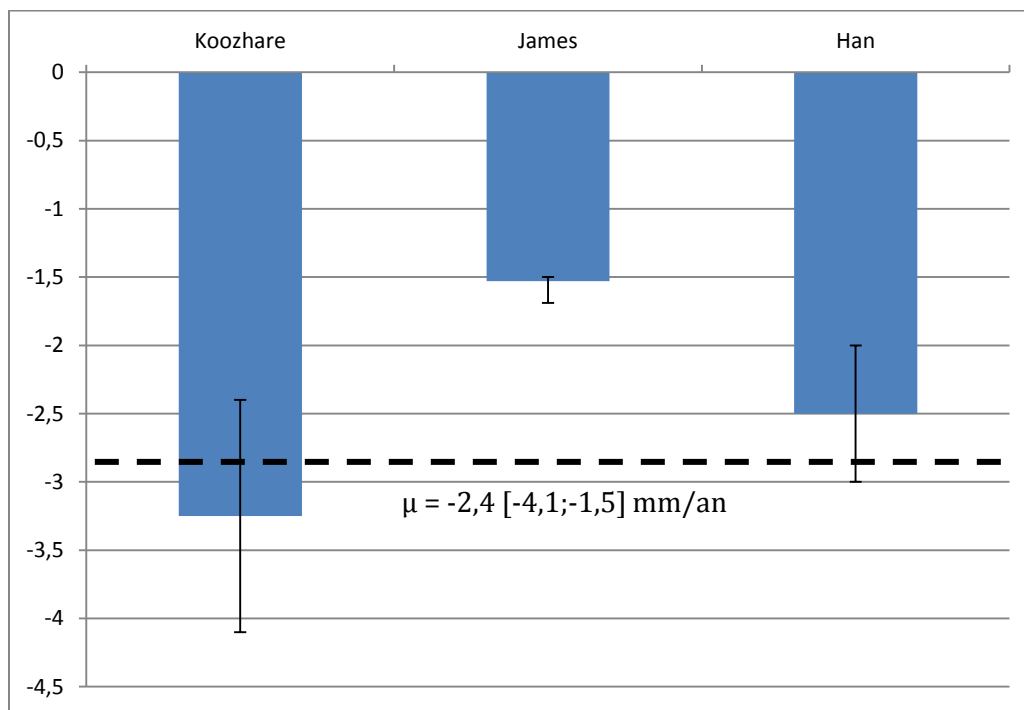


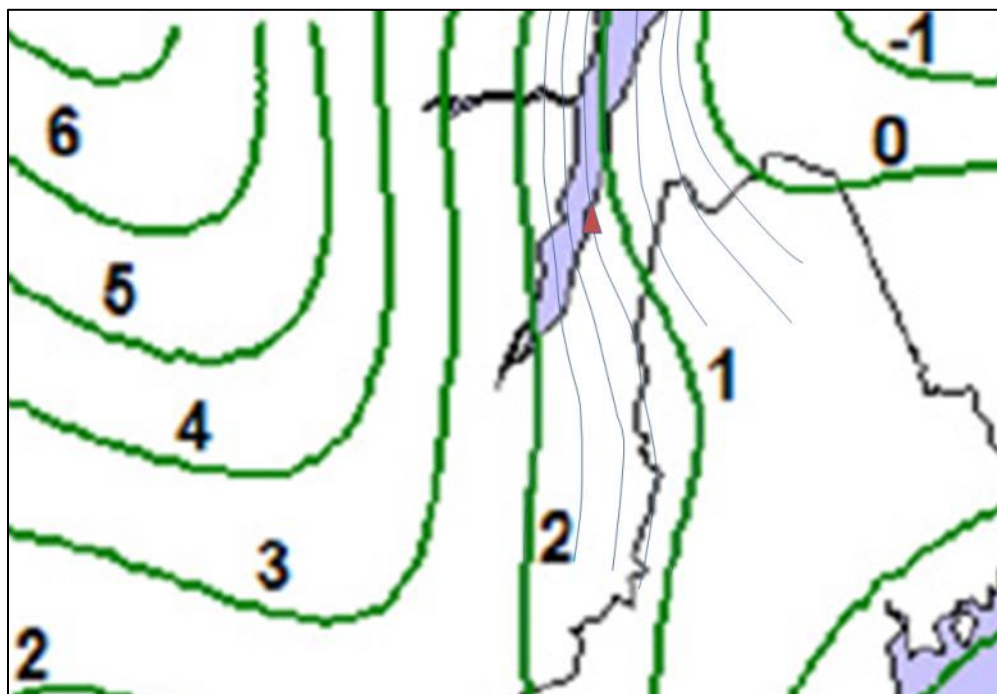
Figure C.2 Courbes d'ajustement isostatique des terres dans l'est du Québec et dans les maritimes

Pour les Îles-de-la-Madeleine, les trois sources confirment que les Îles sont en submersion isostatique à un rythme élevé. James est le plus conservateur avec un taux moyen de -1,5 [-1,69 à -1,53] mm/an pour les stations autour des Îles (Shediac, Charlottetown, Baddeck, Truro et Halifax), alors que Han propose un enfoncement intermédiaire entre -3 et -2 mm/an. Koohzare est le plus alarmiste avec -4 à -3 mm/an (Figure D.4). La valeur de Koohzare a été utilisée par souci de cohérence au sein du projet général des ACA. Par manque de résolution dans le secteur d'intérêt d'après la carte de Koohzare et al., la médiane de la classe, soit -3,5 mm/an a été utilisée.



Source : Koozhare et al. (2008)

Figure C.3 Variation isostatique aux Îles-de-la-Madeleine (mm/an) selon la source



Note : Le triangle rouge correspond à Rivière-Ouelle

Figure C.4 Courbes d'ajustement isostatique des terres dans le Bas-Saint-Laurent