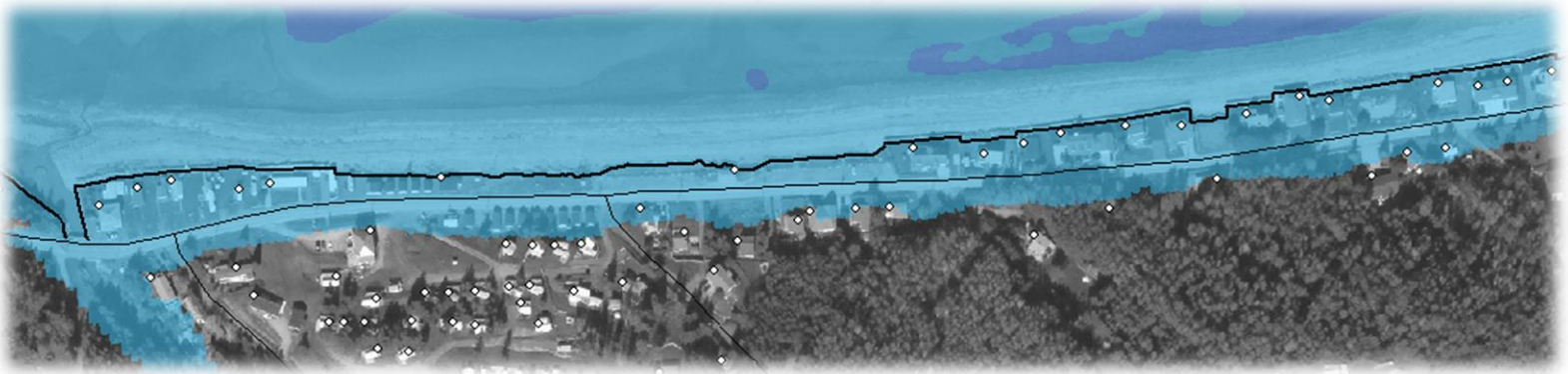


Développement et application d'une méthodologie
d'analyse de risque associée à l'érosion et à la
submersion côtière :

Rapport final

Présenté au ministère de la Sécurité publique du Québec

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



ÉQUIPE DE RÉALISATION

Direction, recherche, rédaction

Pascal Bernatchez, Ph. D.

Université du Québec à Rimouski

Département de biologie, chimie et géographie

Chaire de recherche en géoscience côtière

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

300, allée des Ursulines, case postale 3300

Rimouski (Québec) G5L 3A1

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

Télécopieur : (418) 724-1847

Courriel : pascal_bernatchez@uqar.qc.ca

<http://dgizc.uqar.qc.ca/>

Rédaction et analyse

David Didier, M. Sc. géographie, étudiant au doctorat en Sciences de l'Environnement LDGIZC, UQAR

Morphodynamique et modélisation de la submersion, rédaction et analyse

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

Vulnérabilité, risques. Rédaction et analyse

Autres collaborateurs

Jérémy Baudry, professionnel de recherche, LDGIZC, UQAR.

Modélisation numérique.

Adrien Lambert, Ph. D., professionnel de recherche, LDGIZC, UQAR

Modélisation numérique.

Chargés de projet au ministère de la Sécurité publique du Québec (MSP)

Josée Desgagné, Conseillère en gestion des risques naturels,
Service de l'expertise, Direction générale de la sécurité civile et de la sécurité incendie

Yvon Jodoin, Conseiller en gestion des risques
Service de l'expertise, Direction de la prévention et de la planification

Référence complète

Drejza, S., Didier, D., Bernatchez, P., Lambert, A., Beaudry, J. 2018. Développement et application d'une méthodologie d'analyse de risque associée à l'érosion et à la submersion côtière. Rapport final. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, août 2018, 96 p.

REMERCIEMENTS

L'équipe de recherche tient à remercier pour sa contribution financière le ministère de la Sécurité publique du Québec qui a appuyé ce travail par le Cadre pour la prévention de sinistres 2013-2020 du gouvernement du Québec [CPS15-16-09].



Photographies de la page de couverture :

Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES ÉQUATIONS	viii
1. Contexte du projet	1
2. Méthodologie proposée pour l'analyse de risque	6
2.1 Création d'un indice	6
2.2 Paramètres explicatifs et attribution de scores	7
2.3 Éléments considérés ou non dans l'analyse.....	7
3. Identification des risques	9
3.1 Caractérisation du milieu pour le site d'étude de La Mitis	9
3.2 Caractérisation du milieu pour le site d'étude de la Manicouagan	15
3.3 Identification et caractérisation des aléas	20
3.3.1 Érosion.....	21
3.3.2 Submersion.....	24
3.4 Établissement du profil de vulnérabilité	29
3.4.1 Éléments considérés dans l'étude.....	29
3.4.2 Facteurs de vulnérabilité.....	30
4. Analyse des risques	32
4.1 Analyse de l'exposition aux aléas et des conséquences potentielles	32
4.1.1 Paramètres de la matrice de calcul	32
4.1.2 Paramètres relatifs à l'érosion	32
4.1.3 Paramètres relatifs à la submersion.....	33
4.1.4 Paramètres relatifs aux éléments exposés.....	34
4.2 Identification et évaluation des mesures de contrôle existantes	43
4.3 Estimation du niveau de vulnérabilité et de risque.....	44
4.3.1 Calcul des indices individuels	44
4.3.2 Calcul des indices par secteur	46
4.4 Résultat pour le site d'étude de La Mitis.....	47
4.5 Résultat pour le site d'étude de Manicouagan	52

5.	Utilisation de l'outil et recommandations.....	55
5.1	Utilisation de l'outil	55
5.1.1	Décomposer l'IVIC	55
5.1.2	IVIC individuels/secteurs	58
5.2	Recommandations.....	60
6.	Conclusion	61
7.	Références	62
8.	Annexes	67
8.1	Description des données numériques : bâtiments.....	67
8.2	Description des données numériques : voies de communication	69
8.3	Description des données numériques : autres réseaux	72
8.4	Description des données numériques : secteurs d'études	74
8.5	Description des données numériques : submersion	78
8.6	Cartes des indices et sous-indices de vulnérabilité des infrastructures côtières.....	78
8.6.1	Site de La Mitis	78
8.6.2	Site de La Manicouagan.....	85

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Carte de localisation des sites d'études	2
Figure 2. Processus de gestion des risques du ministère de la Sécurité publique (MSP, 2008 c)...	3
Figure 3. Schéma de la vulnérabilité théorique employée.....	5
Figure 4. Localisation du site de la MRC de La Mitis	9
Figure 5. Planche d'images héliportées obliques du site d'étude de La Mitis (LDGIZC, septembre 2017).....	12
Figure 6. Carte de la dynamique hydrosédimentaire pour l'ouest du site de La Mitis	13
Figure 7. Carte de la dynamique hydrosédimentaire pour l'est du site de La Mitis	14
Figure 8. Carte de localisation du site de la MRC de Manicouagan	16
Figure 9. Site d'étude de Pointe-aux-Outardes.....	17
Figure 10. Planche d'images héliportées obliques du site témoin de Pointe-aux-Outardes (LDGIZC, septembre 2017)	18
Figure 11. Dynamique hydrosédimentaire de la péninsule Manicouagan.....	19
Figure 12. Haut : route 132 à Sainte-Flavie après la tempête du 6 décembre 2010. Bas : Route 132 en septembre 2010 avec la présence d'un enrochement et d'un muret de bois (© LDGIZC-UQAR)	23
Figure 13. Schématisation des phénomènes à l'origine de la submersion	25
Figure 14. Périodes de retour conjointes vagues et niveaux d'eau	28
Figure 15. Éléments considérés dans l'étude.....	29
Figure 16. Débris de bois et blocs d'enrochement sur une route suite à la tempête du 6 décembre 2010 à Rimouski (© LDGIZC-UQAR)	42
Figure 17. Indices de vulnérabilité des infrastructures côtières par secteur.	50
Figure 18. Sous-indice de vulnérabilité à la submersion par secteur.....	51
Figure 19. Sous-indice de vulnérabilité à l'érosion par secteur	52
Figure 20. Indices de vulnérabilité des infrastructures côtières par secteur.	54
Figure 21. Secteur M-09, site de La Mitis : l'IVIC découle principalement de l'érosion.....	56
Figure 22. Secteur M-23, site de La Mitis : l'IVIC découle principalement de la submersion, mais avec également une érosion importante	57
Figure 23. Éléments vulnérables dans des secteurs très vulnérables.....	58
Figure 24. Éléments vulnérables dans un secteur peu vulnérable.....	59
Figure 25. Images héliportées post-tempête de bâtiments dans le secteur M-56 (9 décembre 2010) (© LDGIZC-UQAR).....	59

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Étapes en appréciation des risques et indications de ce qui sera fait dans le cadre de ce projet	3
Tableau 2. Type de côte du site d'étude de la MRC de La Mitis	9
Tableau 3. Artificialisation de la côte du site d'étude de la MRC de La Mitis	10
Tableau 4. Largeur du haut estran	10
Tableau 5. Type de sédiments dominants du haut estran	10
Tableau 6. Types de côte du site de Pointe-aux-Outardes.....	16
Tableau 7. Reculs événementiels pour le site de La Mitis.....	22
Tableau 8. Reculs événementiels pour la Côte-Nord	22
Tableau 9. Détails du score « Exposition à l'érosion »	33
Tableau 10. Détails du score « Exposition à la submersion »	33
Tableau 11. Détails du score « Type de bâtiment-submersion ».....	35
Tableau 12. Détails du score « Type de bâtiment - érosion »	35
Tableau 13. Détails du score « Population directement affectée »	36
Tableau 14. Nombre moyen de personnes par ménage par municipalité.....	36
Tableau 15. Détails du score « sécurité des personnes liée aux processus de submersion – type de bâtiment »	37
Tableau 16. Détails du score « Type de voies de communication »	38
Tableau 17. Détails du score « Voie de contournement »	38
Tableau 18. Détails du score « Facilité à rétablir le service ».....	39
Tableau 19. Détails du score « Type réseau »	39
Tableau 20. Détails du score de « Sécurité directe des personnes vis-à-vis des réseaux »	40
Tableau 21. Détails du score « Rang côtier »	41
Tableau 22. Détails du score « sécurité des personnes liée aux processus de submersion - localisation ».....	42
Tableau 23. Détails du score « Sécurité liée aux processus d'érosion »	43
Tableau 24. Bâtiments affectés par l'érosion.....	47
Tableau 25. Voies de communication affectées par l'érosion	48
Tableau 26. Autres réseaux affectés par l'érosion.....	48
Tableau 27. Voies de communication affectées par la submersion.....	48
Tableau 28. Bâtiments affectés par la submersion	49
Tableau 29. Les IVIC de quel type d'élément causent-ils la majorité de l'IVIC global du secteur ?	50
Tableau 30. Type de bâtiments vulnérables à l'érosion.....	53
Tableau 31. Type de voies de communication vulnérables à l'érosion.....	53
Tableau 32. Type d'autres réseaux vulnérables à l'érosion	53

LISTE DES ÉQUATIONS

Équation 1. Calcul de l'horizon d'érosion pour les infrastructures côtières	24
Équation 2. Calcul du sous-indice de vulnérabilité à l'érosion pour les bâtiments.....	45
Équation 3. Calcul du sous-indice de vulnérabilité à l'érosion pour les voies de communication	45
Équation 4. Calcul du sous-indice de vulnérabilité à l'érosion pour les autres réseaux	45
Équation 5. Calcul du sous-indice de vulnérabilité à la submersion pour les bâtiments	45
Équation 6. Calcul du sous-indice de vulnérabilité à la submersion pour les voies de communication.....	45
Équation 7. Calcul de l'indice de vulnérabilité des infrastructures côtières synthétique individuel	46
Équation 8. Calcul de l'indice de vulnérabilité des infrastructures côtières synthétique pour les secteurs	46

1. Contexte du projet

En vertu de la Loi sur l'aménagement et l'urbanisme, les municipalités régionales de comté (MRC) sont responsables de la cartographie des risques se trouvant sur leur territoire. Au fil des ans, le gouvernement du Québec a soutenu les MRC dans cette tâche par le biais du Cadre de prévention des sinistres et du plan d'action sur les changements climatiques. C'est par le biais de ces deux programmes que le ministère de la Sécurité publique (MSP) mandate l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) depuis plus de 10 ans pour développer et mettre en application une méthodologie d'analyse du risque liée à l'érosion côtière pour cartographier l'aléa érosion le long des berges de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent dans un contexte de changements climatiques (Suivi de l'érosion côtière du Québec maritime 2013-2016 ; Suivi annuel de l'érosion côtière, des bâtiments et des infrastructures ; Détermination des marges de sécurité des zones exposées à l'érosion côtière pour les MRC de la Haute-Gaspésie, de la Côte-de-Gaspé, du Rocher-Percé et d'un secteur de la MRC d'Avignon). Parallèlement à cette démarche, le MSP a aussi financé l'UQAR pour la mise en place d'instruments dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, afin de mesurer des niveaux d'eau et des hauteurs de vagues, des données essentielles pour calibrer des modèles qui servent à développer et à mettre en application une méthodologie d'analyse du risque liée à la submersion marine (Programme de mesure et de modélisation de la morphodynamique de l'érosion et de la submersion côtière dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (Modesco) Phase I, II et III ; Suivi environnemental des côtes du Québec maritime (2016-2019) ; reconstitution historique et projection des variations du niveau marin relatif pour l'estuaire maritime et le golfe du Saint-Laurent ; Développement de plateformes topobathymétriques polyvalentes optimisées pour une utilisation en zones côtières ; Modélisation conjointe de l'évolution future des phénomènes d'érosion et de submersion côtière pour le développement d'une cartographie multialéas des côtes de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent). Depuis quelques années, le MSP mandate aussi l'UQAR pour faire un inventaire des solutions possibles et un suivi, afin de soutenir les municipalités dans le traitement des risques (Cartographie et analyse de l'artificialité du littoral de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent ; Suivi environnemental de travaux de rechargement de plage dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent et suivi de la renaturalisation d'une plage comme solution d'adaptation aux aléas côtiers).

L'objectif général de ce projet de recherche est de développer une méthodologie simple et opérationnelle permettant d'analyser les risques associés à l'érosion et à la submersion côtière en définissant, notamment, la sensibilité de zones côtières à ces aléas en incluant l'effet des vagues. La particularité de ce projet est donc de combiner les deux aléas (érosion et submersion côtière) dans l'analyse de risque et d'appliquer la méthodologie sur deux sites où le MSP souhaite mettre en œuvre des projets de traitement des risques. Il y a d'abord un site d'étude de 30 km dans la MRC de La Mitis, entre le quai de Pointe-au-Père dans la municipalité de Rimouski et le quai de l'Institut Maurice-Lamontagne dans la municipalité de Mont-Joli. Il y a aussi un site d'étude de 4 km dans la MRC de Manicouagan, entre le quai de Pointe-aux-Outardes et l'extrémité est de la rue Labrie (figure 1).

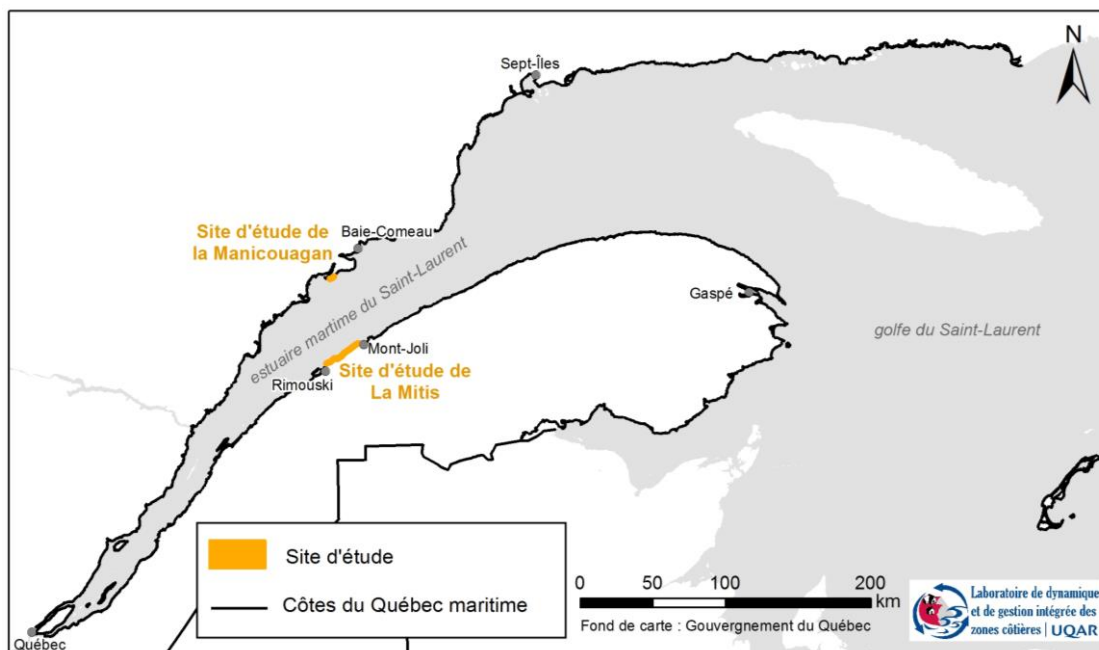


Figure 1. Carte de localisation des sites d'études

Cette étude suit la démarche en appréciation des risques qui doit être mise en place dans le processus de gestion des risques tel que préconisé par le ministère de la Sécurité publique du Québec (MSP, 2008c) (figure 2). Elle fournira une estimation du niveau de vulnérabilité pour chaque secteur de 500 mètres de côtes et pour chaque élément exposé à l'érosion et à la submersion côtière. Cette analyse permettra au MSP et aux municipalités concernées d'évaluer le risque, en établissant des seuils qui distinguent les secteurs qui nécessitent une intervention et les autres qui n'en nécessitent pas, puis en priorisant les secteurs d'intervention (MSP, 2008a, 2008b et 2008c). Par la suite, elle servira de base pour effectuer les étapes du traitement des risques, par l'identification des mesures potentielles, l'évaluation et la sélection des mesures puis la planification et la mise en œuvre des solutions pour réduire le risque (MSP, 2008a, b, c, figure 2).

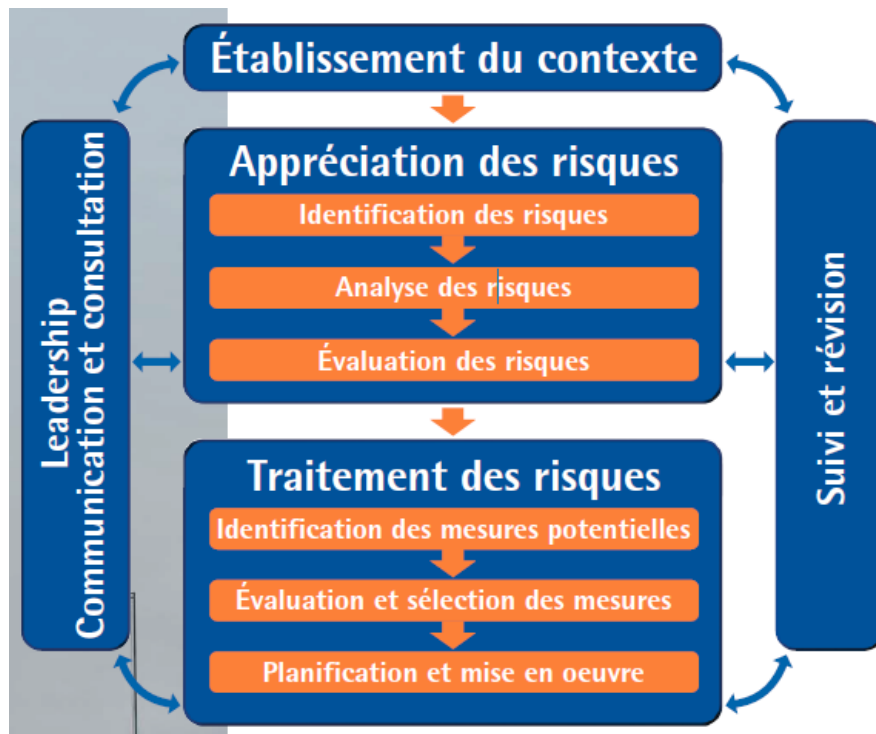


Figure 2. Processus de gestion des risques du ministère de la Sécurité publique (MSP, 2008 c)

Dans la démarche d'appréciation des risques telle que présentée par le MSP (2008 c), ce rapport va s'attarder sur les étapes 1 et 2 en appréciation des risques décrites au tableau 1. L'étape 3 sera faite ultérieurement par le MSP en collaboration avec les municipalités concernées dans le but d'amorcer une démarche de traitement des risques décrite ici-bas. La démarche gouvernementale type ainsi que des précisions sur ce qui sera fait dans le cadre de ce projet est présentée au tableau 1.

Tableau 1. Étapes en appréciation des risques et indications de ce qui sera fait dans le cadre de ce projet

Étapes en appréciation des risques (MSP, 2008 c)		Ce qui sera fait dans le cadre de ce projet
1) L'identification du risque	a) Caractérisation du milieu	Caractérisation des types de côtes, de la dynamique côtière, de l'occupation du territoire...
	b) Identification et caractérisation des aléas	Seules l'érosion et la submersion ont été étudiées.
	c) Établissement du profil de vulnérabilité	C'est-à-dire les paramètres qui augmentent ou réduisent la vulnérabilité du milieu.
	d) Détermination des risques considérés	Pour la sécurité des biens et des personnes, mais en excluant les risques économiques.

Étapes en appréciation des risques (MSP, 2008 c)		Ce qui sera fait dans le cadre de ce projet
2) L'analyse des risques	a. Identification et évaluation des mesures de contrôle existantes	C'est-à-dire, la présence d'ouvrages de protection, de voies de contournement...
	b. Détermination des conséquences potentielles	Quels sont les enjeux qui sont affectés et à quel niveau. En tenant compte de la réduction d'un ou des deux aléas selon l'adaptation ou l'augmentation de l'aléa par exemple s'il y a maladaptation.
	c. Détermination des probabilités d'occurrences des aléas	Pour l'aléa de submersion, il sera déterminé à quelle fréquence la submersion peut survenir. Mais il n'y a pas de détermination de probabilités pour l'érosion.
	d. Estimation du niveau de risque	Ce sera fait pour l'érosion, la submersion et pour les deux aléas combinés.
3) L'évaluation des risques	a. Examiner les résultats de l'analyse des risques en relation avec les critères d'évaluation.	Non abordé pour ce projet. Sera fait ultérieurement par le MSP en collaboration avec les municipalités.
	b. Déterminer les risques nécessitant un traitement en vue d'en réduire l'importance	
	c. Établir les priorités de traitement pour chacun des risques retenus	

Cette étude s'insère dans un cadre conceptuel concernant l'exposition et la vulnérabilité (figure 3). Ainsi l'**exposition** d'une infrastructure à un aléa est la potentialité que celle-ci (élément étudié/enjeu) puisse être affectée par cet aléa, tandis que la **vulnérabilité** d'un système correspond à son incapacité à faire face aux effets défavorables des aléas. La **vulnérabilité d'un système** est donc fonction du degré d'exposition, mais également de la sensibilité du système aux aléas (ou perturbations), des enjeux présents et de la capacité d'adaptation mise en œuvre pour réduire ou éliminer les effets néfastes de ces aléas sur le système.

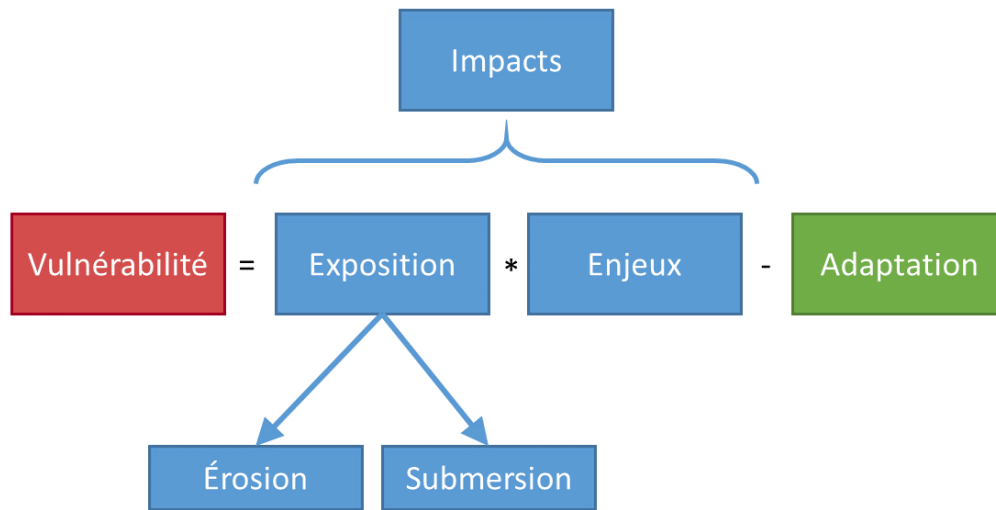


Figure 3. Schéma de la vulnérabilité théorique employée

2. Méthodologie proposée pour l'analyse de risque

La méthodologie proposée se base sur la littérature scientifique dans le domaine de la vulnérabilité aux aléas naturels qu'ils soient côtiers ou non côtiers. Dans le développement méthodologique, il a également été pris en compte les besoins exprimés par le ministère de la Sécurité publique du Québec lors des rencontres de travail effectuées et des expériences de réalisation d'autres indices de vulnérabilité pour d'autres ministères québécois (MTMDET entre 2012 et 2015, voir Drejza *et al.*, 2015). Cette méthodologie sera présentée étape par étape afin de pouvoir être reproduite sur d'autres sites selon les besoins.

Les besoins exprimés par le ministère de la Sécurité publique du Québec sont :

- Répondre aux définitions des guides du MSP (2008, a, b et c)
- Opérabilité
- Simplicité
- Efficacité
- Comparabilité

2.1 Création d'un indice

Il a été déterminé que la création d'un indice qui synthétise plusieurs paramètres serait la meilleure approche pour répondre aux besoins, car cela permet de regrouper plusieurs paramètres et de les combiner de manière à rendre les éléments des secteurs et les sites d'étude aisément comparables entre eux, et ce de manière objective (Peduzzi *et al.*, 2009, Boruff *et al.*, 2005, Barroca *et al.*, 2006 ; Papathoma-Khöle *et al.*, 2007 ; Meur-Férec *et al.*, 2008 ; McLaughlin et Cooper, 2010 ; Creach *et al.*, 2014, 2015...). Le niveau de vulnérabilité a été calculée pour chaque bâtiment, chaque segment de voie de communication et autres réseaux linéaires et un indice synthétique a été réalisé pour chaque secteur 500 m de côte. Ainsi, il est possible pour les gestionnaires de connaître les éléments exposés les plus vulnérables individuellement, mais aussi par secteurs, afin d'identifier où mettre en œuvre des solutions pour réduire le risque.

Le nombre de critères dans le calcul de l'indice a été limité. Comme cela a été exprimé par Hénaff et Philippe (2014), « il est conseillé d'opter pour des solutions pragmatiques, seules à même de garantir la reproductibilité d'une méthode, la mise à jour régulière des données et des diagnostics qui en découlent, ainsi que la transparence de la méthodologie et par conséquent, son acceptabilité sociale et sa faisabilité opérationnelle ».

2.2 Paramètres explicatifs et attribution de scores

L'analyse effectuée se base sur la compilation de **paramètres explicatifs** ayant trait à l'aléa d'érosion (le scénario le plus probable dans un contexte de changements climatiques), l'aléa de submersion (probabilité des niveaux d'eau + vagues + ondes de tempêtes + hausse du niveau marin relatif), aux enjeux ainsi qu'à la présence éventuelle d'ouvrage de protection (capacité d'adaptation). Chaque paramètre nécessaire à l'analyse a été identifié dans la table d'attributs pour chaque élément. Puis, les différents paramètres retenus se sont vu attribuer un score entre 1 et 5 selon leur propension à augmenter (5) ou non (1) le niveau de vulnérabilité en fonction des conséquences potentielles. L'utilisation de scores variant de 1 à 5 est en effet utilisé dans le calcul de plusieurs recherches (Boruff *et al.*, 2005; McLaughlin et Cooper, 2010; Meur-Férec *et al.*, 2008; McLaughlin *et al.*, 2002; Fontaine et Steinemann, 2009).

Pour ce qui a trait aux paramètres identifiés pour l'exposition aux aléas, le score peut être de « 0 » car ce paramètre peut annuler complètement toute vulnérabilité aux aléas côtiers, quels que soient les autres paramètres. Si le paramètre n'influence pas la vulnérabilité, il est plutôt classé « 1 ». L'équation de la vulnérabilité étant une multiplication, le 0 annule toute vulnérabilité et le 1 ne modifie pas le résultat.

La méthodologie proposée par cette étude a été appliquée sur deux sites d'étude. Les résultats de l'analyse pour les deux sites d'étude sont présentés dans les sections suivantes. Il est important de noter qu'en plus du niveau de vulnérabilité synthétique obtenu, il est possible de consulter la base de données afin d'obtenir l'information sur le ou les paramètres qui contribuent le plus à la hausse ou non du score final (format fichier de forme/shapefile, voir annexe page 67, pour la description des champs). En effet deux éléments peuvent avoir un résultat identique, mais la cause de leur vulnérabilité peut différer. C'est pourquoi il est toujours important de consulter l'ensemble des informations disponibles avant de prendre des décisions.

2.3 Éléments considérés ou non dans l'analyse

Cette étude se limite aux :

- bâtiments;
- voies de communication;
- lignes électriques de distribution;
- réseaux d'aqueduc et d'égouts.

Ne seront donc pas étudiés les éléments patrimoniaux, les écosystèmes, les usages et activités pratiqués sur le territoire, etc. Le détail est fourni à la section 3.4.1 (page 29).

De plus, la **valeur monétaire** des éléments exposés n'a pas été considérée, mais plutôt leur utilisation et leur fonction qu'ils assurent pour les populations. C'est le service qu'ils rendent à la population (et son interruption) qui provoque un risque pour les populations.

3. Identification des risques

3.1 Caractérisation du milieu pour le site d'étude de La Mitis

La côte du premier site d'étude s'étend sur l'ensemble de l'unité hydrosédimentaire de Sainte-Luce à Sainte-Flavie, soit entre le quai de Pointe-au-Père (municipalité de Rimouski) et le quai de l'Institut Maurice Lamontagne (municipalité de Mont-Joli), pour une longueur de 30 km (figure 4).

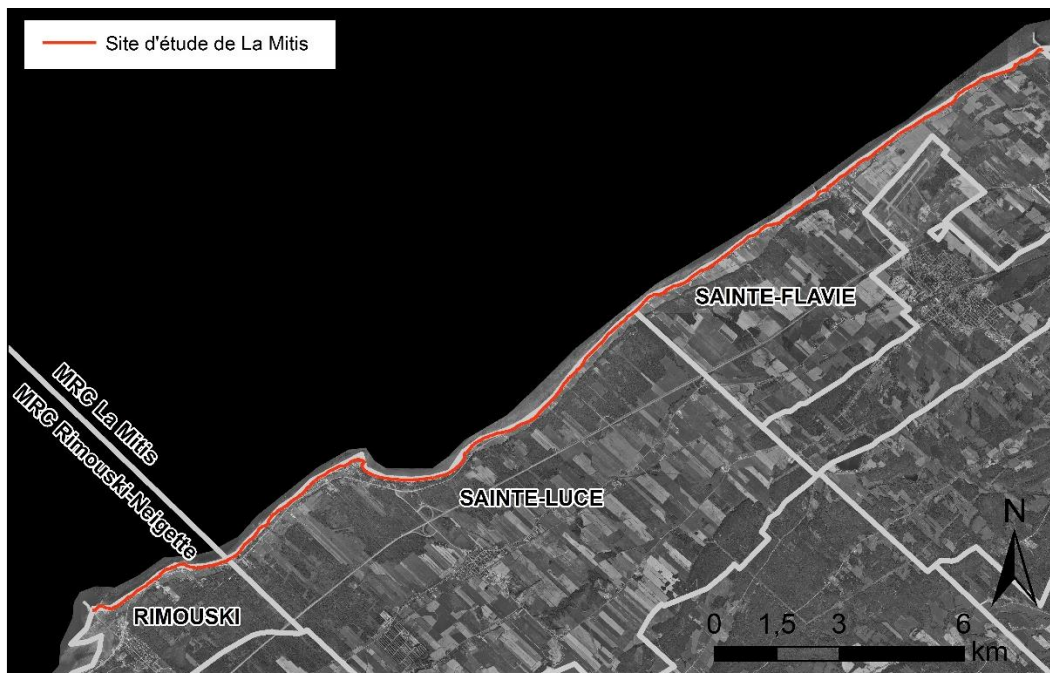


Figure 4. Localisation du site de la MRC de La Mitis

3.1.1 Description physique

Le site de La Mitis est presque exclusivement constitué de terrasses de plage (tableau 2) et plus de la moitié des côtes sont artificialisées (tableau 3).

Tableau 2. Type de côte du site d'étude de la MRC de La Mitis

type de côte	km	%
basse falaise rocheuse à sommet meuble	0,4	1,49
côte rocheuse	0,4	1,23
terrasse de plage	29,1	97,28
TOTAL	29,9	100,00

Tableau 3. Artificialisation de la côte du site d'étude de la MRC de La Mitis

artificialisation de la côte	En 2012		En 2010	
nd	0	0	0,1	0,18
non	10,2	34,00	13,3	44,55
oui	19,7	66,00	16,5	55,26
TOTAL	29,9	100,00	29,9	100

Majoritairement, les plages du site d'étude font de 10 à 30 m de largeur (tableau 4) et sont constituées de sable (tableau 5). En avant de celles-ci on retrouve souvent une plateforme rocheuse constituée de roches sédimentaires (figure 5A), sauf dans l'anse aux Coques où l'on retrouve un très large bas estran de sédiments fin (figure 5B) et dans l'anse au Lard (figure 5E).

Tableau 4. Largeur du haut estran

Largeur du haut estran	km	%
absente	0,57	1,91
quasi absente (moins de 5 m)	1,42	4,74
très étroite (5 à 10 m)	3,11	10,36
étroite (10 à 15 m)	5,27	17,59
moyenne (15 à 20 m)	9,86	32,91
large (20 à 30 m)	6,14	20,49
très large (+ de 30 m)	3,60	12,00
Total général	29,96	100,00

Tableau 5. Type de sédiments dominants du haut estran

type de sédiments de l'estran (dominance de...)	km	%
Absent	0,57	1,91
Bloc	0,13	0,44
Galets	0,29	0,96
Gravier	2,16	7,21
nd	0,06	0,21
Roc sédimentaire indifférencié	0,57	1,91
Sable	25,77	86,00
Shale	0,40	1,35
TOTAL	29,96	100,00

Le site est une unité hydrosédimentaire qui peut se diviser en quatre cellules (figure 6 et figure 7). De l'ouest vers l'est on retrouve la cellule de Pointe-au-Père (dérive littorale vers l'ouest), la cellule de l'Anse au lard (avec deux dérives convergentes vers le centre de l'anse), la cellule de l'Anse aux Coques (avec deux dérives convergentes vers le centre de l'anse) et la cellule de Sainte-Flavie (dérive littorale vers l'ouest).



Figure 5. Planche d'images hélicoptères obliques du site d'étude de La Mitis (LDGIZC, septembre 2017)



Figure 6. Carte de la dynamique hydrosédimentaire pour l'ouest du site de La Mitis



Figure 7. Carte de la dynamique hydrosédimentaire pour l'est du site de La Mitis

3.1.2 Description du milieu humain

Le site à l'étude se situe majoritairement dans la MRC de La Mitis (municipalités de Sainte-Luce et Sainte-Flavie), mais avec une petite portion dans la MRC de Rimouski-Neigette (municipalité de Rimouski). La population est concentrée de manière linéaire le long de la route 132, mais il est important de noter qu'un arrière-pays est présent et occupé par des terres agricoles et des villages.

3.1.3 Historique des événements

De nombreuses tempêtes ont affecté les côtes de ce site depuis les années 2000 : 2005, 2010, 2016. Ceci se retrouve dans les plans de mesure d'urgence des deux municipalités qui reconnaissent la problématique et font la liste pour chaque municipalité (MRC de La Mitis, 2014; MRC de La Mitis 2017).

3.2 Caractérisation du milieu pour le site d'étude de la Manicouagan

Dans la MRC de Manicouagan, le site d'étude fait 4,2 km dans la municipalité de Pointe-aux-Outardes (secteur de La Grosse Pointe) (figure 8). Situé sur la péninsule de Manicouagan, le site fait partie du complexe deltaïque quaternaire formé durant la dernière déglaciation dans la mer de Goldthwait (Bernatchez, 2003). Le site comprend des plages ainsi qu'une grande batture sableuse pouvant atteindre plus de 2 km de largeur (Bernatchez, 2003). Il s'étend du quai jusqu'à la fin de la rue Labrie à l'est.

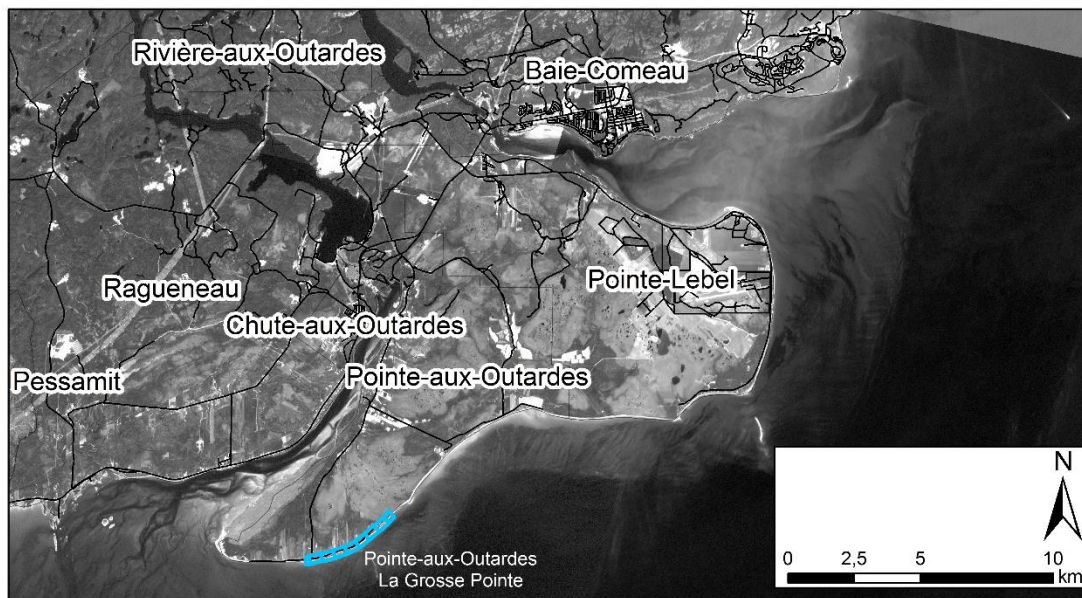


Figure 8. Carte de localisation du site de la MRC de Manicouagan

3.2.1 Description du milieu physique

Le site est composé de falaises meubles de 5 à 20 m de hauteur. Ces talus sont directement exposés au fleuve sur près de 70 % du site (tableau 6). Un peu moins d'un tiers des côtes sont des falaises meubles, mais au pied desquelles on retrouve des terrasses de plages étroites (photo D, figure 10) et une terrasse de plage plus large est présente à l'est du quai sur 0,2 km. Le site est limité à l'ouest par un épi rocheux/descente de bateau/quai et s'étire à l'est jusqu'à la limite du périmètre d'anthropisation. Tous les bâtiments et les routes sont situés au sommet de la falaise meuble. Cette dernière est principalement constituée de sable dans ce site et donc principalement influencée par l'action des vagues.

Tableau 6. Types de côte du site de Pointe-aux-Outardes

Type de côte	km	%
falaise meuble	2,9	69,0
falaise meuble à terrasse de plage	1,1	26,2
terrasse de plage	0,2	4,8
Pointe-aux-Outardes TOTAL	4,2	100

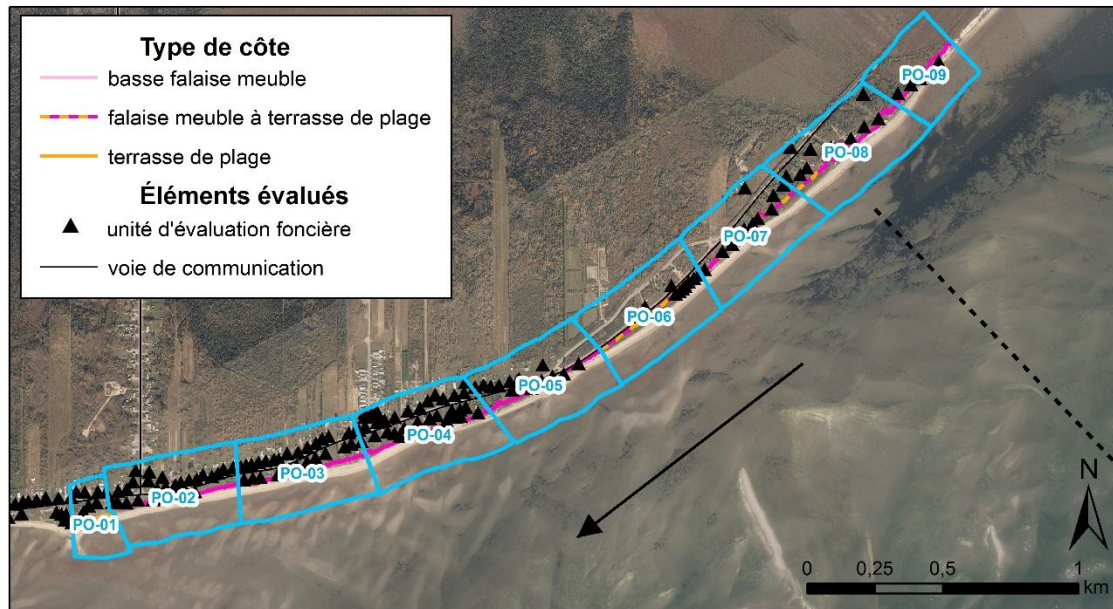


Figure 9. Site d'étude de Pointe-aux-Outardes

La dynamique hydrosédimentaire de ce site est une dérive littorale principale vers l'ouest (figure 11). Ceci explique l'accumulation sableuse que l'on retrouve à l'est du quai.



Figure 10. Planche d'images héliportées obliques du site témoin de Pointe-aux-Outardes (LDGIZC, septembre 2017)

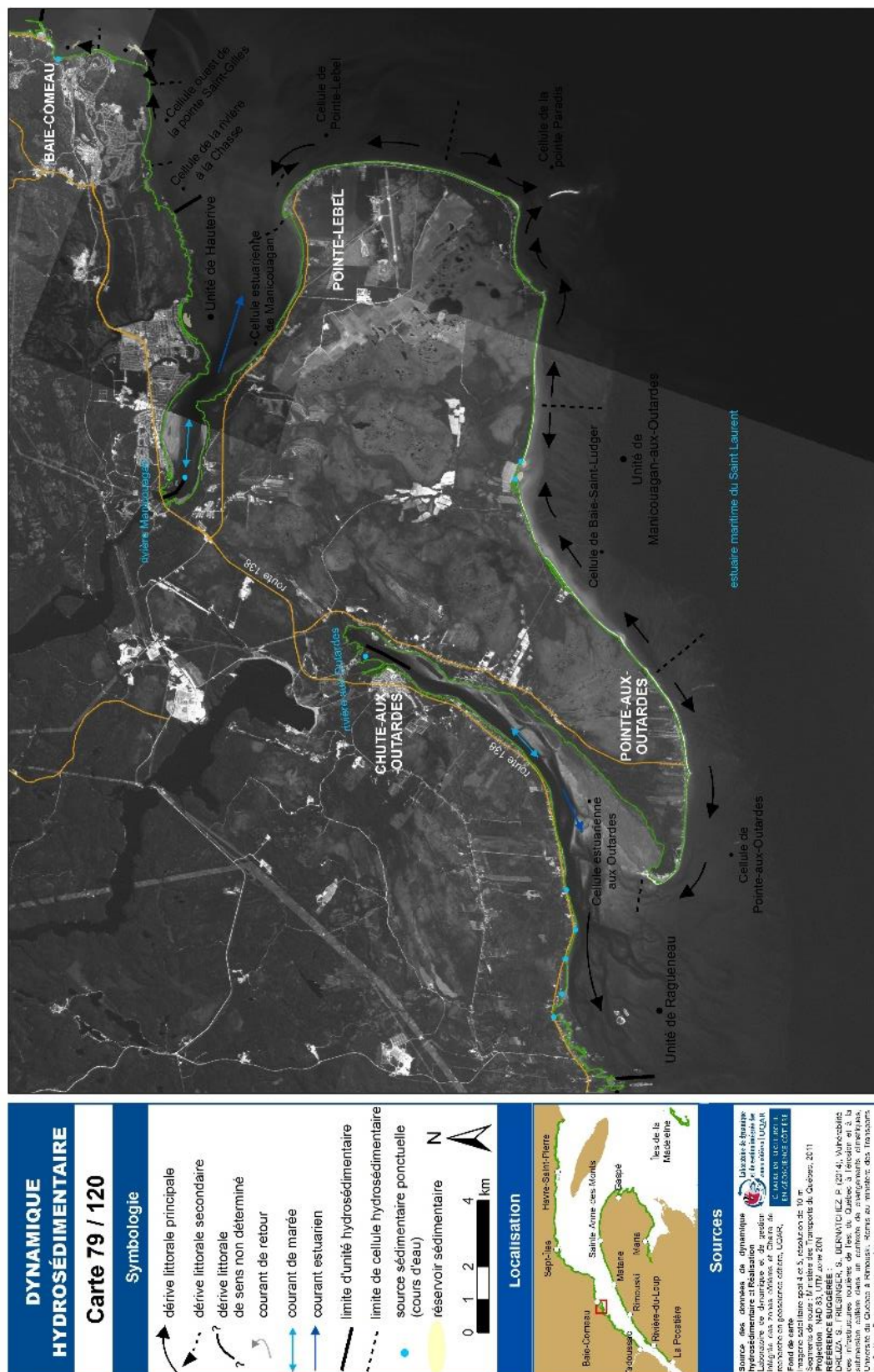


Figure 11. Dynamique hydrosédimentaire de la péninsule Manicouagan

3.2.2 Description du milieu humain

La municipalité de Pointe-aux-Outardes fait partie de la MRC de Manicouagan. Situés sur la péninsule Manicouagan, deux secteurs peuvent être distingués au sein de la municipalité : Les Buissons (dans l'estuaire de la rivière aux Outardes) et Pointe-aux-Outardes. Le secteur de Pointe-aux-Outardes n'a qu'une seule route d'accès (le chemin principal, considéré comme une route collectrice par le MTMDET). Puis, à proximité de la côte, seule une route s'étire le long de la côte (la rue Labrie), tant vers l'est que vers l'ouest. Une seule petite route secondaire municipale est présente, mais il s'agit également d'un cul-de-sac (rue David). Toute la population est bâtie le long de cette route.

Il est à noter qu'une portion de la rue Labrie a été reculée, car elle était trop proche de la falaise en érosion. Dans la partie ouest de la section déplacée, la circulation ne se fait plus, mais dans la partie est, elle dessert encore des maisons. Cependant, le réseau Hydro-Québec n'a pas, lui, été déplacé à proximité de la nouvelle route, il se situe donc encore proche du sommet de la falaise en érosion.

3.2.3 Historique des événements

Un long historique d'érosion côtière est présent dans ce site témoin.

3.3 Identification et caractérisation des aléas

Plusieurs aléas sont présents sur les deux sites d'étude, mais seules l'érosion et la submersion seront considérées dans le site d'étude de La Mitis. Par exemple, en arrière des bâtiments de l'anse aux Coques, il y a un talus qui est soumis aux glissements de terrain et des cours d'eau qui connaissent une problématique d'inondation, mais ils ne seront pas pris en compte dans cette analyse de risque.

Pour le site de la Manicouagan, seule l'érosion sera considérée puisqu'il y a seulement un terrain au niveau de l'ancien quai qui est soumis à la submersion et il n'y a aucun bâtiment dessus.

3.3.1 Érosion

Pour caractériser l'aléa d'érosion, on utilise deux éléments, soit le scénario le plus probable de déplacement futur de la côte dans un contexte de changements climatiques (en m/an) et le recul maximum possible lors d'un seul événement important (m). Ces deux éléments permettent d'évaluer de manière la plus précise possible si un bâtiment, une voie de communication ou un réseau quelconque pourraient être affectés par l'érosion.

3.3.1.1 Taux de migration annuel probable

Site d'étude de La Mitis

Les données sur la migration de la côte sont celles qui ont été produites pour le rapport intitulé « Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral des MRC de La Mitis et de La Matanie et des municipalités de Cap-Chat et Sainte-Anne-des-Monts » (Marie *et al.*, 2014). Le taux de migration annuel moyen probable pour les côtes situées dans le site d'étude de la MRC La Mitis est de -0,15 m/an et varie entre -0,55 et +0,29 m/an selon les segments de côte homogènes.

Site d'étude de la Manicouagan

Le travail d'évolution et de projection de la côte a été réalisé par Dubois *et al.* (2006), et il a été mis à jour en 2010 par le LDGIZC. C'est la version mise à jour qui sera utilisée.

3.3.1.2 Recul événementiel

Site d'étude de La Mitis

Pour le site d'étude de la MRC de La Mitis, les 1 178 stations de suivi de l'érosion de l'est du Bas-Saint-Laurent ont été considérées (MRC La Mitis, La Matanie et Rimouski-Neigette) ainsi que des municipalités de Cap-Chat et Sainte-Anne-des-Monts (secteur homogène d'un point de vue des types de côte et de la dynamique hydrosédimentaire). Les mesures ont commencé en 2003 et nous avons pu consulter les mesures réalisées jusqu'en 2016. À cela viennent s'ajouter les mesures réalisées sur le terrain par le LDGIZC à la suite de la tempête du 6 décembre 2010 (477 mesures dans les MRC de l'est du Bas-Saint-Laurent). Et également les mesures obtenues par photo-interprétation pour la période 2009-2012. Il s'agit d'une mise à jour de l'analyse de Marie *et al.*, 2014. Les reculs événementiels varient selon les types de côtes (tableau 7).

Tableau 7. Reculs événementiels pour le site de La Mitis

Type de côte	Mesure max retenue
Terrasse de plage	-14,2 m
Côte rocheuse sans falaise	-3,81 m
Basse falaise rocheuse à sommet meuble	-3,41 m

Site d'étude de la Manicouagan

Les reculs maximums qui peuvent se produire sur la Côte-Nord proviennent d'une analyse des mesures réalisées sur le terrain par le LDGIZC à la suite de la tempête du 6 décembre 2010 (131 mesures) ainsi que des mesures des stations de suivi de l'érosion (2000 à 2016). Ils varient selon les types de côte et sont présentés au tableau 8. Il s'agit d'une mise à jour de l'analyse de Drejza *et al.*, 2014.

Tableau 8. Reculs événementiels pour la Côte-Nord

Types de côte	Mesure maximale (m)
Terrasse de plage	-14,1 m
Falaise meuble	-14,6 m
Basse falaise meuble	Aucune donnée

3.3.1.3 Structures de protection

Les observations qui ont été réalisées à la suite d'événements d'érosion importants montrent que les structures mises en place par les autorités gouvernementales peuvent être fortement endommagées (Quintin *et al.*, 2013 ; figure 12) et qu'ainsi, les éléments situés en arrière-côte peuvent être soumis aux processus côtiers. Dans ce contexte, il a été décidé de ne pas considérer ces segments comme étant soustraits à l'érosion événementielle. En cela nous suivons l'approche qui a été mise de l'avant dans des études avec le MTMDET en 2014 et 2015 (Drejza *et al.*, 2014; Drejza *et al.* 2015).



Figure 12. Haut : route 132 à Sainte-Flavie après la tempête du 6 décembre 2010. Bas : Route 132 en septembre 2010 avec la présence d'un enrochement et d'un muret de bois (© LDGIZC-UQAR)

Néanmoins, dans les secteurs où l'**ouvrage de protection est mis en place par une instance publique** (MTMDDET ou municipalité), il est admis qu'après un événement d'érosion qui pourrait avoir endommagé ou détruit la structure de protection, le terrain manquant sera comblé et la structure sera remise en place à sa localisation initiale. Dans les endroits où de telles structures de protection sont présentes, la côte ne connaît pas d'érosion graduelle de manière annuelle. Dans ces secteurs de côte, le taux de déplacement le plus probable de la côte est ainsi considéré comme étant de 0 m/an, et le taux de recul événementiel est le seul à être pris en compte dans les calculs. Les autres ouvrages de protection (mis en place par des particuliers ou d'autres instances) n'ont pas été pris en compte, en effet il n'est dès lors pas possible de déterminer si elles sont bien dimensionnées selon l'environnement, si elles sont adéquatement entretenues ni si elles vont continuer à être entretenues pour les années à venir.

Ainsi, si la côte est artificialisée et que l'élément étudié se situe à une distance inférieure à un recul événementiel possible dans ce type d'environnement (tableau 7 et tableau 8), il est classé comme étant soumis au recul événementiel. Mais, si la côte est artificialisée et que l'élément se trouve à une distance supérieure à celle d'un événement dans ce type de côte, alors il ne sera pas considéré comme soumis à l'érosion et son exposition sera nulle.

3.3.1.4 Calculs de déplacement futur

Afin de calculer à quel horizon une infrastructure sera affectée par l'érosion, se référer à l'équation 1.

Équation 1. Calcul de l'horizon d'érosion pour les infrastructures côtières

$$\begin{aligned} & \text{Horizon auquel sera affecté l'élément} \\ &= \frac{(\text{distance entre l'élément et la côte} - \text{recul événementiel})}{\text{déplacement annuel moyen}} \end{aligned}$$

3.3.2 Submersion

3.3.2.1 Choix du modèle

La submersion, quelle que soit son origine, est un phénomène qui se produit lorsque le niveau de l'eau sur le littoral devient plus élevé que la première ligne de défense côtière (D_{high}), que celle-ci soit une défense naturelle (ex. sommet de dune, terrasse de plage, etc.) ou artificielle (ex. sommet d'ouvrage)¹. La submersion est le résultat d'une série de processus météo-marins complexes (basses pressions atmosphériques et fort vent d'afflux agissant lors d'une pleine mer) (Azzam *et al.*, 2014). La combinaison de la marée à la surcote provoque des niveaux d'eau plus élevés à la côte, auxquels s'ajoutent de fortes vagues qui génèrent des phénomènes de surélévation suite au déferlement (*setup*) et de jets de rives (*runup*) (jet de rive = *swash* + *setup*) (Cariolet et Suanez, 2013 ; Stockdon *et al.*, 2006) (figure 13).

¹ La submersion lors de tsunamis ou glissements de terrain n'est pas abordée.

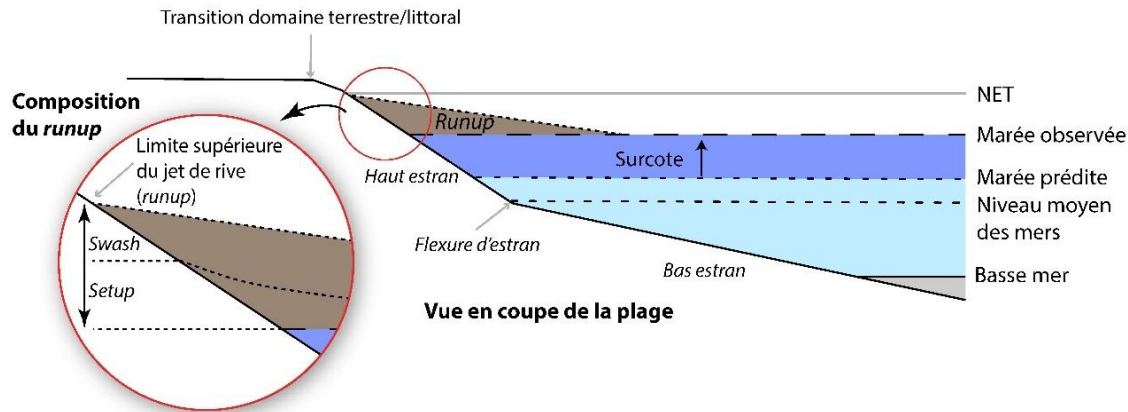


Figure 13. Schématisation des phénomènes à l'origine de la submersion

Ainsi, le passage des vagues en eaux peu profondes induit une élévation du niveau d'eau à la côte qui voit sa limite supérieure définie par la nappe d'eau projetée sur la plage. Le jet de rive peut franchir la défense côtière (naturelle ou artificielle) et varier en fonction des conditions morphodynamiques des plages (Sallenger, 2000 ; Stockdon *et al.*, 2009). Une submersion n'est donc pas homogène, sa surface étant définie par les variations morphologiques le long de la côte. La pente de la plage est le principal paramètre morphologique qui influence le jet de rive (Hunt, 1959) sur les plages réfléchissantes à forte pente. La pente s'intègre notamment dans les modèles empiriques qui assument une uniformité de la plage (Roelvink *et al.*, 2009). En milieu dissipatif, il est connu que le rôle de la pente soit moins important et les modèles empiriques ne prennent en considérations que les caractéristiques des vagues au large.

Lorsque la plage est complexe, notamment en raison de barres d'avant-côte ou de pentes convexes ou concaves, l'emploi de modèles empiriques devient difficile, et les modèles numériques peuvent être plus adaptés. Le modèle numérique XBeach, développé notamment par Deltares aux Pays-Bas (Roelvink *et al.*, 2009), est couramment utilisé pour calculer les niveaux d'eau atteints et le jet de rive (Stockdon *et al.*, 2014). Il prend en considération plusieurs variables qui influencent les vagues à la côte, comme 1) la propagation (réfraction, diffraction, réflexion) et la dissipation due au déferlement ; 2) la surélévation de l'eau liée aux vagues au déferlement (*setup*) ; 3) les courants induits par les vagues ; 4) les interactions vagues-courants ; et 5) le transport sédimentaire. Il peut calculer la réponse de la plage en termes d'érosion, de franchissement et de destruction de la défense côtière (naturelle ou artificielle) par une brèche (Roelvink *et al.*, 2009). Sa principale force est qu'il puisse résoudre l'effet des vagues infragravitaires suite au déferlement, et ces vagues sont souvent présentes lors de tempêtes très énergétiques au cours desquelles les plus courtes vagues (vagues incidentes) déferlent avant d'atteindre la côte. Le potentiel de XBeach à calculer les niveaux de submersion est théoriquement plus élevé que les formules empiriques sur des plages aux pentes complexes et plus particulièrement en présence de secteurs subissant un drainage important qui complique les projections d'écoulement de l'eau vers les terres (Gallien *et al.*, 2014). Par contre, les modèles

numériques exigent généralement un temps de traitement plus important, ce qui justifie parfois une comparaison des modèles empiriques et numériques (Orton *et al.*, 2015 ; Patrick *et al.*, 2015). Dans les deux cas, une étape de validation doit être effectuée.

Le long de la côte, certains secteurs sont plus sensibles à la submersion que d'autres : dans un tel cas, une méthode basée sur les équations empiriques de jets de rive (ou *setup* uniquement si la composante haute fréquence sur la plage est inconnue) peut permettre d'identifier les zones d'interventions prioritaires. Cette approche avait été présentée dans le rapport intermédiaire CPS15-16-09 (Didier *et al.*, 2017). Pour le rapport final, il a été justifié de n'avoir recours qu'à la modélisation numérique en mode 2D afin d'utiliser une méthode standardisée pour l'ensemble des secteurs. De plus, comme il en sera question au point 3.3.2.2, le modèle XBeach avait une performance légèrement meilleure que la méthode empirique.

3.3.2.2 Validation du modèle

Le modèle numérique de morphodynamique XBeach (*eXtreme Beach behaviour*) permet de simuler le jet de rive infragravitaire, dû aux ondes longues, ce que d'autres modèles numériques (ex. Delft3D, LISFLOOD, etc.) ne permettent pas, et simule un champ de vagues à l'approche de la côte et donc les profondeurs d'eau au-dessus de la topographie. De plus, pour les plages, il possède un module de transport pour simuler les brèches et les déplacements de sédiments causés par l'érosion/accumulation. Il est donc particulièrement pratique pour évaluer les risques côtiers. Pour cartographier la submersion, cet outil est intéressant surtout dans les milieux plus complexes comme les plages mobiles avec barres sableuses, les marais côtiers, les systèmes dunaires.

La validation du modèle XBeach a été réalisée 1) grâce à des capteurs installés sur l'estran de l'anse au Lard et de la pointe aux Coques pour valider les niveaux d'eau et les vagues prédites sur la plage et 2) afin de valider l'extension d'une inondation connue, soit celle du 6 décembre 2010. Les séries temporelles analysées couvrent les périodes du 1^{er} au 15 novembre 2014. Les capteurs de pression enregistrent les fluctuations de la pression dynamique liées au passage des vagues et fournissent des données sur les hauteurs de vagues et les niveaux d'eau aux 17 minutes. Forcé par des données observées sur un instrument au large dans le cadre du projet MODESCO, XBeach montre une performance élevée. La validation réalisée sur ces sorties de vagues (H_s) montre des corrélations supérieures à 0,79, avec des erreurs quadratiques moyennes (RMSE) inférieures à 15 cm et un biais moyen de l'ordre de 5 cm. La performance du modèle pour simuler les niveaux d'eau est quasi parfaite, avec des corrélations de 0,99 (R^2) et des écarts minimes (biais moyen $\leq 0,05$ m, RMSE $\leq 0,10$ m et écart type $\leq 0,07$ m).

Les niveaux de submersion observés le 6 décembre 2010 ont également été modélisés avec XBeach, en utilisant les sorties du modèle WW3 (ces données avaient été présentées dans le rapport intermédiaire CPS15-16-09 (Didier *et al.*, 2017)). Le modèle a un succès de l'ordre de 66 %,

ce qui montre la capacité du modèle à simuler la submersion côtière. Ces résultats sont du même ordre de grandeur que ce qui est mentionné dans la littérature internationale (Alfieri *et al.* 2014; Bates *et al.* 2005 ; Bates, Horritt et Fewtrell, 2010 ; Gallien *et al.* 2014).

3.3.2.3 Sélection des scénarios

Afin de simuler les niveaux d'eau à la côte associés aux récurrences de 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans, une méthode d'estimation des probabilités conjointes (Hawkes *et al.* 2002) a été utilisée. Une série temporelle jointe et synchrone de vagues et niveaux d'eau (horaire) a été créée. Les vagues proviennent du point de simulation WW3 devant l'anse au Lard et les niveaux d'eau (avec surcote) proviennent des archives du Service Hydrographique du Canada pour la station de Rimouski. La sélection d'une méthode statistique d'analyse des niveaux d'eau extrêmes est un sujet d'actualité majeur dans la gestion des risques côtiers (Brown, Prime et Plater 2015 ; Phillips *et al.* 2017 ; Prime, Brown et Plater 2016 ; Rueda *et al.* 2016 ; Sadegh, Ragno et AghaKouchak 2017). La raison principale de ces questionnements fondamentaux réside sur le fait que plusieurs méthodes existent, mais offrent des résultats différents. Par exemple, il est possible d'utiliser une méthode univariée, basée sur le choix d'une variable qui serait particulièrement prépondérante sur l'aléa. Ce choix est souvent réalisé lorsqu'une série synchrone bivariée n'est pas accessible. Par ailleurs, l'estimation de la probabilité représentée sous forme de période de retour sera généralement réalisée grâce à des lois de probabilités ajustées aux valeurs extrêmes (théorie des valeurs extrêmes). Pour ce projet, comme une relativement longue série commune vagues | niveaux d'eau était disponible, une méthode bivariée a été utilisée, et la méthode des maxima annuels a été sélectionnée pour définir la population (Kergadallan 2013). Un total de 27 maxima de niveaux d'eau a servi de premier seuil de sélection des événements, conjointement à la plus haute vague simulée à ± 24 heures de cette sélection (Moftakhari *et al.* 2017).

Le logiciel MvCAT développé exclusivement pour sélectionner la meilleure copule a été utilisé. Pour plus d'information, il est possible de se référer à la publication de Sadegh *et al.* (2017). Le logiciel évalue 26 modèles paramétriques de copules bivariées. Basé sur le critère d'information d'Akaike (AIC) et la RMSE (0,29), le modèle de copule de Joe a été sélectionné comme étant le plus représentatif des données disponibles pour le site d'étude. Pour chaque courbe de période de retour similaire, le choix du scénario a été fait sur l'événement où la plus forte densité de probabilité est présente (en rouge sur les courbes) (figure 14).

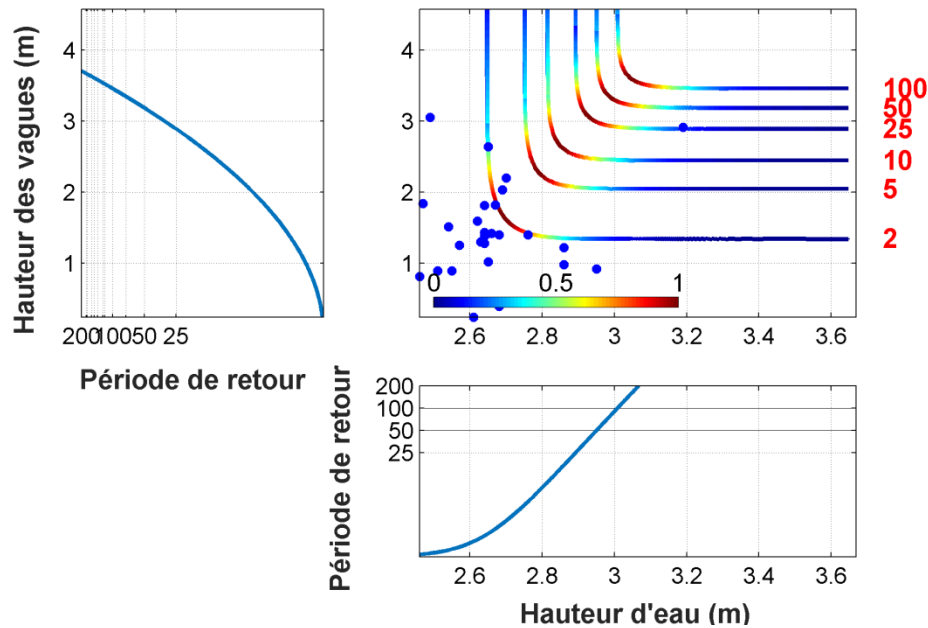


Figure 14. Périodes de retour conjointes vagues et niveaux d'eau

3.3.2.4 Configuration du modèle

Les conditions des vagues à la frontière offshore du modèle ont été forcées par un spectre JONSWAP paramétré à l'aide des hauteurs de vagues (H_{m0}), de direction moyenne de propagation et de période pic (T_p). Les domaines simulés s'étendent de la côte jusqu'à la position du point de simulation au centre du domaine au large. Ils sont orientés parallèlement aux isobathes avec une résolution qui varie de 50 m à 2 m du large vers la côte, et demeurent constants à 5 m le long de la côte. Pour plus d'information sur les bathymétries, il est possible de se référer au rapport CPS15-16-09 (Didier *et al.*, 2017).

XBeach possède deux différents modes : un mode hydrostatique et un mode non hydrostatique. Dans le premier mode, l'évolution des vagues gravitaires est résolue sur l'échelle des « paquets » de vagues indépendamment des vagues d'infragravité. Ce mode ne permet pas de résoudre la phase des vagues et ne permet donc pas de résoudre le *runup* lié aux vagues gravitaires. Le mode non hydrostatique résout quant à lui explicitement la phase des vagues et permet donc de simuler le *runup* lié aux vagues gravitaires. Toutefois, ce mode est très demandant en temps de calcul ce qui le rend inapproprié pour cette étude. Toutes les simulations ont donc été réalisées en mode hydrostatique. Il est à noter que bien que le modèle XBeach soit capable de représenter les processus morphodynamiques notamment de sédimentation et d'érosion, ces processus n'ont pas été pris en compte dans les simulations présentées. De plus, considérant la faible variabilité de la période des vagues sur le site d'étude en période de tempête (6-7 secondes), pour chaque

simulation, la période des vagues a été fixée à 7 secondes (T_p), ce qui est sensiblement similaire aux vagues observées le 6 décembre 2010 (6,9 secondes).

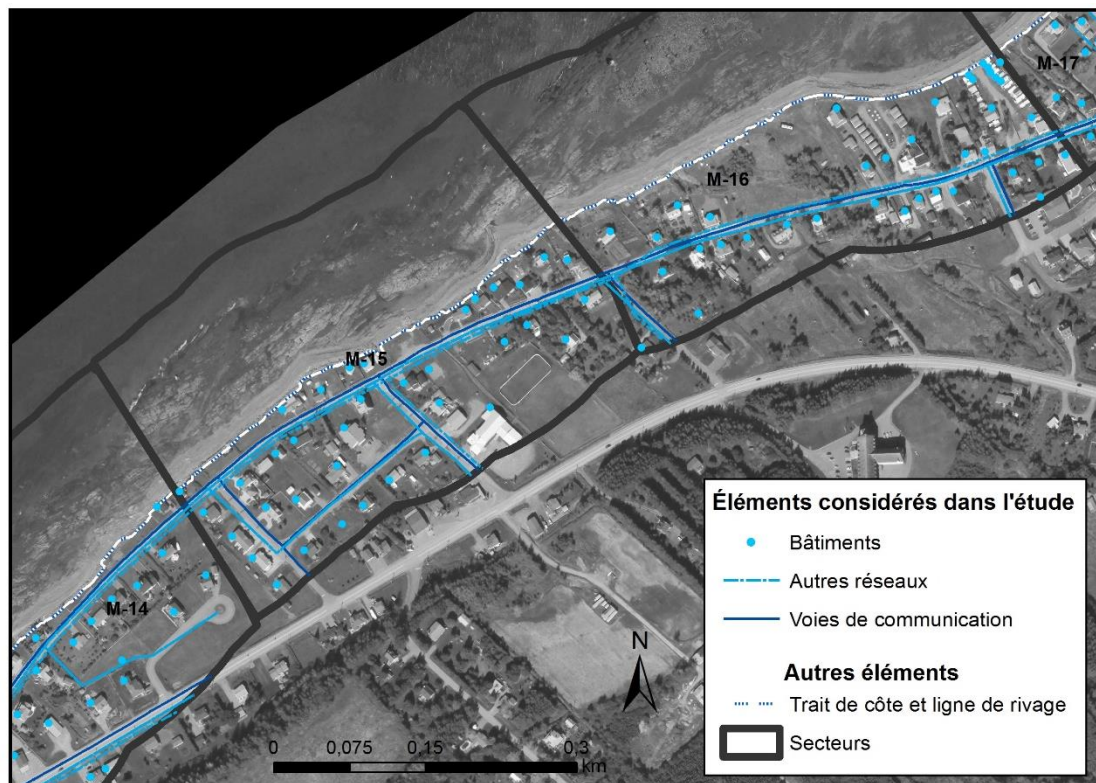
Enfin, le paramètre en sortie du modèle utilisé pour la cartographie est la profondeur d'eau. Le seuil qui sépare une cellule mouillée d'une cellule sèche a été fixé à 0,005 (défaut dans XBeach). Tous les pixels situés en dessous de 0,005 ont donc été considérés comme étant en dehors de la zone submergée.

3.4 Établissement du profil de vulnérabilité

3.4.1 Éléments considérés dans l'étude

Les éléments qui ont été considérés dans cette étude sont les voies de communication, les bâtiments et les autres réseaux situés dans une bande côtière de 150 mètres par rapport à la côte (figure 15), qu'ils soient exposés ou non aux aléas d'érosion et de submersion côtière.

Toutes les informations ont été intégrées dans une base de données spatiale sous forme de différents fichiers forme (*shapefiles*). La description des champs est présentée en annexe.



Plusieurs sources des données ont été utilisées :

- Les lignes électriques de distribution ont été numérisées sur l'imagerie la plus récente. Il est admis que les mêmes poteaux hébergent également le câble, ainsi que les lignes téléphoniques.
- Les réseaux d'aqueduc et d'égouts ont été fournis par les MRC concernées sous format numérique.
- Les bâtiments considérés viennent du Rôle d'évaluation foncière du MAMOT de 2016. Ils ont été ajustés manuellement sur les images les plus récentes pour se situer sur la bordure côtière du bâtiment.
- Les voies de communication utilisées ont été adaptées à partir d'un fichier du MTMDET afin que la ligne soit située sur le côté de la mer de la voie (par ordre de préférence sur la ligne blanche, la limite de l'asphalte ou la limite de la végétation).

3.4.2 Facteurs de vulnérabilité

Les facteurs théoriques pouvant influencer la vulnérabilité ont été identifiés suite à une revue de littérature, à la connaissance du terrain et aux rencontres avec les gestionnaires. Ces facteurs théoriques sont représentés pour la création de l'indice par différents paramètres concrets et mesurables qui ont été caractérisés puis pour lesquels des scores variant de 1 à 5 leur ont été assignés selon qu'ils contribuaient à augmenter (5) ou non (1) la vulnérabilité.

3.4.2.1 Facteurs liés à l'exposition aux aléas

Pour l'**exposition** à l'aléa **érosion**, la distance à la côte des éléments étudiés et le nombre d'années avant d'être affecté par l'érosion a été pris en compte, ainsi que la sécurité liée à l'érosion et au type de côte.

Pour l'**exposition** à l'aléa **submersion**, c'est l'épaisseur potentielle d'eau affectant les éléments et sa récurrence qui ont été pris en compte, ainsi que la sécurité liée au déferlement et à la projection de débris.

3.4.2.2 Facteurs liés aux infrastructures étudiées

Les autres paramètres utilisés dépendent du type d'éléments (type de construction ...), mais également de l'environnement dans lequel ils se situent (altitude, type de côte, lithologie de la côte...).

Voici les paramètres qui ont été pris en compte pour déterminer la vulnérabilité des éléments exposés :

Pour les bâtiments :

- Le type de bâtiment et son utilisation
- Le nombre de personnes affectées
- La sécurité des personnes dues à la présence de fenêtre ou d'ouverture dans le sous-sol

Pour les voies de communication :

- Le type de voie de communication et son importance
- La longueur de détour en cas de perturbation
- La facilité à réparer la rupture de service

Pour les réseaux d'aqueduc, d'égout et d'électricité :

- Le type de réseau
- La sécurité directe pour les personnes vis-à-vis des réseaux

Pour l'ensemble des éléments exposés :

- Le rang dans lequel se trouve l'élément exposé par rapport à la côte.

4. Analyse des risques

4.1 Analyse de l'exposition aux aléas et des conséquences potentielles

4.1.1 Paramètres de la matrice de calcul

Comme mentionné précédemment, les paramètres pouvant influencer la vulnérabilité des éléments exposés ont été caractérisés puis des scores variant de 1 à 5 leur ont été assignés selon qu'ils contribuaient à augmenter (5) ou non (1) la vulnérabilité. Ce type de score est beaucoup employé dans la littérature ayant trait à la vulnérabilité (Boruff *et al.*, 2005 ; McLaughlin et Cooper, 2010 ; Meur-Férec *et al.*, 2008 ; McLaughlin *et al.*, 2002 ; Fontaine et Steinemann, 2009). Les seuls éléments dont le score peut être de 0 sont l'exposition aux aléas d'érosion et de submersion. En effet, ce sont les seuls éléments qui peuvent annuler la vulnérabilité.

Il est à noter que si deux types de côtes différents sont présents (par exemple une terrasse de plage en arrière de laquelle se situe une falaise), il est important de considérer le type d'environnement sur lequel se situe la construction et non celui de la côte active actuellement. Donc, si l'infrastructure est située sur une falaise, les scores pour la facilité de réparation et le danger lié à l'érosion seront ceux liés au type de côte de la falaise. Par contre, pour calculer la date potentielle d'exposition à l'érosion, on tient compte des deux environnements différents (soit un certain nombre d'années avec un taux de recul pour la terrasse de plage puis un taux différent pour la falaise selon la distance restante).

4.1.2 Paramètres relatifs à l'érosion

Distance entre la côte et les bâtiments : la distance utilisée est calculée de manière automatique par ArcGIS. Il s'agit de la distance minimale entre la côte et un coin ou un côté du bâtiment. Le trait de côte utilisé est celui qui a été tracé sur les images de 2012 pour le secteur de La Mitis et sur les images de 2016 pour le secteur de la Manicouagan.

Distance voies de communication/côte et autres réseaux/côte : pour les segments linéaires, la distance utilisée est celle qui est la plus faible entre la côte et chaque segment de 10 m. Pour les voies de communication, la ligne numérisée représente la bordure de la voie qui correspond à la ligne blanche latérale, si elle est présente, sinon la limite de l'asphalte. Dans le cas des chemins non pavés, la limite gravier/végétation a été utilisée. Pour les réseaux d'égouts et d'aqueduc, ce

sont les emplacements reçus des MRC qui ont été utilisés. Et pour les lignes électriques, il s'agit de la ligne reliant les différents poteaux. Le choix de la distance minimale s'explique par le fait que dès qu'une partie du segment est affectée c'est l'ensemble du segment qui peut être considéré comme n'assurant pas son service.

Selon les résultats de l'équation 1 (section 3.3.1.4), l'année potentielle à laquelle l'élément sera probablement exposé a été catégorisée et un score est associé à chaque catégorie (tableau 9).

Tableau 9. Détails du score « Exposition à l'érosion »

Score d'exposition à l'érosion [<i>ScoreEro</i>]		Nombre d'années par rapport à la côte	
		de 2012	de 2016
Définition	Risque	-	-
Immédiat ou proche	5	-	-
Très court terme (d'ici 2020)	5	< 8 ans	< 4 ans
Court terme (2020 à 2040)	4	8 à 28 ans	4 à 24 ans
Moyen terme (2040 à 2060)	3	28 à 48 ans	24 à 44 ans
Long terme (plus de 2060)	0	Plus de 48 ans	Plus de 44 ans

4.1.3 Paramètres relatifs à la submersion

Les scores ont été déterminés selon l'épaisseur d'eau potentielle sur le terrain entourant un bâtiment ou sur la voie de communication et selon la récurrence de l'événement qui entrainera cette épaisseur d'eau (tableau 10). Advenant une différence entre les modèles selon les récurrences, le score le plus élevé sera considéré. Pour plus d'information, se référer à la section 3.3.2.

Tableau 10. Détails du score « Exposition à la submersion »

Exposition à la submersion (épaisseur potentielle d'eau) [<i>ScoreSub</i>]			
Selon le modèle (voir section 3.3.2)	Récurrence 10 ans	Récurrence 50 ans	Récurrence 100 ans
pas d'eau	0	0	0
Inférieur à 0,01 m d'eau (aux limites du modèle)	1	1	0
0,01 à 0,2 m d'eau	3	2	1
0,20 à 0,50 m	5	4	3
0,50 à 1,00 m	5	4	4
plus de 1,00 m d'eau	5	5	4

Dans certaines études (par exemple : Robichaud *et al.*, 2014; Simard *et al.*, 2014; Aubé *et al.*, 2016...), des hauteurs d'eau différentes ont été utilisées pour l'exposition à la submersion des voies de communication ou des bâtiments. Il a été décidé de ne pas effectuer cette distinction dans cette étude, car le risque est considéré comme similaire pour les deux types d'éléments.

En l'absence de données de submersion modélisées (si l'on devait utiliser la méthode "bathtub" par exemple, ou une valeur de niveau d'eau moyenne), il faudrait également considérer la distance entre les voies de communication/bâtiments et la côte, car cela a une influence importante en termes d'atténuation de la nappe d'eau et des vagues (comme cela a été considéré dans l'étude de Drejza *et al.*, 2015 pour le MTMDET). Mais pour cette étude, la modélisation avec le logiciel XBeach tient déjà compte de cela dans le modèle informatique, il n'est donc pas nécessaire d'inclure de nouveau ce paramètre (cela causerait une redondance dans les paramètres).

4.1.4 Paramètres relatifs aux éléments exposés

4.1.4.1 Infrastructures ponctuelles (bâtiments)

Les bâtiments considérés viennent du Rôle d'évaluation foncière du MAMOT de 2016 (secteur de La Mitis) et de 2010 (secteur de la Manicouagan). Le plus récent disponible devrait être utilisé pour que les usages soient le plus actuel possible. Cependant, si sur les images héliportées obliques du LDGIZC de septembre 2017 des modifications étaient visibles (démolition d'un bâtiment, ajout d'une construction, déplacement d'une maison...) cela a été ajusté dans la base de données. La colonne d'information du type d'occupation du bâtiment selon la catégorisation du code d'utilisation prédominant de l'unité d'évaluation a été utilisée pour catégoriser le type d'usage (code CUBF = Codes d'utilisation des biens-fonds) (MAMOT, 2018). Les points étaient initialement situés au centroïde du polygone d'évaluation foncière. Ils ont été déplacés sur le côté du bâtiment le plus proche de la côte. Il est à noter que les terrains non bâtis n'ont pas été considérés dans cette analyse, les points les représentants ont été retirés.

Sont également prises en compte les données des plans de mesures d'urgence qui référencent les sites d'hébergement temporaire pour chacune des municipalités.

Deux catégorisations ont été effectuées pour les types de bâtiments selon les deux aléas étudiés (tableau 11 et tableau 12). En effet, ce ne sont pas les mêmes éléments qui rendent les éléments

les plus vulnérables. Par exemple pour la submersion, le fait de dormir dans un bâtiment augmente le risque (d'autant plus si cela est couplé avec la présence de chambres au sous-sol). Ou pour l'érosion, si des bâtiments liés à des réseaux d'aqueduc ou d'électricité sont érodés, alors c'est tout le réseau qui ne pourra plus fonctionner, alors que la submersion temporaire n'empêchera pas l'équipement de fonctionner.

Tableau 11. Détails du score « Type de bâtiment-submersion »

Type de bâtiment de submersion [ScoreTypBS]	
Type d'utilisation prédominant de l'évaluation foncière (selon le code CUBF)	Score
Autres éléments : aqueduc, service de télécommunication, parc... (construction, élément utile ponctuel, mais pas réellement de bâtiment)	1
Bâtiment où personne ne dort (commerces, industries, restaurants...)	2
Bâtiment où des personnes dorment (résidence, logement, chalet, hôtel, motel...)	3
Bâtiment de vie de personnes vulnérables (résidences pour personnes âgées, personnes ayant une déficience intellectuelle, CPE, services de garderie, écoles...)	4
Hôpital, lieu d'hébergement de sinistré, poste de police, poste de pompier	5

Tableau 12. Détails du score « Type de bâtiment - érosion »

Type de bâtiment pour l'érosion [ScoreTypBE]	
Type d'utilisation prédominant de l'évaluation foncière (selon le code CUBF)	Score
Autres éléments : parc...	1
Bâtiment non occupé et qui n'est pas une activité économique (espace de rangement, église, site patrimonial...)	2
Résidence, logement, chalet, hôtel, motel, commerces, restaurants, industries	3
Bâtiment de vie de personnes vulnérables (résidences pour personnes âgées, personnes ayant une déficience intellectuelle, CPE, services de garderie, écoles...)	4
- Hôpital, lieu d'hébergement de sinistré, poste de police, poste de pompier - Éléments assurant le fonctionnement de services essentiels (service télécom, aqueduc, égout, électricité...)	5

Dans la méthodologie proposée ici, les autres paramètres que l'on peut obtenir grâce au recensement n'ont pas été considérés alors que certaines études québécoises les utilisent de manière soutenue pour établir un profil de vulnérabilité (Thomas, Bleau *et al.*, 2012). En effet,

cela s'applique peu pour les deux secteurs d'études, car la population est beaucoup plus faible et les aires des diffusions occupent un grand territoire (pour respecter des raisons de confidentialité de la donnée). Ainsi toute la zone côtière de la municipalité de Sainte-Luce est dans une seule aire de diffusion, ce qui ne permet pas de discriminer des secteurs sur la base de ces données socio-économiques. Pour Sainte-Flavie, toute la zone côtière, excepté une résidence, est également dans une aire de diffusion. Ainsi les différences locales par bâtiments ou par secteurs de 500 m ne pourraient pas ressortir. C'est pourquoi il a été décidé de ne pas utiliser les données du recensement. De plus il est important de noter que la même problématique se retrouve pour la presque totalité des petites municipalités côtières de l'Est du Québec.

Le nombre de personnes affectées est considéré (tableau 8) soit par le biais du nombre moyen de personnes par ménage par municipalité pour les résidences principales ou secondaires (tableau 9). Pour les hôtels/motels et autres hébergements touristiques, le nombre de chambres a été utilisé et il a été considéré que l'établissement serait complet (occupation double). Pour les commerces et autres industries, c'est le nombre moyen d'employés qui est utilisé soit selon le site web de l'entreprise si l'information est disponible, sinon le nombre moyen de personnes par ménage est utilisé.

Tableau 13. Détails du score « Population directement affectée »

Population directement affectée [ScorePerso]	
Définition	Score
moins de 2	1
2 à 5	2
5 à 7	3
7 à 10	4
plus de 10	5

Tableau 14. Nombre moyen de personnes par ménage par municipalité

Municipalité	Nombre
Pointe-aux-Outardes	2,3
Pointe-Lebel	2,2
Rimouski	2,1
Sainte-Luce	2,2
Sainte-Flavie	2,1

Sources des informations : recensement de 2016, Statistique Canada, données en ligne (<http://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/dp-pd/prof/index.cfm?Lang=F>)

Il est important de noter que pour l'aléa de submersion le fait que des personnes dorment dans un sous-sol ou un rez-de-chaussée semi-enfoui est potentiellement à risque pour la vie des gens. Ainsi, à partir des images héliportées prises en septembre 2017 par le LDGIZC, il a été évalué si les bâtiments présentent un sous-sol avec des ouvertures fenestrées (donc potentiellement des pièces à vivre), des ouvertures non fenestrées ou une absence d'ouvertures. Selon le résultat obtenu, un score concernant la sécurité des personnes liées aux processus de submersions selon le type de bâtiment a été déterminé (tableau 15).

Tableau 15. Détails du score « sécurité des personnes liée aux processus de submersion – type de bâtiment »

Sécurité liée aux processus de submersion [ScoreSecST]	
Définition	Score
Absence d'ouverture/de sous-sol	1
Présence d'ouverture autre que des fenêtres, portes-fenêtres...	4
Présence d'un sous-sol avec ouvertures fenestrées (fenêtre, porte-fenêtre...) Présence d'un rez-de-chaussée situé sous le niveau du sol	5

Concernant la sécurité des personnes pour la submersion, il est parfois impossible de déterminer s'il y a présence ou non de sous-sol (souvent ce sont des bâtiments qui sont en arrière côte, dans des arbres, hors de vue des images héliportées). Pour le site de la MRC de La Mitis, 134 bâtiments sont concernés, mais aucun n'est exposé à l'érosion ni à la submersion (10, 50 ou 100 ans). Advenant le cas que certains bâtiments aient été exposés, soit il devrait y avoir une visite terrain pour déterminer la présence d'ouvertures en sous-sol. Sinon, pour un principe de précaution, le score le plus élevé devrait être utilisé.

4.1.4.2 Voies de communication (entités linéaires)

Pour les voies de communication, des segments de 10 m ont été découpés de manière automatisée et chacun a été étudié de manière individuelle. Une caractérisation du type de voies de communication est utilisée pour déterminer l'importance de la route dans le réseau de transport. Cette caractérisation représente également une approximation du débit de véhicules qu'elle supporte.

Tableau 16. Détails du score « Type de voies de communication »

Type de voies de communication [ScoreTypeL]	
Type	Score
Route abandonnée	0
Chemin de gravier	1
Route abandonnée, mais qui dessert encore des maisons	
Voie secondaire municipale (+ local 3 du MTMDET)	2
Route municipale (+ local 2 + collectrice du MTMDET)	3
Route nationale	4
Autoroute	5

Une analyse en réseau a été effectuée à l'aide de l'outil « Network Analyst ». Cet outil permet de calculer la route la plus courte entre deux endroits à la fois en condition habituelle, mais également en incluant la présence d'obstacles (segments de route submergés ou érodés par exemple). Il est ainsi possible de déterminer la longueur du détour qui devra être effectué advenant un événement de submersion et/ou d'érosion. Bien que les auteurs soient conscients que les événements d'érosion ou de submersion peuvent affecter de multiples segments de route de manière simultanée, pour notre analyse la perturbation de chaque segment a été considérée de manière individuelle. La longueur du détour qui doit être effectuée pour rejoindre l'autre côté de la perturbation a été catégorisée en 6 groupes (tableau 17).

Tableau 17. Détails du score « Voie de contournement »

Voie de contournement [ScoreConto]	
Longueur en kilomètres	Score
<15 km	1
15 à 30 km	1,5
30 à 50 km	2
50 à 100 km	3
>100 km	4
aucune	5

De plus, la facilité de rétablissement du service de transport a été évaluée selon le type d'environnement. Un score a été attribué pour ce paramètre (tableau 18).

Tableau 18. Détails du score « Facilité à rétablir le service »

Facilité à réparer la rupture de service [ScoreRuptu]	
Définition	Score
Pas de difficultés : côte basse - relativement facile à réparer	1
Peu de difficultés : falaises rocheuse ou sableuse, sommet plat, pas de risque de glissement	2
Quelques difficultés (lagune, cours d'eau, étang, terrain avec beaucoup de relief...)	3
Difficultés cumulées (par exemple : relief important + cours d'eau)	4
Très difficile : falaises soumises à glissement – sols instables	5

4.1.4.3 Paramètres pour les réseaux (égouts, aqueduc, électricité)

Les réseaux étudiés sont les égouts, l'aqueduc, l'électricité, le téléphone et le câble. Il a été considéré que la submersion ne les affecterait pas (c.-a.-d. que ce ne sont pas des éléments qui sont sensibles à cet aléa). Les lignes électriques, de câble et de téléphone car elles sont en hauteur, les autres réseaux sont enfouis et la submersion est uniquement temporaire et ne pénètre pas en profondeur. Pour le site de la MRC La Mitis, dans la zone côtière, il n'y pas de lignes de transport ou d'autres infrastructures majeures d'Hydro-Québec (les lignes de transport ont une tension supérieure et assurent la desserte d'un grand nombre de personnes, ce ne sont pas les lignes que l'on retrouve dans les rues de nos villes et villages qui sont plutôt des lignes de distribution). Mais advenant le cas que ce type de ligne soit présent en zone côtière, il faudrait que cela soit intégré dans le calcul de vulnérabilité et que le score maximal leur soit attribué (tableau 19) étant donné les répercussions majeures qui peuvent découler d'un bris à une ligne de transport.

Tableau 19. Détails du score « Type réseau »

Type réseau [ScoreTypeR]	
Définition	Score
Ligne de transport Hydro-Québec	5
Ligne de distribution Hydro-Québec (inclus téléphone et câble)	4
Aqueduc	3
Égout	2

Si les données fournies intègrent l'aqueduc et l'égout sur une seule ligne (par exemple dans la MRC de La Mitis), il est important de la dédoubler. En effet, sinon le calcul du score et donc de l'indice ne sera pas comparable avec les secteurs où les deux traits ont été numérisés à des positions différentes de manière distincte (par exemple dans la MRC de Rimouski-Neigette).

Les réseaux d'aqueduc sont importants pour la distribution d'eau potable, le côté sanitaire, mais également pour des raisons de sécurité incendie (lien avec les bornes incendies qui ne seraient plus alimentées), c'est pour cela qu'ils ont un score supérieur aux égouts.

Les infrastructures ponctuelles spécifiques qui sont reliées aux réseaux municipaux et électriques doivent être ajoutées aux points du rôle d'évaluation (s'ils ne sont pas déjà présents dans celui-ci). Dans le cas du secteur de La Mitis, il n'y en a pas dans la zone côtière. Pour le score pour la submersion, le type de bâtiments spécifique à la submersion le prend en compte, mais ils ont un score de 1, car la submersion les affecte peu et les dommages seraient limités (tableau 11). Pour le score de type de bâtiment pour l'érosion (tableau 12), les bâtiments listés ci-après assurent un rôle dans les réseaux vitaux pour les municipalités, c'est pourquoi leur score est important et a été établi à 5 :

- Équipements de communication (centrale téléphonique, tour relais, tour de communication...)
- Point d'épuration des eaux
- Prise d'eau potable de la MRC
- Usine de traitement des eaux

Le tableau 20 présente le score relié à la **sécurité directe pour les personnes** en cas d'atteinte du réseau par l'aléa. Par atteinte directe on entend l'atteinte à la sécurité et à l'intégrité physique des personnes qui découlerait du bris du réseau. En effet, contrairement au bris d'une résidence ou d'un commerce qui peut accueillir des personnes, le bris de réseaux locaux d'électricité, d'aqueduc ou d'égout n'est pas direct, mais lié à leur usage et le service qu'ils rendent selon leur type (qui est déjà pris en compte dans le ScoreTypeR au tableau 19).

Tableau 20. Détails du score de « Sécurité directe des personnes vis-à-vis des réseaux »

Type réseau [ScoreSecR]	
Définition	Score
Pas de personnes directement affectées par la rupture du réseau (pas de danger à la sécurité)	1
Sécurité liée à des équipements de très haute tension	4
Danger pour la sécurité des personnes (rupture de barrage...)	5

La **facilité à rétablir le service** a également été considérée comme pour les voies de communication, avec les mêmes scores (tableau 18).

4.1.4.4 Paramètres communs

Un paramètre de « **rang côtier** » a été développé. Il a été déjà utilisé lors de l'étude de Drejza *et al.* (2015) pour le MTMDet qui portait sur la vulnérabilité des routes. Il s'agit du nombre de rangées d'infrastructures présentes entre l'élément étudié et la côte. Par exemple, une route en position « rang 1 » est le premier élément bâti que l'on retrouve à proximité de la côte. Au contraire, une résidence « rang 3 » est une résidence qui se trouve, par rapport à la côte, derrière deux éléments comme une série de maisons et une route (secondaire). En effet, un bâtiment ou une route situés directement à proximité de la côte sera plus exposé aux aléas que si d'autres éléments (p.e. route, maison, motel, commerce, résidences pour personnes âgées, roulottes « fixes », cantine, restaurant, halte routière, chemin de fer...) se situent entre la côte (c.-à-d. la source d'aléa) et l'élément étudié. Les champs, terrains non bâtis et parcs ne sont pas inclus dans le décompte du rang côtier. C'est pourquoi les scores sont inversement proportionnels au rang côtier (tableau 21).

Les lignes de distribution d'Hydro-Québec, les réseaux d'aqueduc et d'égout se voient également attribuer un score, mais comme ils se trouvent la plupart du temps sous les routes ou dans l'accotement de celles-ci, alors ils ne sont pas considérés comme une « rangée d'infrastructures » pour effectuer le décompte du score. Ils se voient attribuer le même score que la route sous/à côté de laquelle ils se situent.

Tableau 21. Détails du score « Rang côtier »

Rang côtier [ScoreRang]	
Définition	Score
rang 1	5
rang 2	4
rang 3	3
rang 4	2
rang 5 et +	1

La localisation des éléments exposés par rapport à la côte et au type de côte, exerce une influence importante sur la sécurité des personnes. En effet, le déferlement violent, la présence de débris importants, le swash et les courants sont présents sur une distance plus réduite que l'étendue de

la nappe d'eau. Les débris peuvent être parfois majeurs et occasionner des dommages aux bâtiments, mais également des blessures voire des décès (figure 16). Suite à l'analyse, des scores ont été attribués selon les situations dans lesquelles se trouvent les éléments considérés (tableau 22).

Tableau 22. Détails du score « sécurité des personnes liée aux processus de submersion - localisation »

Sécurité liée au déferlement [ScoreSecSL]	
Définition	Score
Franchissement de l'ouvrage de protection contre l'érosion : - élément potentiellement submersible - moins de 10 m entre l'élément étudié et la côte « rang 1 » (c.-à-d. aucun autre élément entre la côte et celui étudié) - côte artificialisée	5
Franchissement de la ligne de rivage : - élément potentiellement submersible - moins de 10 m entre l'élément étudié et la côte « rang 1 » (c.-à-d. aucun autre élément entre la côte et celui étudié) - côte naturelle	3
Autres situations	1



Figure 16. Débris de bois et blocs d'enrochement sur une route suite à la tempête du 6 décembre 2010 à Rimouski (© LDGIZC-UQAR)

La sécurité liée aux processus d'érosion a été déterminée. Cela dépend du type de côte comme présenté au tableau 23 (ajusté de Drezja *et al.*, 2015). Cela s'explique selon la soudaineté des processus qui vont survenir et le type de processus potentiels. Dans certaines côtes l'érosion probable arrive graduellement (comme dans les terrasses de plage), alors que dans certaines côtes soumises à des processus de glissements (falaise argileuse par exemple), le taux de déplacement annuel est une moyenne et les reculs peuvent se produire selon des processus soudains. Il est donc moins aisé de « voir venir » l'érosion, de s'ajuster et de garantir la sécurité.

Tableau 23. Détails du score « Sécurité liée aux processus d'érosion »

Sécurité liée aux processus d'érosion [ScoreSecEr]	
Définition	Score
côte basse (inclus les terrasses de plage, les flèches littorales, les basses falaises...) côtes rocheuses (ignées ou non)	1
côte à falaise rocheuse sédimentaire côte à falaise meuble sableuse côte en pente forte à partir du trait de côte	3
côte à falaise meuble avec glissements possibles	5

4.2 Identification et évaluation des mesures de contrôle existantes

Les mesures de « contrôle » des aléas présentes sur le territoire ont été identifiées grâce aux relevés de photographies héliportées obliques de la côte. Cependant, des mesures d'adaptation structurelles telles que l'artificialisation de la côte sur les côtes basses sablonneuses n'influencent pas le recul événementiel, car de très nombreux exemples illustrent la destruction de structures suite à des événements majeurs (même si l'instance gouvernementale va réparer ou reconstruire l'ouvrage de protection à la même place par la suite, les éléments présents en arrière peuvent être affectés par l'érosion). Pour la submersion, ils ne sont pas conçus pour offrir une protection et aggravent souvent le problème. La mal-adaptation est donc prise en compte dans les paramètres (voir tableau 22). Cependant l'artificialisation est prise en compte quant à l'érosion à long terme et si on connaît le propriétaire de l'ouvrage (qui doit être public comme le MTMDET ou la municipalité et s'être engagé à l'entretenir). Donc dans ces cas-là le taux de déplacement moyen annuel à long terme (en m/an) est ramené à 0 m/an.

Les mesures de contrôle globales telles que les politiques provinciales et nationales n'ont pas été prises en compte, car ces paramètres sont appliqués de manière homogène sur tout le territoire québécois.

Les adaptations non structurelles telles que le transport alternatif, la mise en place de patrouille de suivi, de plans de mesures d'urgence... n'ont pas été prises en compte. Cela a été choisi afin de connaître la vulnérabilité « réelle » de chaque élément et chaque secteur, puis présenter les options déjà en place et enfin discuter des mesures à poursuivre et/ou ajouter selon l'impact sur les paramètres de la vulnérabilité.

4.3 Estimation du niveau de vulnérabilité et de risque

Il est à noter que la quantification du niveau de risque nécessite la connaissance de la probabilité d'occurrence des aléas. Comme décrit à la section 3.3.2, pour ce qui a trait à l'aléa de submersion, c'est une information dont nous disposons. En ce sens, on peut parler de niveau de risque de submersion. Cependant, la méthodologie qui est notre disposition actuellement pour l'aléa d'érosion ne permet pas de quantifier de probabilité associée. C'est pourquoi nous préférons utiliser le terme de niveau de vulnérabilité pour l'érosion ainsi que lorsque l'on traite des deux aléas côtiers (érosion et submersion).

4.3.1 Calcul des indices individuels

Le type de calcul utilisé pour cette étude est celui qui est souvent utilisé dans les indices de vulnérabilité (p.e. Gornitz, 1990 ; Pendleton *et al.*, 2004 ; Boruff *et al.*, 2005 ; Gorokhovich *et al.*, 2014 ; Bagdanaviciute *et al.*, 2015), il s'agit de la racine carrée du produit divisé par le nombre de termes.

$$\text{Sous - Indice} = \sqrt{([paramètre\ 1] * [paramètre\ 2] * [...] * [paramètre\ N]) / N}$$

4.3.1.1 Érosion

Pour ce qui a trait à l'érosion, deux équations ont été utilisées pour les bâtiments et les voies de communication et les autres réseaux (équation 2, équation 3 et équation 4).

Équation 2. Calcul du sous-indice de vulnérabilité à l'érosion pour les bâtiments

VulnEroBâtiment

$$= \sqrt{[ScoreEro] * [ScoreTypeB] * [ScorePerso] * [ScoreRang] * [ScoreSecEr] / 5}$$

Équation 3. Calcul du sous-indice de vulnérabilité à l'érosion pour les voies de communication

$$VulnEroL = \sqrt{\frac{[ScoreEro] * [ScoreTypeL] * [ScoreConto] * [ScoreRang] * [ScoreSecEr] * [ScoreRuptu]}{6}}$$

Équation 4. Calcul du sous-indice de vulnérabilité à l'érosion pour les autres réseaux

VulnEroR

$$= \sqrt{[ScoreEro] * [ScoreTypeR] * [ScoreRang] * [ScoreRuptu] * [ScoreSecR] * [ScoresecEr] / 6}$$

4.3.1.2 Submersion

Pour ce qui a trait à la submersion, deux équations ont été utilisées pour les bâtiments et les voies de communication (équation 5 et équation 6). Comme mentionné à la section 4.1.4.3, les autres réseaux, ne sont pas considérés comme vulnérables à la submersion de par leur configuration.

Équation 5. Calcul du sous-indice de vulnérabilité à la submersion pour les bâtiments

$$VulnSubBâtiment = \sqrt{\frac{[ScoreSub] * [ScoreTypeB] * [ScorePerso] * [ScoreRang] * [ScoreSecST] * [ScoreSecSL]}{6}}$$

Équation 6. Calcul du sous-indice de vulnérabilité à la submersion pour les voies de communication

$$VulnSubL = \sqrt{\frac{[ScoreSub] * [ScoreTypeL] * [ScoreConto] * [ScoreRang] * [ScoreSecSL]}{5}}$$

4.3.1.3 Indice synthétique

Par la suite, un indice synthétique pour l'érosion et la submersion a été calculé. Il a été nommé IVIC (Indice de Vulnérabilité des Infrastructures Côtières). Chaque sous-indice est rapporté à 1, car n'ayant pas le même nombre de paramètres considérés, les résultats doivent être normalisés pour être mis ensemble pour l'érosion et la submersion et entre les bâtiments, les voies de communication et les autres réseaux. En effet, nous ne considérons pas que l'un ou l'autre des aléas ou l'un ou l'autre des types d'éléments anthropiques ait plus d'importance que les autres sur la vulnérabilité globale. Par la suite une moyenne des deux sous indices est effectuée afin d'obtenir l'IVIC (équation 7).

Équation 7. Calcul de l'indice de vulnérabilité des infrastructures côtières synthétique individuel

$$IVIC_{individuel} = ([Iero] + [Isub])/2$$

4.3.2 Calcul des indices par secteur

Les secteurs considérés comprennent 500 m de côte et tout le secteur terrestre jusqu'à 150 m de la côte (ainsi que tout ce qui peut être situé du côté mer également si des infrastructures se situent sur l'estran par exemple). Une somme de tout ce qui se retrouve dans chacun des polygones est effectuée (après la normalisation des indices) (équation 8).

Équation 8. Calcul de l'indice de vulnérabilité des infrastructures côtières synthétique pour les secteurs

$$IVIC_{secteur} = \sum IVIC_{bâtiments} + \sum IVIC_{voies\ de\ communication} + \sum IVIC_{autres\ réseaux}$$

4.4 Résultat pour le site d'étude de La Mitis

Pour les secteurs M-01 à M-06, il n'y a pas de données de submersion disponibles pour l'ensemble des secteurs, il n'a donc pas été possible de déterminer l'IVIC ou le sous-indice de vulnérabilité à la submersion. Cependant, il est possible de connaître le sous-indice concernant l'érosion.

4.4.1.1 Éléments individuels

Pour l'**érosion**, 375 éléments ponctuels sont vulnérables parmi les 1102 qui ont été étudiés sur le site de La Mitis. Leur indice moyen est de 0,19 et varie entre 0,35 et 0,04. La quasi-totalité (plus de 94 %) est des logements individuels, des chalets ou maisons de villégiature ou des roulottes résidentielles (tableau 24). De plus, 1309 segments de voies de communication sont vulnérables sur les 4380 étudiés et leur indice est en moyenne de 0,08 et varie entre 0,03 et 0,10. Près de la moitié des voies de communication affectées par l'érosion sont la route nationale 132 (tableau 25). Pour les autres réseaux, 1735 segments sont vulnérables à l'érosion avec un IEro moyen de 0,07 variant entre 0,03 et 0,08. Presque la moitié sont des lignes de distribution Hydro-Québec (tableau 26).

Tableau 24. Bâtiments affectés par l'érosion

Type de bâtiments	Nombre	%
Auberge ou gîte touristique	1	0,27
Autres immeubles résidentiels	2	0,53
Autres types de production végétale	1	0,27
Chalet ou maison de villégiature	135	36,00
Établissement d'hébergement	1	0,27
Hôtel (incluant les hôtels-motels)	3	0,80
Immeuble de bureaux	1	0,27
Logement	191	50,93
Maison mobile	12	3,20
Motel	3	0,80
Parc d'amusement (extérieur)	3	0,80
Presbytère	1	0,27
Résidence de tourisme, appartement, maison ou chalet (meublé et équipé pour repas)	1	0,27
Restaurant et établissement avec service complet (sans terrasse)	4	1,07
Roulotte résidentielle	14	3,73
Vente au détail de poissons et de fruits de mer	1	0,27
Vente au détail, magasin à rayons	1	0,27
Total général	375	100,00

Tableau 25. Voies de communication affectées par l'érosion

Type de voie	Nb	longueur (m)	%
Chemin de gravier	15,00	142,82	1,11
Local 2	150,00	1473,04	11,42
Voie secondaire municipale	17,00	162,04	1,26
Route municipale	518,00	5094,35	39,49
Route nationale	609,00	6027,89	46,73
Total général	1309,00	12900,15	100

Tableau 26. Autres réseaux affectés par l'érosion

Type	Nb	longueur (m)	%
Aqueduc	595	5868,3	34,20
Égout	326	3208,1	18,70
Hydro-Québec distribution	814	8079,8	47,10
Total	1735	17156,2	100,00

Pour la **submersion**, 281 éléments ponctuels sont vulnérables (tableau 28). Leur indice varie entre 0,49 et 0,02 (moyenne de 0,14). Ce sont encore presque exclusivement des éléments d'habitation (à plus de 94 %). Pour les routes c'est un total de 642 segments soit 6,35 km. Contrairement à l'érosion où c'était plutôt des routes nationales, pour la submersion, ce sont en majorité des routes municipales qui sont affectées (tableau 27). Leur indice varie entre 0,04 et 0,49 et en moyenne de 0,14. Pour la submersion, il n'y a pas d'autres réseaux qui sont affectés (voir méthodologie, section 4.1.4.3).

Tableau 27. Voies de communication affectées par la submersion

Type de voies	Nombre	Longueur (m)	%
Chemin de gravier	9,00	90,00	1,42
Local 2	19,00	181,13	2,85
Voie secondaire municipale	74,00	730,98	11,51
Route municipale	346,00	3430,57	54,02
Route nationale	194,00	1918,12	30,20
Total général	642,00	6350,80	100,00

Tableau 28. Bâtiments affectés par la submersion

Type de bâtiments	Nb	%
Auberge ou gîte touristique	1	0,36
Autres immeubles résidentiels	3	1,07
Autres systèmes d'égouts	1	0,36
Chalet ou maison de villégiature	106	37,72
Établissement d'hébergement	1	0,36
Hôtel (incluant les hôtels-motels)	3	1,07
Logement	133	47,33
Maison mobile	16	5,69
Motel	3	1,07
Parc d'amusement (extérieur)	1	0,36
Restaurant et établissement avec service complet (sans terrasse)	3	1,07
Roulotte résidentielle	10	3,56
Total général	281	100,00

D'un point de vue **combiné** pour les deux aléas étudiés (IVIC), 419 éléments ponctuels sont vulnérables et leur niveau varie entre 0,35 et 0,01 avec une moyenne de 0,13 et un écart type de 0,08. Et 1404 segments de voies de communication. Les indices varient entre 0,29 et 0,02 avec une moyenne de 0,06 et un écart type de 0,05. Le score le plus élevé est atteint pour les segments de route nationale 132. Pour les autres réseaux, 1735 segments sont vulnérables avec un IVIC moyen de 0,03 variant entre 0,02 et 0,04.

4.4.1.2 Secteurs de côte

Les secteurs les plus vulnérables (en rouge sur la carte) sont les secteurs M-23 et M-25. Ce sont des secteurs situés dans l'anse aux Coques et immédiatement à l'est de celle-ci (figure 17). Pour ces deux secteurs, la majorité de la vulnérabilité provient des voies de communication (respectivement 53 % et 58%). Pour le secteur M-23 il y a également 36 % de la vulnérabilité qui provient des bâtiments. Puis, les autres secteurs beaucoup plus vulnérables que la moyenne (2 écarts types plus que la moyenne, en orange sur la carte) sont : M-09 dans l'est de l'anse au Lard, M-20 à M-22 dans l'anse aux Coques, M-37 et M-50. Des cartes détaillées de ces secteurs peuvent être consultées à l'annexe 8.6. Elles comprennent l'IVIC, mais aussi les sous-indices d'érosion et de submersion ainsi que les bâtiments, voies de communication et réseaux vulnérables ou non.

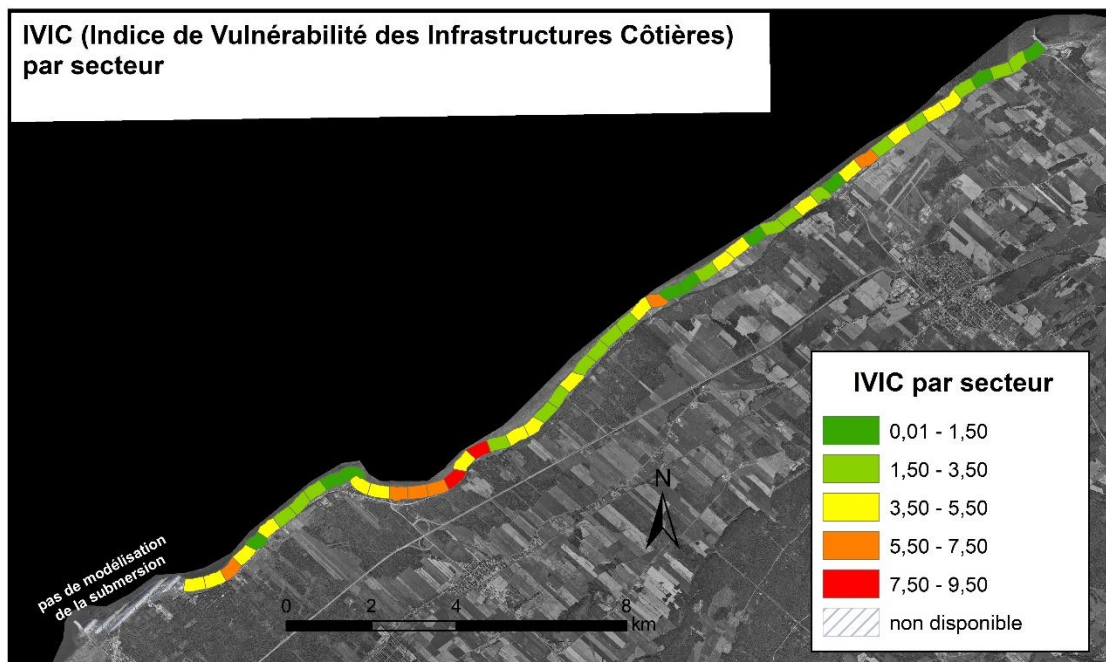


Figure 17. Indices de vulnérabilité des infrastructures côtières par secteur.

L'IVIC moyen est de 3,5 et l'écart type est de 2. Les IVIC varient entre 0,13 et 9,23. L'IVIC est un indice qui est une somme, celle-ci se compose des valeurs d'IVIC des différents bâtiments, des segments de voies de communication et segments de réseau qui se situent dans le secteur. Ainsi, il est possible de déterminer quel type d'élément (bâtiments, voies de communication, réseaux) cause plus de 50 % de la somme de l'IVIC total. Selon les secteurs le type d'élément est variable et pour certains secteurs, c'est une combinaison des 3 types d'éléments sans que l'un soit majoritaire (tableau 29).

Tableau 29. Les IVIC de quel type d'élément causent-ils la majorité de l'IVIC global du secteur ?

Type d'élément	Nombre de secteurs	Proportion (%)
Bâtiments	15	28%
Pas de majorité – tous les éléments	17	31%
Réseaux	6	11%
Voies de communication	16	30 %

Pour ce qui concerne le **sous-indice relié à la submersion (ISub)**, le secteur le plus vulnérable est le secteur M-23 situé dans l'est de l'anse aux Coques. Puis les segments ayant l'indice de vulnérabilité à l'érosion le plus élevé sont les segments M-21, 22 et 25, situés également dans l'anse aux Coques (figure 17). Il est à noter que 6 secteurs n'ont aucun élément vulnérable à la submersion et que 6 secteurs (M-01 à M-06) n'ont pas pu être étudiés. Le niveau moyen de vulnérabilité est de 2,37 pour la submersion (écart type de 2,84, variant entre 0,00 et 12,45).

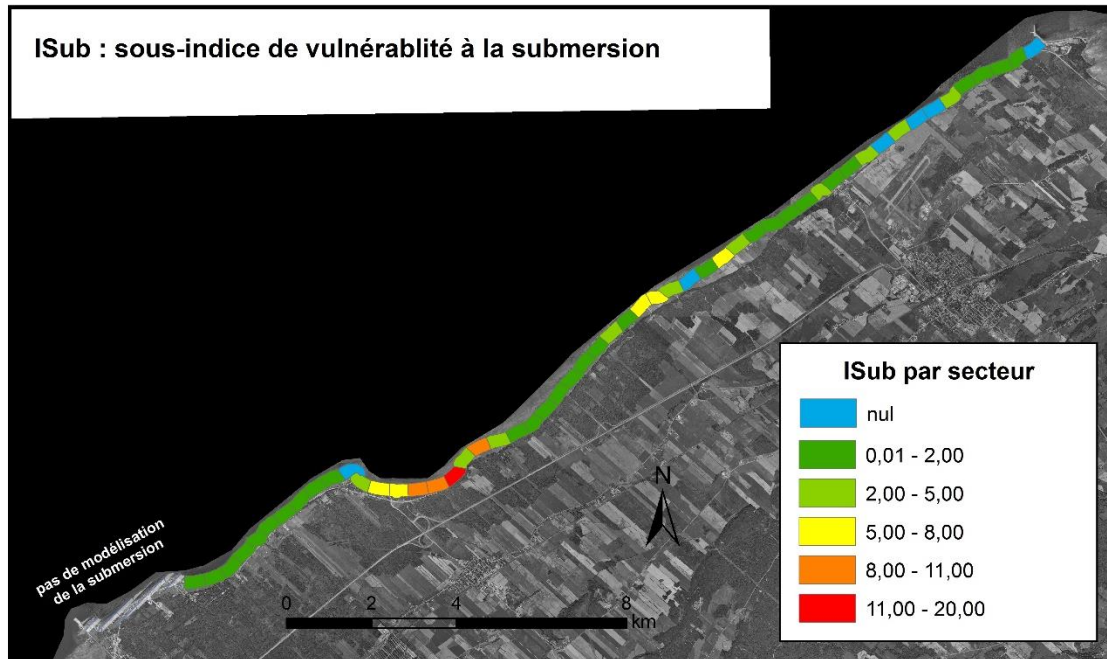


Figure 18. Sous-indice de vulnérabilité à la submersion par secteur

Pour ce qui concerne le **sous-indice relié à l'érosion (IEro)**, le secteur le plus vulnérable est le secteur M-02 majoritairement en raison des réseaux d'aqueduc, d'égout et d'électricité qui seront affectés (en plus de la route municipale) sur l'ensemble de la longueur du secteur. Puis les secteurs très vulnérables sont les secteurs M-07, M-09 et M-10. Cependant, tous les secteurs sont affectés par cet aléa contrairement à la submersion. Le niveau moyen de vulnérabilité à l'érosion est de 4,79 avec un écart type de 2,75. Les sous-indices varient entre 0,26 et 15,32.

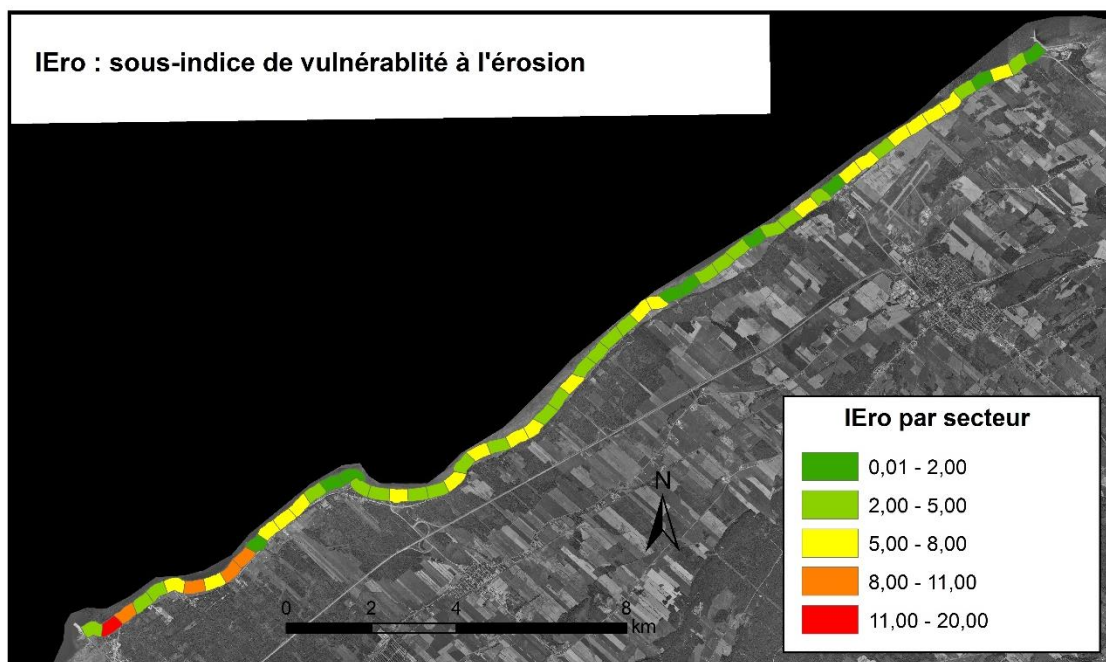


Figure 19. Sous-indice de vulnérabilité à l'érosion par secteur

4.5 Résultat pour le site d'étude de Manicouagan

4.5.1.1 Éléments individuels

Pour l'érosion, 52 éléments ponctuels sont vulnérables parmi les 111 qui ont été étudiés sur le site de Pointe-aux-Outardes. Leur indice moyen est de 0,33 et varie entre 0,38 et 0,26. La quasi-totalité (plus de 98 %) est des logements individuels, des chalets ou des maisons de villégiature, des maisons mobiles ou des logements (tableau 30), mais principalement des résidences principales (82,7 %). De plus, 140 segments de voies de communication sont vulnérables (pour un total de 1376 m) sur les 460 segments étudiés et leur indice moyen est de 0,23 variant entre 0,15 et 0,31. La grande majorité des voies affectées par l'érosion sont des routes locales 3 (sous responsabilité municipale) (tableau 31). Pour les autres réseaux, 332 segments sont vulnérables à l'érosion avec un indice moyen de 0,15 variant entre 0,10 et 0,20. Ce sont environ moitié d'aqueduc et moitié de lignes de distribution Hydro-Québec (tableau 32).

Tableau 30. Type de bâtiments vulnérables à l'érosion

Type de bâtiments	Nb	%
Autres immeubles résidentiels	5	9,6
Chalet ou maison de villégiature	2	3,8
Logement	43	82,7
Maison mobile	1	1,9
Vente en gros de poissons et de fruits de mer	1	1,9
Total	52	100,0

Tableau 31. Type de voies de communication vulnérables à l'érosion

Type de voie de communication	Nombre de segments	Longueur en m	%
Collectrice	3	23,8	1,7
Local 3	110	1090,6	79,3
Route abandonnée (mais dessert encore des maisons)	27	261,5	19,0
Total	140	1375,8	100,0

Tableau 32. Type d'autres réseaux vulnérables à l'érosion

Type de réseau	Nb de segments	Longueur m	%
Aqueduc	188	1839,39	56,6
Hydro-Québec distribution	144	1413,07	43,4
Total	332	3252,46	100,0

D'un point de vue **combiné** pour les deux aléas étudiés (IVIC), 52 éléments ponctuels sont vulnérables et leur niveau varie entre 0,19 et 0,13 avec une moyenne de 0,17 et un écart type de 0,02. Et 140 segments de voies de communication avec des indices varient entre 0,15 et 0,08 avec une moyenne de 0,12 et un écart type de 0,02. Pour les autres réseaux, 332 segments sont vulnérables avec un IVIC moyen de 0,08 variant entre 0,05 et 0,10.

4.5.1.2 Secteurs de côte

Les secteurs les plus vulnérables (en rouge sur la figure 20) sont les secteurs P-02, PO-05 et PO-06. Bien que le sous-indice de vulnérabilité à la submersion soit nul pour l'ensemble des secteurs, car l'aléa de submersion n'est pas présent, l'IVIC est tout de même très élevé. Cela provient du fait que la vulnérabilité à l'érosion est importante (par exemple, les bâtiments ont un indice

moyen de 0,33 sur la péninsule Manicouagan alors qu'il est seulement de 0,16 à Sainte-Flavie ; pour les voies de communication, c'est 0,23 contre 0,08). Ceci est lié notamment à la sécurité liée au type de côte : des falaises avec plus de 5 m de hauteur peuvent présenter des risques pour la sécurité de personnes plus importants que des côtes basses. Pour les voies de communication, il y a également le fait que la rue Labrie est la seule route qui dessert ce secteur. Tout bris entraînerait donc une rupture totale de lien routier alors que dans le site de La Mitis le réseau est plus redondant avec plusieurs voies présentes en zone côtière ou en arrière côte.

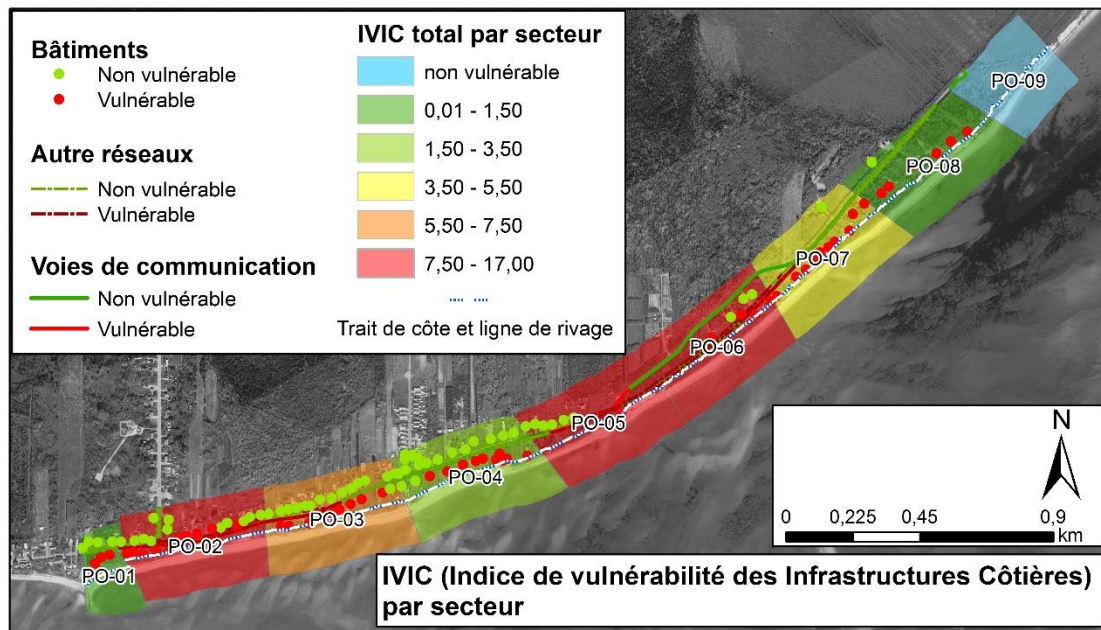


Figure 20. Indices de vulnérabilité des infrastructures côtières par secteur.

Pour le secteur PO-02, la vulnérabilité globale est due dans une proportion similaire (environ à 45 %) aux voies de communication ainsi qu'aux autres réseaux présents. Cependant pour le secteur PO-05 vulnérabilité est majoritairement due aux réseaux, mais avec près de 40 % de l'IVIC total provenant des voies de communication. Et pour le secteur PO-06, la vulnérabilité est due aux réseaux à plus de 80 %.

5. Utilisation de l'outil et recommandations

L'Indice de Vulnérabilité des Infrastructures Côtières (IVIC) qui est proposé ici a été réalisé au meilleur des connaissances de l'équipe de recherche et selon la littérature scientifique. Il est important de noter que l'indice qui a été conçu peut être adapté selon les priorités et les éléments qui sont les plus importants pour le ministère ou pour d'autres intervenants. Chaque paramètre (score) peut être ajusté individuellement et il peut également y avoir un ajustement entre les différents types d'éléments (réseaux, bâtiments, routes) lors du calcul de la vulnérabilité pour chacun des secteurs.

5.1 Utilisation de l'outil

L'outil a été conçu pour pouvoir être utilisé de manière globale, mais également pour pouvoir être décomposé et pour pouvoir utiliser à la fois les indices individuels, mais aussi les résultats par secteurs de côte.

5.1.1 Décomposer l'IVIC

L'IVIC peut être décomposé selon les besoins des usagers, que ce soit par type d'élément ou par type d'aléa. Il est également possible de regarder chaque paramètre individuellement.

5.1.1.1 IVIC par type d'éléments

Les IVIC pour chaque type d'éléments sont disponibles dans les polygones de secteurs. Ainsi, il est possible de savoir quel type d'élément (voies de communication, réseaux ou bâtiments) rend l'IVIC global le plus important, ainsi que le nombre d'éléments vulnérables. L'information est disponible dans la base de données (annexe 8.4).

5.1.1.2 IVIC par type d'aléas

Il est également possible de consulter les sous-indices d'érosion (IEro) et de submersion (ISub), afin de déterminer si les deux aléas sont la cause de la vulnérabilité globale ou si l'un est plus problématique pour le secteur auquel on s'attarde. Ceci permet de mieux comprendre la situation du secteur, et ainsi d'envisager des solutions adaptées.

Par exemple sur la figure 21, on peut constater que le secteur M-09 a un IVIC élevé de 5,78, mais il découle presque exclusivement de l'indice d'érosion (IEro = 9,64, 2 bâtiments, 84 segments de réseaux et 48 segments de voies de communication affectés) alors que la submersion est faible dans ce secteur (ISub = 1,91 et seulement 2 bâtiments et 13 segments de voies de communication sont affectés). Au contraire, pour le secteur M-23 (figure 22), on peut constater que la majorité de la vulnérabilité est induite par l'aléa de submersion (ISub de 12,45 et IEro de 6,02). La submersion pourrait affecter 75 éléments avec un indice moyen de 0,17. Mais il est important de noter que l'érosion est toute de même présente et affecter 67 éléments ; cependant l'indice moyen d'érosion n'est « que » de 0,09.

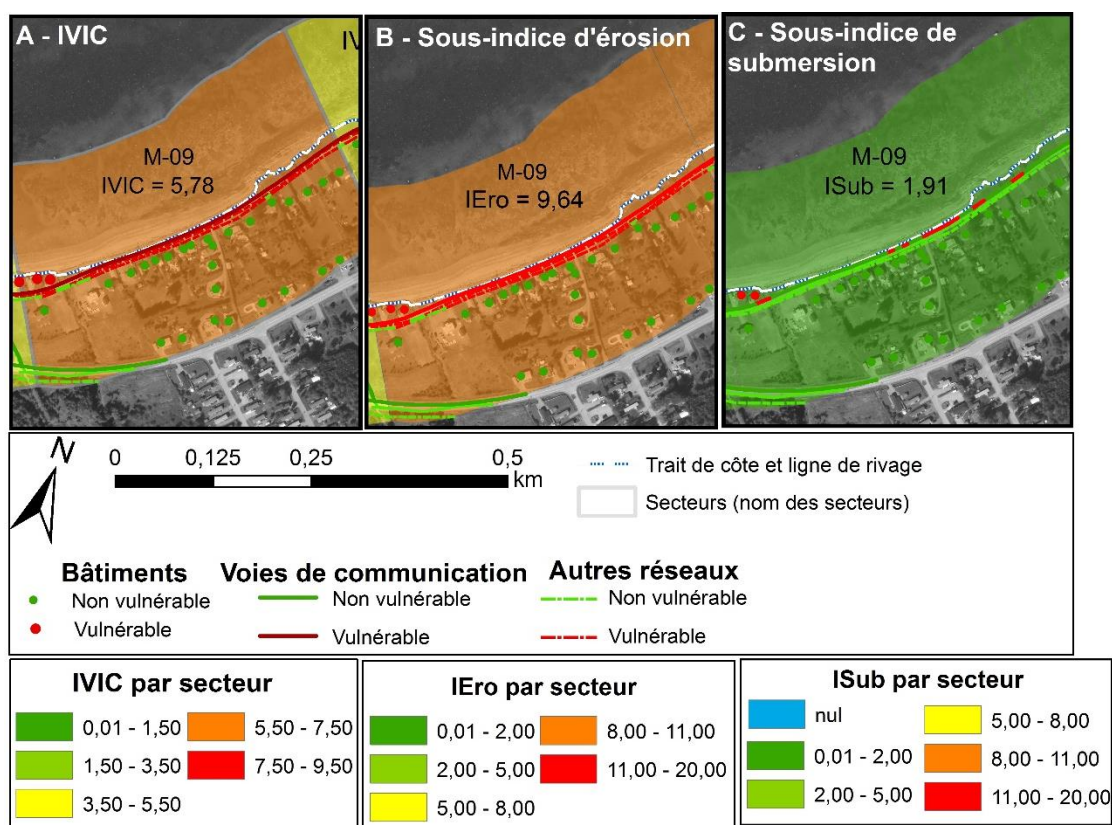


Figure 21. Secteur M-09, site de La Mitis : l'IVIC découle principalement de l'érosion

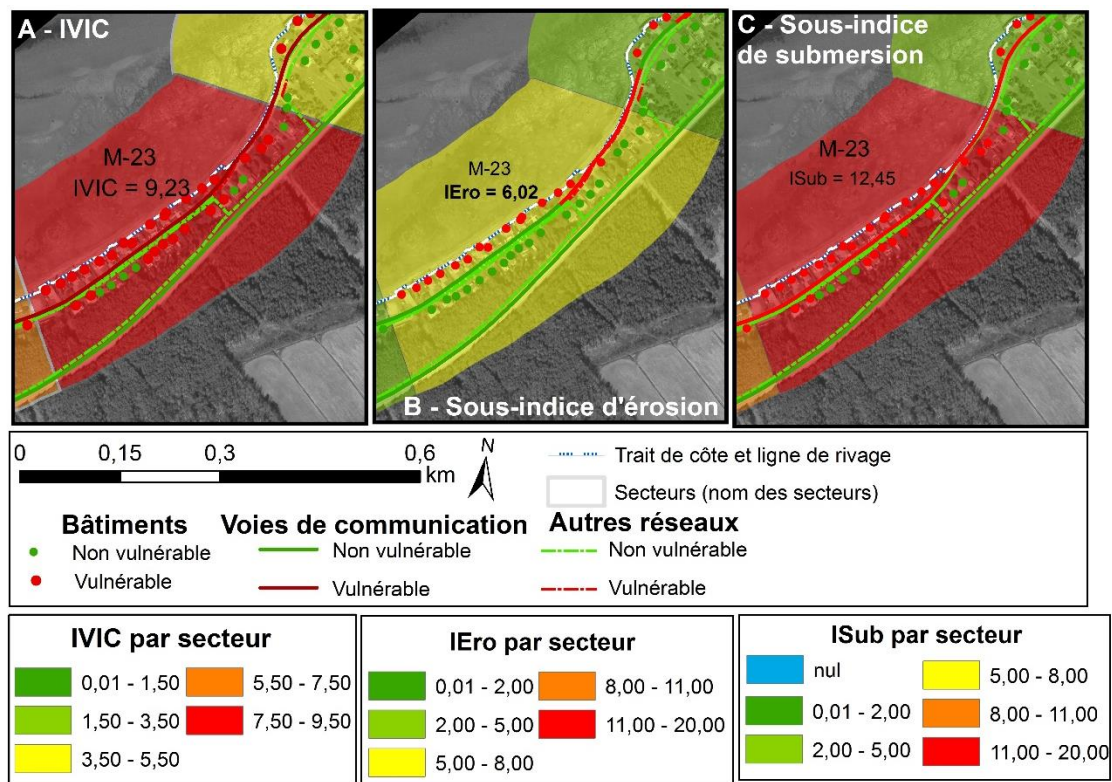


Figure 22. Secteur M-23, site de La Mitis : l'IVIC découle principalement de la submersion, mais avec également une érosion importante

5.1.1.3 Consulter les paramètres individuels ayant servi au calcul

En consultant les différents paramètres (et leurs scores) qui ont servi au calcul de l'indice de vulnérabilité, il est possible de déterminer quel(s) élément(s) ont le plus contribué à la vulnérabilité globale et de pouvoir choisir le type de solution qui serait le plus efficace pour réduire celle-ci. Par exemple, il est possible de savoir si c'est le rang côtier qui cause la problématique, l'intensité d'un aléa ou l'autre (imminence, épaisseur d'eau), le type de bâtiment (garderie...), la présence d'un sous-sol avec ouvertures fenestrées, la présence d'une voie de contournement... Par exemple, dans le cas d'un sous-sol avec des chambres et d'un aléa de submersion important, il pourrait être décidé d'interdire cela pour éviter des blessures ou des décès advenant une submersion nocturne. Dans le cas d'une absence de voie de contournement, il pourrait être important de planifier une solution de déplacement alternative ou d'augmenter la robustesse du réseau routier.

Tous les éléments sont disponibles dans les tables d'attributs des fichiers de forme (*shapefile*) fournis en annexe à ce rapport. La description des champs est présentée en annexe (page 67).

5.1.2 IVIC individuels/secteurs

En plus des IVIC pour les secteurs, il est intéressant de consulter ceux pour chaque élément de manière individuelle, car certains éléments sont vulnérables (voire très vulnérables) dans des secteurs qui ne le sont pas ou vice-versa.

Dans les secteurs les plus vulnérables, un grand nombre d'éléments sont vulnérables (voir annexe 8.6). Par exemple pour le secteur M-23 (figure 23), 26 bâtiments sont vulnérables, 49 segments de voies de communication (routes municipales) et 34 segments d'autres réseaux pour un total de 109 éléments vulnérables.

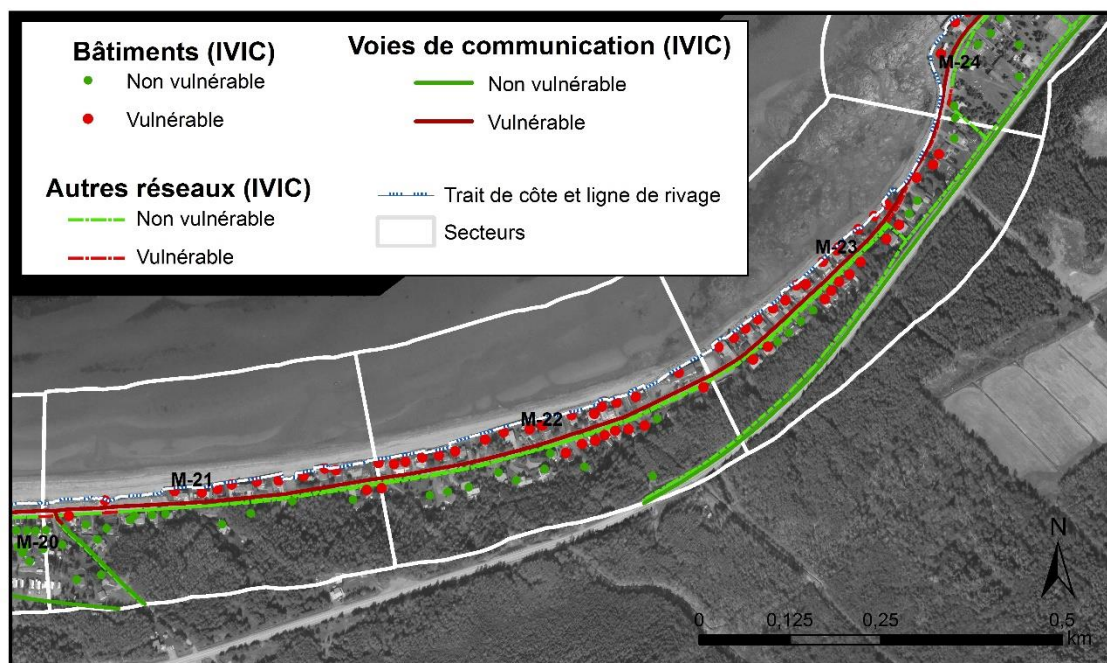


Figure 23. Éléments vulnérables dans des secteurs très vulnérables

Cependant, dans certains secteurs où la vulnérabilité totale est faible certains éléments peuvent présenter une vulnérabilité importante. Par exemple le secteur M-56 sur la figure 24, présente un IVIC de seulement 2,29 (plus faible que la moyenne de 3,5). Cet IVIC est majoritairement lié aux réseaux. Cependant dans ce secteur on retrouve 3 bâtiments avec des IVIC élevés (plus de 0,1) qui ont été très endommagés lors de la tempête du 6 décembre 2010 (figure 25). Des actions pour le secteur ne sont peut-être pas nécessaires, mais des actions ponctuelles pourraient être envisagées.

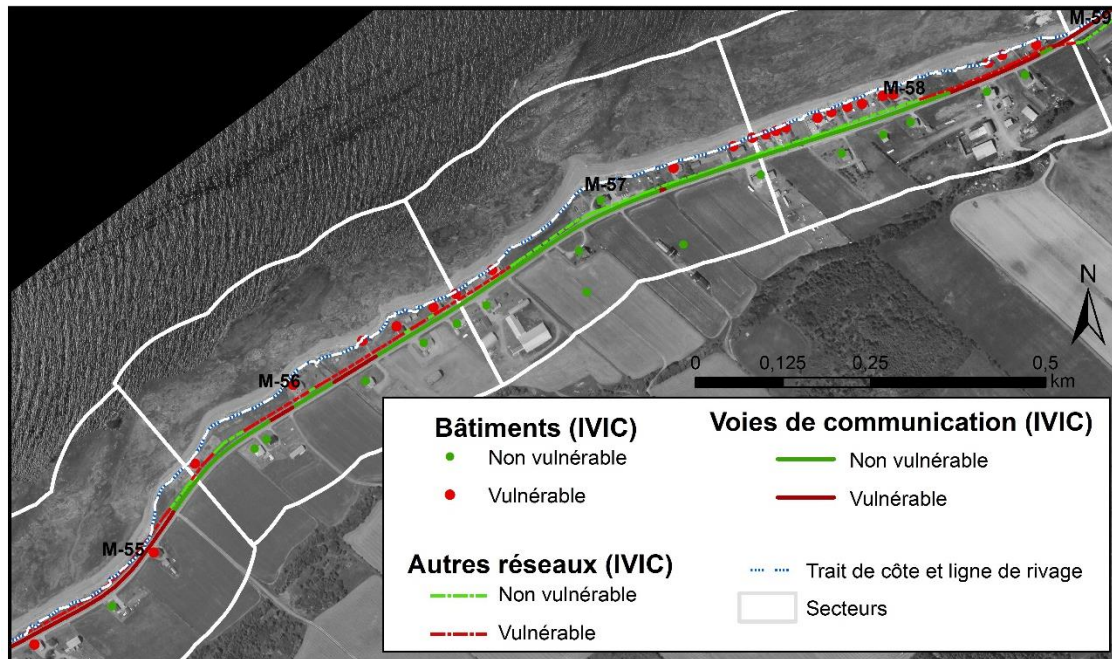


Figure 24. Éléments vulnérables dans un secteur peu vulnérable



Figure 25. Images héliportées post-tempête de bâtiments dans le secteur M-56 (9 décembre 2010) (© LDGIZC-UQAR)

Pour le site d'étude de La Mitis, 22 bâtiments ont des IVIC très élevés (supérieurs à 2 écarts types au-dessus de la moyenne des IVIC des bâtiments). Ils peuvent se retrouver dans des secteurs très vulnérables (M-20, 21, 22, 23, 37) ou peu vulnérables (M-34, M-44, M-47). Pour les routes, 81 segments ont des IVIC très élevés (supérieurs à 2 écarts types au-dessus de la moyenne des IVIC des voies de communication). Ils se situent eux aussi dans des secteurs très vulnérables ou peu vulnérables (p.ex. M-59).

5.2 Recommandations

Il est important lors de la prise de décision d'aller consulter la base de données afin de déterminer quel aléa cause la vulnérabilité pour ce secteur (érosion, submersion ou les deux), de voir s'il s'agit de nombreux bâtiments vulnérables qui causent le score total du secteur ou s'il y a uniquement quelques éléments extrêmement vulnérables qui influencent à la hausse le score. Il est possible par exemple de consulter le nombre d'éléments vulnérables par secteur d'étude (ponctuels, réseau, voies de communication) pour se faire une idée. De plus, certains éléments individuels ont une vulnérabilité très importante, mais se situent dans des secteurs qui globalement ne le sont pas. Dans ces situations, selon le type d'élément à considérer et son score, l'aléa entrant en considération, il serait judicieux d'apporter une solution ponctuelle.

D'un point de vue des solutions, les différents scores et la configuration locale sont à étudier lors de la prise de décision. Par exemple si la vulnérabilité est liée en bonne partie au réseau d'Hydro-Québec et que celui-ci se situe du côté de la mer de la route 132 (secteur M-55 par exemple), il pourrait être judicieux de le déplacer de l'autre côté de la route. La configuration locale peut être une absence de robustesse dans le réseau routier par exemple comme c'est le cas pour le site de Pointe-aux-Outardes. Dans ce cas, une solution d'ensemble pour pallier à cette absence de robustesse devra être envisagée et non des solutions ponctuelles pour chaque segment vulnérable.

6. Conclusion

La méthodologie développée dans cette étude est basée sur la meilleure connaissance des aléas côtiers d'érosion et de submersion disponible actuellement. Des méthodologies précises ont été utilisées pour définir les secteurs affectés par ces deux aléas. Par la suite, la méthode de calcul développée pour l'indice de vulnérabilité offre la possibilité aux gestionnaires de connaître les éléments individuels les plus vulnérables, mais aussi les secteurs qui en regroupent une forte densité afin d'identifier où mettre en œuvre des solutions pour réduire le risque. Comme le développement de l'approche s'est effectué en collaboration avec les gestionnaires du ministère afin de répondre au mieux à leurs besoins, l'outil de gestion en ressort le plus opérationnel et efficace possible.

Il est à noter que l'IVIC (Indice de Vulnérabilité des Infrastructures Côtière) tient compte de la probabilité d'occurrence des phénomènes pour ce qui a trait à l'aléa de submersion. En ce sens on peut parler d'analyse de risque de submersion. Cependant, la méthodologie qui est notre disposition actuellement pour l'aléa d'érosion ne permet pas de quantifier de probabilité associée. C'est pourquoi nous préférons utiliser le terme de vulnérabilité pour notre indice global ayant trait aux deux aléas côtiers (érosion et submersion).

7. Références

- AZZAM C., S. BAILLARGUET, A. BOUET, É. BRODHAG, G. DESIRE, A. KAVAJ, C. PERHERIN, A. RENAUD (sous la direction de) (2014) Guide méthodologique : plan de prévention des risques littoraux, Direction Générale de la Prévention des risques, Service des risques naturels et Hydrauliques, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie de la France, 169 p.
- ALFIERI L., P. SALAMON, A. BIANCHI, J. NEAL, P. BATES et L. FEYEN (2014) "Advances in Pan-European Flood Hazard Mapping." *Hydrological Processes* 28(13):4067–77. Retrieved (<http://doi.wiley.com/10.1002/hyp.9947>).
- AUBÉ M., C. HÉBERT et I. SIMARD (2016) Analyse des risques d'inondation et d'érosion dans les régions de Grande-Anse, Maisonnnette, Bertrand et Caraquet, 32 p.
- BARROCA B., BERNARDARA P., MOUCHEL J. M. et G. HUBERT (2006) *Indicators for identification of urban flooding vulnerability*, *Natural Hazards Earth System Science*, vol. 6, pp. 553–561
- BAGDANAVICIUTE, I., KELPSAIT, L. et SOOMERE T. (2015) Multi-criteria evaluation approach to coastal vulnerability index development in micro-tidal low-lying areas, *Ocean & Coastal Management*, 104, p. 124-135
- BATES, P. D. *et al.* (2005) "Simplified Two-Dimensional Numerical Modelling of Coastal Flooding and Example Applications." *Coastal Engineering* 52(9):793–810. Retrieved (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037838390500075X>).
- BATES, P. D., M. S. HORRITT et T. J. FEWTRELL (2010) "A Simple Inertial Formulation of the Shallow Water Equations for Efficient Two-Dimensional Flood Inundation Modelling." *Journal of Hydrology* 387(1–2):33–45. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.027>).
- BERNATCHEZ, P. (2003) Évolution littorale Holocène actuelle des complexes deltaïques de Betsimamites et de Manicouagan-Outardes : synthèse, processus, causes et perspectives. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Qc, Canada, 459 p.
- BORUFF, B.J., EMRICH, C. et CUTTER S.L. (2005) Erosion hazard vulnerability of US coastal counties. *Journal of Coastal Research*, vol. 21, n° 5 pp. 932-942.
- BROWN, J. M., T. PRIME, et A. J. PLATER (2015) "Flood Risk Uncertainty Surrounding a 0 . 5 % Annual Probability Event."
- CARIOLET, J. M. et S. SUANEZ (2013) "Runup Estimations on a Macrotidal Sandy Beach." *Coastal Engineering* 74:11–18. Retrieved June 9, 2014 (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378383912001810>).

CREACH, A., E. CHEVILLOT-MIOT, D. MERCIER et L. POURINET (2015) "Vulnerability to Coastal Flood Hazard of Residential Buildings on Noirmoutier Island (France)." *Journal of Maps* 1–11. Retrieved (<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17445647.2015.1027041>).

CREACH A, MERCIER D et S PARDO (2014) *Identification et cartographie des zones à risque potentiellement mortel face à la submersion marine : l'indice de V.I.E. appliqué à La Faute-sur-Mer (Vendée, France)* pp 214-223 in Actes du colloque international « Connaissance et compréhension des risques côtiers : aléas, enjeux, représentations, gestion » 3 au 4 juillet 2014, Brest, France.

DIDIER D., P. BERNATCHEZ, E. AUGEREAU, C. CAULET, D. DUMONT, E. BISMUTH, L. CORMIER, F. FLOC'H et C. DELACOURT (2017) LiDAR Validation of a Video-Derived Beachface Topography on a Tidal Flat, *Remote Sensing*, vol. 9, n° 8, 22 p; doi:10.3390/rs9080826

DREJZA, S., FRIESINGER, S. et BERNATCHEZ, P. (2014) Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : *Caractérisation des côtes, dynamique hydrosédimentaire et exposition des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion, Est du Québec, Volume I*, Projet X008.1. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Remis au ministère des Transports du Québec, septembre 2014, 226 p. + annexes.

DREJZA, S., FRIESINGER, S., P. BERNATCHEZ et G. MARIE (2015) Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : Développement d'une approche et d'un indice pour quantifier la vulnérabilité des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques sur 9 sites témoins. Volume III. Projet X008.1. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Remis au ministère des Transports du Québec, mars 2015, 308 p.

DUBOIS, J.-M. M., BERNATCHEZ, P., BOUCHARD, J.-D., DAIGNAULT, B., CAYER, D. et S. DUGAS (2006) *Évaluation du risque d'érosion du littoral de la Côte-Nord du Saint-Laurent pour la période de 1996-2003*. Conférence régionale des élus de la Côte-Nord, 291 pages + annexes.

FONTAINE. M. M. et A. C. STEINMAN (2009) *Assessing Vulnerability to Natural Hazards: Impact-Based Method and Application to Drought in Washington State*, doi : 10.1061/(ASCE)1527-6988(2009)10:1(11), *Natural Hazards Review*, février 2009, pp.11-18

GALLIEN, T. W., B. F. SANDERS, et R. E. FLICK. (2014) "Urban Coastal Flood Prediction: Integrating Wave Overtopping, Flood Defenses and Drainage." *Coastal Engineering* 91:18–28. Retrieved November 22, 2014 (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378383914000775>).

GORNITZ, V. (1990) *Vulnerability of the East Coast, U.S.A to future sea level rise*. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 9: 201–37

GOROKHOVICH, Y., LEISEROWITZ, A. et D. DUGAN (2014) Integrating Coastal Vulnerability and Community-Based. Subsistence Resource Mapping in Northwest Alaska. *Journal of Coastal Research*, 30(1), 158–169.

HAWKES, P. J., B. P. GOULDBY, J. A. TAWN, et M. W. OWEN (2002) "The Joint Probability of Waves and Water Levels in Coastal Engineering Design." *Journal of Hydraulic Research* 40(3):241–51. Retrieved (<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00221680209499940>).

HÉNAFF A. et PHILIPPE M. (2014) *Gestion des risques d'érosion et de submersion marines – Guide méthodologique*. 147p. disponible en ligne sur www.risques-cotiers.fr

HUNT, IA. (1959) "Design of Seawalls and Breakwaters." *Journal of Waterways and Harbours Division* 85(3):123–52. Retrieved May 31, 2012 (<http://www.citeulike.org/group/11419/article/8657051>).

KERGADALLAN, X. (2013) *Analyse Statistique Des Niveaux D'eau Extrêmes*. Environnements Maritime et Estuarien. État de L'art. Margny Lès Compiègne.

MARIE, G., BERNATCHEZ, P., DUGAS, S., FRASER, C. et DREJZA, S. (2014) *Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral des MRC de La Mitis et de La Matanie et des municipalités de Cap-Chat et Sainte-Anne-des-Monts*. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, juillet 2014, 74 p.

MAMOT - Ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire (2018) Consulté en mars 2018. Dans la colonne : RL0105A du rôle d'évaluation foncière de 2016 (<https://www.mamot.gouv.qc.ca/evaluation-fonciere/manuel-devaluation-fonciere-du-quebec/codes-dutilisation-des-biens-fonds/>).

McLAUGHLIN S., MCKENNA, J. et J.A.G. COOPER (2002) *Socio-economic data in coastal vulnerability indices: constraints and opportunities*, *Journal of Coastal Research*, Spécial Issue 36, pp. 487-497, ICS 2002 Proceedings, Northern Ireland, ISSN 0749-0208

McLAUGHLIN S. et COOPER J.A.G (2010) *A multi-scale coastal vulnerability index : a tool for coastal managers?* *Environ Hazards* 9:1–16. Earthscan ISSN : 1878-0059

MEUR-FÉREC C., DEBOUDT Ph. et MOREL V. (2008) *Coastal Risks in France : An Integrated Method For Evaluating Vulnerability*. *Journal of Coastal Research*, 24: 178-189.

MOFTAKHARI, HAMED R., GIANFAUSTO SALVADORI, AMIR AGHAKOUCHAK, BRETT F. SANDERS, et R. A. MATTHEW (2017) "Compounding Effects of Sea Level Rise and Fluvial Flooding." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(37):9785–90. Retrieved (<http://www.pnas.org/lookup/doi/10.1073/pnas.1620325114>).

MRC DE LA MITIS (2014) Plan d'intervention municipal en sécurité civile – OMRSC – Sainte-Luce, 279 p. Mis à jour le 14 janvier 2014

MRC DE LA MITIS (2017) Plan d'intervention municipal en sécurité civile – OMRSC – Sainte-Flavie, 276 p. mis à jour le 18 décembre 2017

MSP (2008a) Ministère de la Sécurité Publique du Québec, Concept de base en sécurité civile, 46 p.

MSP (2008b) Ministère de la Sécurité Publique du Québec, Approche et principes en sécurité civile, 58 p.

MSP (2008c) Ministère de la Sécurité Publique du Québec, Gestion des risques en sécurité civile, 66 p.

ORTON, PHILIP *et al.* (2015) "New York City Panel on Climate Change 2015 Report Chapter 4: Dynamic Coastal Flood Modeling." *Annals of the New York Academy of Sciences* 1336(1):56–66. Retrieved (<http://doi.wiley.com/10.1111/nyas.12589>).

PAPATHOMA-KÖHLE M., NEUHÄUSER B., RATZINGER K., WENZEL H., et D. DOMINEY-HOWES (2007) *Elements at risk as a framework for assessing the vulnerability of communities to landslides*, *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 7, n° 6, pp.765-779

PATRICK, L., SOLECKI, W., JACOB, K. H., KUNREUTHER, H., et NORDENSON, G. (2015). New York City Panel on Climate Change 2015 Report Chapter 3: Static Coastal Flood Mapping. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1336(1), 45–55. <https://doi.org/10.1111/nyas.12590>

PEDUZZI, P., DAO, H., HEROLD, C. et MOUTON, F. (2009) *Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: the Disaster Risk Index*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9: 1149-1159.

PENDLETON, E., WILLIAMS, J. et R. THIELER (2004) Coastal Vulnerability Assessment of Assateague island national seashore (ASIS) to sea-level rise, U.S. Geological Survey Open-File Report 2004-1020, Electronic Book, 20 p.

PHILLIPS, B., J. BROWN, J.-R. BIDLOT, et A. PLATER (2017) "Role of Beach Morphology in Wave Overtopping Hazard Assessment." *Journal of Marine Science and Engineering* 5(1):1. Retrieved (<http://www.mdpi.com/2077-1312/5/1/1>).

PRIME T., J. M. BROWN et A. J. PLATER (2016) "Flood Inundation Uncertainty: The Case of a 0.5% Annual Probability Flood Event." *Environmental Science & Policy* 59:1–9. Retrieved (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1462901116300181>).

QUINTIN, C., BERNATCHEZ, P., JOLIVET, Y. (2013) Impacts de la tempête du 6 décembre 2010 sur les côtes du Bas-Saint-Laurent et de la baie des Chaleurs. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières et Chaire de recherche en géoscience côtière, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, Février 2013, Volume I : 48p. + Volume II : 170 p.

ROBICHAUD A., SIMARD I. et F. SAVOIE-FERRON (2014) Inondation côtières et infrastructures à risque, ville de Lamèque, Nouveau-Brunswick, février 2014, 37 p.

ROELVINK, DANO *et al.* (2009) "Modelling Storm Impacts on Beaches, Dunes and Barrier Islands." *Coastal Engineering* 56(11–12):1133–52. Retrieved July 14, 2014 (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378383909001252>).

RUEDA, A. *et al.* (2016) "The Use of Wave Propagation and Reduced Complexity Inundation Models and Metamodels for Coastal Flood Risk Assessment." *Journal of Flood Risk Management* 9(4):390–401.

SADEGH, M., E. RAGNO et A. AGHAKOUCHAK (2017) "Multivariate Copula Analysis Toolbox (MvCAT): Describing Dependence and Underlying Uncertainty Using a Bayesian Framework." *Water Resources Research* 53(6):5166–83. Retrieved (<http://doi.wiley.com/10.1002/2016WR020242>).

SALLENGER, A. H. (2000) "Storm Impact Scale for Barrier Islands." *Journal of Coastal Research* 16(3):890–95.

SIMARD, I., A. ROBICHAUD et F. SAVOIE-FERRON (2014) Carte 3.0 Infrastructures à risque d'inondation à Lamèque, Nouveau-Brunswick

STOCKDON, H. F., D. M. THOMPSON, N. G. PLANT et J. W. LONG (2014) "Evaluation of Wave Runup Predictions from Numerical and Parametric Models." *Coastal Engineering* 92:1–11. Retrieved September 11, 2014 (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378383914001239>).

STOCKDON, HF, RA HOLMAN, PA HOWD et A. SALLENGER (2006) "Empirical Parameterization of Setup, Swash, and Runup." *Coastal Engineering* 53:573–88. Retrieved April 17, 2012 (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383906000044>).

STOCKDON, H. F., K. S. DORAN et A. H. SALLENGER (2009) "Extraction of Lidar-Based Dune-Crest Elevations for Use in Examining the Vulnerability of Beaches to Inundation During Hurricanes." *Journal of Coastal Research* 10053:59–65. Retrieved June 17, 2014 (<http://www.bioone.org/doi/abs/10.2112/SI53-007.1>).

THOMAS I., BLEAU N., SOTO ABASOLO P., DESJARDIN-DUTIL G., FUAMBA M. et KADI S. (2012) *Analyser la vulnérabilité sociétale et territoriale aux inondations en milieu urbain dans le contexte des changements climatiques, en prenant comme cas d'étude la ville de Montréal*, Rapport final pour Ouranos, 137 p.

8. Annexes

8.1 Description des données numériques : bâtiments

Les **bâtiments** sont regroupés dans un fichier de forme. La table d'attributs est présentée au tableau A. Chaque site d'étude est présenté dans un fichier de forme.

Tableau A. Description des champs du fichier de forme « Batiments_NomSite »

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
Shape		Geometry	Point ZM	
anrole	Année du rôle d'évaluation foncière	Texte (4)		
ID_PROVINC	ID provincial de l'unité d'évaluation foncière	Texte (23)		
CUBF	Code CUBF	Texte (4)		
CodeUtilis	Description de l'utilisation du bâtiment	Texte (150)		Description du champ selon le fichier des codes CUBF du MAMOT
Ssol*	Présence d'un sous-sol avec des ouvertures et si oui, sont-elles fenestrées	Texte		
ScoreSecST*	Score de sécurité des personnes liée au processus de submersion – type de bâtiment	Double	1 à 5	Voir tableau 15
RangCotier	Rang côtier du bâtiment	Texte		Voir section 4.1.4.4
ScoreRang	Score du rang côtier	Double	1 à 5	Voir tableau 21
ScoreSecSL*	Score relatif à la sécurité des personnes liée aux processus de submersion - localisation	Double	1 à 5	Voir tableau 22
Commentair	Commentaire sur la situation de ce bâtiment	Texte (250)		Rempli au besoin uniquement
TypeCote	Type de côte au droit du bâtiment	Texte (50)		

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
Artif	La côte était-elle artificialisée en 2012 et si oui, est-ce que l'ouvrage était public	Texte (50)	• MTMDET • municipal • Public (MTMDET ou municipal) • oui • non	Si « oui » cela signifie que le propriétaire de l'ouvrage n'est pas public
Eau_100ans*	Épaisseur d'eau d'un événement de récurrence 100 ans	Double		En mètres
Eau_50ans*	Épaisseur d'eau d'un événement de récurrence 50 ans	Double		En mètres
Eau_10ans*	Épaisseur d'eau d'un événement de récurrence 10 ans	Double		En mètres
Distance	Distance entre la côte et le bâtiment	Double		En mètres
ReculEven	Recul événementiel	Double		En mètres Voir le tableau 7 et tableau 8
Tx_SP	Déplacement annuel moyen probable de la côte	Double		En m/an
tx_Sp_Publ	Déplacement annuel moyen probable en tenant compte de la présence d'infrastructures publiques de protection contre l'érosion	double		En m/an
Date_Ero	Nombre d'années possible avant que l'élément ne soit atteint par l'érosion	Double		En années
Periode_Er	Période à laquelle l'élément devrait être atteint par l'érosion	Texte (25)	• Imminent • Très court terme (<2020) • Court terme (20 à 40) • Moyen terme (40 à 70) • vide	
ScoreEro	Score d'exposition à l'érosion	Double	0 à 5	Voir le tableau 9
ScoreSub*	Score d'exposition à la submersion	Double	0 à 5	tableau 10
ScoreSecEr	Score de sécurité liée aux processus d'érosion	Double		tableau 23
ScorePerso	Score de la population directement affectée	Double		tableau 13
VulnEroB	Calcul de la vulnérabilité à l'érosion	Double	Résultat de l'équation 2	

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
VulnSubB*	Calcul de la vulnérabilité à l'érosion	Double	Résultat de l'équation 5	
IEroB	Sous-indice de vulnérabilité à l'érosion	Double		Normalisé
ISubB*	Sous-indice de vulnérabilité à la submersion	Double		Normalisé
IVIC_B	Indice de vulnérabilité	Double	Résultat de l'équation 7	
Secteur	Nom du secteur dans lequel se trouve le bâtiment	Texte	- M-01 à M-60 (site de La Mitis) - PO-01 à PO-09 (site de Pointe-aux-Outardes)	
ScoreTypBS*	Score du type de bâtiment pour la submersion	Double	1 à 5	
ScoreTypBE	Score du type de bâtiment pour l'érosion	Double	1 à 5	

*Ces colonnes ne sont pas présentes pour le site de Pointe-aux-Outardes, car il n'y a pas d'aléa de submersion présent.

8.2 Description des données numériques : voies de communication

Les lignes de **voie de communication** sont présentées dans un fichier de forme. La table d'attributs est présentée au tableau B. Chaque site d'étude est présenté dans un fichier de forme.

Tableau B. Description des champs du fichier de forme « Voies_communication_NomSite »

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
Shape		Geometry	Polyline	

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
TypeVoie	Type de voie de communication	Texte (60)	- Local 2 - Local 3 - Nationale - Collectrice - Chemin de gravier - Route municipale - Voie secondaire municipale - Route abandonnée - Route abandonnée : mais dessers encore des maisons	Nomenclature du MTMDET, ajustée
TypeCote	Type de côte au droit du bâtiment	Texte (50)		
Tx_SP	Déplacement annuel moyen probable de la côte	Double		En m/an
ReculEven	Recul événementiel	Double		En mètres Voir le tableau 7 et tableau 8
Distance	Distance minimale entre la côte et le segment de voie de communication	Double		En mètres
Eau_100ans*	Épaisseur d'eau d'un événement de récurrence 100 ans	Double		
Eau_50ans*	Épaisseur d'eau d'un événement de récurrence 50 ans	Double		
Eau_10ans*	Épaisseur d'eau d'un événement de récurrence 10 ans	Double		
Longueur	Longueur du segment	Double	En mètres	Théoriquement tous les segments font 10 m, mais aux limites de la zone d'étude, certains sont plus courts

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
Artif	La côte était-elle artificialisée en 2012 et si oui, est-ce que l'ouvrage était public	Texte (50)	• MTMDET • municipal • Public (MTMDET ou municipal) • Oui • non	Si « oui » cela signifie que le propriétaire de l'ouvrage n'est pas public
tx_Sp_Publ	Déplacement annuel moyen probable en tenant compte de la présence d'infrastructures publiques de protection contre l'érosion	double		En m/an
Periode_Er	Période à laquelle l'élément devrait être atteint par l'érosion	Texte (25)	• Imminent • Très court terme (<2020) • Court terme (20 à 40) • Moyen terme (40 à 70) • vide	
Date_Ero	Nombre d'années possible avant que l'élément ne soit atteint par l'érosion	Double		
ScoreEro	Score d'exposition à l'érosion	Double	0 à 5	tableau 9
ScoreSub*	Score d'exposition à la submersion	Double	0 à 5	tableau 10
ScoreSecSL*	Score relatif à la sécurité des personnes liée aux processus de submersion - localisation	Double	1 à 5	Voir tableau 22
ScoreSecEr	Score de sécurité liée aux processus d'érosion	Double	1 à 5	Tableau 23
ScoreTypeL	Score lié au type de voie de communication	Double	1 à 5	Tableau 16
RangCotier	Rang côtier de la voie de communication	Texte		Voir section 4.1.4.4
ScoreRang	Score du rang côtier	Double	1 à 5	Voir Tableau 21
VoieConto	Existe-t-il une voie de contournement en cas de bris et si oui de quelle longueur	Texte (50)	• 15 à 30 km • Moins de 15 km	
ScoreConto	Score lié à la voie de contournement	Double	1 à 5	Tableau 17

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
VulnEroL	Calcul de la vulnérabilité à la submersion	Double	Résultat de l'équation 5	
VulnSubL*	Calcul de la vulnérabilité à la submersion	Double	Résultat de l'équation 2	
IEroL	Sous-indice de vulnérabilité à l'érosion	Double		Normalisé
ISubL*	Sous-indice de vulnérabilité à la submersion	Double		Normalisé
IVIC_L	Indice de vulnérabilité	Double	Résultat de l'équation 7	
Secteur	Nom du secteur dans lequel se trouve le segment de voie de communication	Texte	- M-01 à M-60 (site de La Mitis) - PO-01 à PO-09 (site de Pointe-aux-Outardes)	
RupturServ	Facilité à rétablir le service	Texte (50)	- Relativement facile à réparer – côte basse - Peu de difficultés : falaises sableuses	
ScoreRuptu	Score lié à la facilité de rétablissement du service	Double	1 à 5	Tableau 18

*Ces colonnes ne sont pas présentes pour le site de Pointe-aux-Outardes, car il n'y a pas d'aléa de submersion présent.

8.3 Description des données numériques : autres réseaux

Les lignes des **autres réseaux** sont présentées dans un fichier de forme. La table d'attributs est présentée au tableau C. Chaque site d'étude est présenté dans un fichier de forme.

Tableau C. Description des champs du fichier de forme « Reseaux_NomSite »

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
Shape		Geometry	Polyline	

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
Distance	Distance minimale entre la côte et le segment de réseau	Double		En mètres
type	Type de réseau		- Hydroquebec distribution - Aqueduc - égout	
ScoreTypeR	Score lié au type de réseau	Double	1 à 5	Tableau 19
RangCotier	Rang côtier de la voie de communication	Texte		Voir section 4.1.4.4
ScoreRang	Score du rang côtier	Double	1 à 5	Voir Tableau 21
RupturServ	Facilité à rétablir le service	Texte (50)	- Relativement facile à réparer – côte basse - Peu de difficultés : falaises sableuses	
ScoreRuptu	Score lié à la facilité de rétablissement du service	Double	1 à 5	Tableau 18
TypeCote	Type de côte au droit du bâtiment	Texte (50)		
Artif	La côte était-elle artificialisée en 2012 et si oui, est-ce que l'ouvrage était public	Texte (50)	- MTMDET - municipal - Public (MTMDET ou municipal) - Oui - non	Si « oui » cela signifie que le propriétaire de l'ouvrage n'est pas public
Tx_SP	Déplacement annuel moyen probable de la côte	Double		En m/an
ReculEven	Recul événementiel	Double		En mètres Voir le tableau 7 et tableau 8
tx_Sp_Publ	Déplacement annuel moyen probable en tenant compte de la présence d'infrastructures publiques de protection contre l'érosion	double		En m/an
ScoreEro	Score d'exposition à l'érosion	Double	0 à 5	Tableau 9
Periode_Er	Période à laquelle l'élément devrait être atteint par l'érosion	Texte (25)	- Imminent - Très court terme (<2020)	

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
			- Court terme (20 à 40) - Moyen terme (40 à 70) - vide	
Date_Ero	Nombre d'années possible avant que l'élément ne soit atteint par l'érosion	Double		
VulnEroR	Calcul de la vulnérabilité à la submersion	Double	Résultat de l'équation 5	
IEroR	Sous-indice de vulnérabilité à l'érosion	Double		Normalisé
IVIC_R	Indice de vulnérabilité	Double	Résultat de l'équation 7	
longueur	Longueur du segment	Double	En mètres	Théoriquement tous les segments font 10 m, mais aux limites de la zone d'étude, certains sont plus courts
Secteur	Nom du secteur dans lequel se trouve le segment de réseau	Texte	- M-01 à M-60 (site de La Mitis) - PO-01 à PO-09 (site de Pointe-aux-Outardes)	
ScoreSecR	Score lié à la sécurité directe des personnes en cas de rupture du réseau	Double	1 à 5	Tableau 20
ScoreSecEr	Score de sécurité liée aux processus d'érosion	Double	1 à 5	Tableau 23

8.4 Description des données numériques : secteurs d'études

Les polygones de **secteurs** sont dans un fichier de forme. La table d'attributs est présentée au tableau D. Chaque site d'étude est présenté dans un fichier de forme.

Tableau D. Description des champs du fichier de forme « Secteurs_NomSite »

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
Shape *			Polygon	
Nom		Texte (50)	- M-01 à M-60 (site de La Mitis) - PO-01 à PO-09 (site de Pointe-aux-Outardes)	
Nb_IVIC_B	Nombre de bâtiments vulnérables aux aléas côtiers pour ce secteur	Double		
Tot_IVIC_B	Somme de l'IVIC des bâtiments de ce secteur	Double		
Nb_IVIC_L	Nombre de segments de lignes vulnérables aux aléas côtiers pour ce secteur	Double		
Tot_IVIC_L	Somme de l'IVIC des voies de communication de ce secteur	Double		
Nb_IVIC_R	Nombre de segments de réseaux vulnérables aux aléas côtiers pour ce secteur	Double		
Tot_IVIC_R	Somme de l'IVIC des réseaux de ce secteur	Double		
Nb_IVIC	Nombre d'éléments vulnérables aux aléas côtiers pour ce secteur	Double		
Tot_IVIC	IVIC de ce secteur	Double		équation 8
RatioIVICL	Proportion de l'IVIC total qui provient de l'IVIC des voies de communication	Double		
RatioIVICB	Proportion de l'IVIC total qui provient de l'IVIC des bâtiments	Double		
RatioIVICR	Proportion de l'IVIC total qui provient de l'IVIC des réseaux	Double		
maj_IVIC	Type d'élément qui est responsable de la majorité de l'IVIC	Texte (254)	- Bâtiments - Moyenne - Non applicable - Routes - Réseaux	

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
Nb_ISub	Nombre d'éléments vulnérables à la submersion pour ce secteur	Double		
Tot_ISub	Somme des sous-indices de submersion de ce secteur	Double		
Nb_ISubR	Nombre de segments de réseaux vulnérables à la submersion pour ce secteur	Double		
Tot_ISubR	Somme des sous-indices de submersion des réseaux de ce secteur	Double		
Nb_ISubB	Nombre de bâtiments vulnérables à la submersion pour ce secteur	Double		
Tot_ISubB	Somme des sous-indices de submersion des bâtiments de ce secteur	Double		
Nb_ISubL	Nombre de segments de voies de communication vulnérables à la submersion pour ce secteur	Double		
Tot_ISubL	Somme des sous-indices de submersion des voies de communication de ce secteur	Double		
RatioISubL	Proportion du sous-indice de submersion qui provient des voies de communication	Double		Comme les réseaux ne sont pas sensibles à la submersion, alors ce sont soit les bâtiments, soit les voies de communication
Maj_ISub	Type d'élément qui est responsable de la majorité du sous-indice de submersion	Texte (254)	• Bâtiments • Non applicable • Non vulnérables • routes	

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
Tot_Iero	Somme des sous-indices d'érosion de ce secteur	Double		
Tot_IeroR	Somme des sous-indices d'érosion des réseaux de ce secteur	Double		
Tot_IeroB	Somme des sous-indices d'érosion des bâtiments de ce secteur	Double		
Tot_IeroL	Somme des sous-indices d'érosion des voies de communication de ce secteur	Double		
RatioIeroL	Proportion du sous-indice d'érosion qui provient des voies de communication	Double		
RatioIeroR	Proportion du sous-indice d'érosion qui provient des réseaux	Double		
RatioIeroB	Proportion du sous-indice d'érosion qui provient des voies des bâtiments	Double		
Maj_Iero	Type d'élément qui est responsable de la majorité du sous-indice d'érosion	Texte (254)	• Bâtiments • Moyenne • Réseaux • Routes	
Nb_IeroR	Nombre de segments de réseaux vulnérables à l'érosion pour ce secteur	Double		
Nb_IeroB	Nombre de bâtiments vulnérables à l'érosion pour ce secteur	Double		
Nb_IeroL	Nombre de segments de routes vulnérables à l'érosion pour ce secteur	Double		
Nb_Ero	Nombre d'éléments vulnérables à l'érosion pour ce secteur	Double		

8.5 Description des données numériques : submersion

Les données de **submersion** sont présentées en format raster. La valeur du pixel est la valeur de l'épaisseur de l'eau. Un pixel de valeur 0,005 doit être considéré comme un pixel sans eau. Il y a 3 fichiers, un pour chaque récurrence d'événement soit 100 ans (mosaic_100yr), 50 ans (mosaic_50yr) et 10 ans (mosaic_10yr).

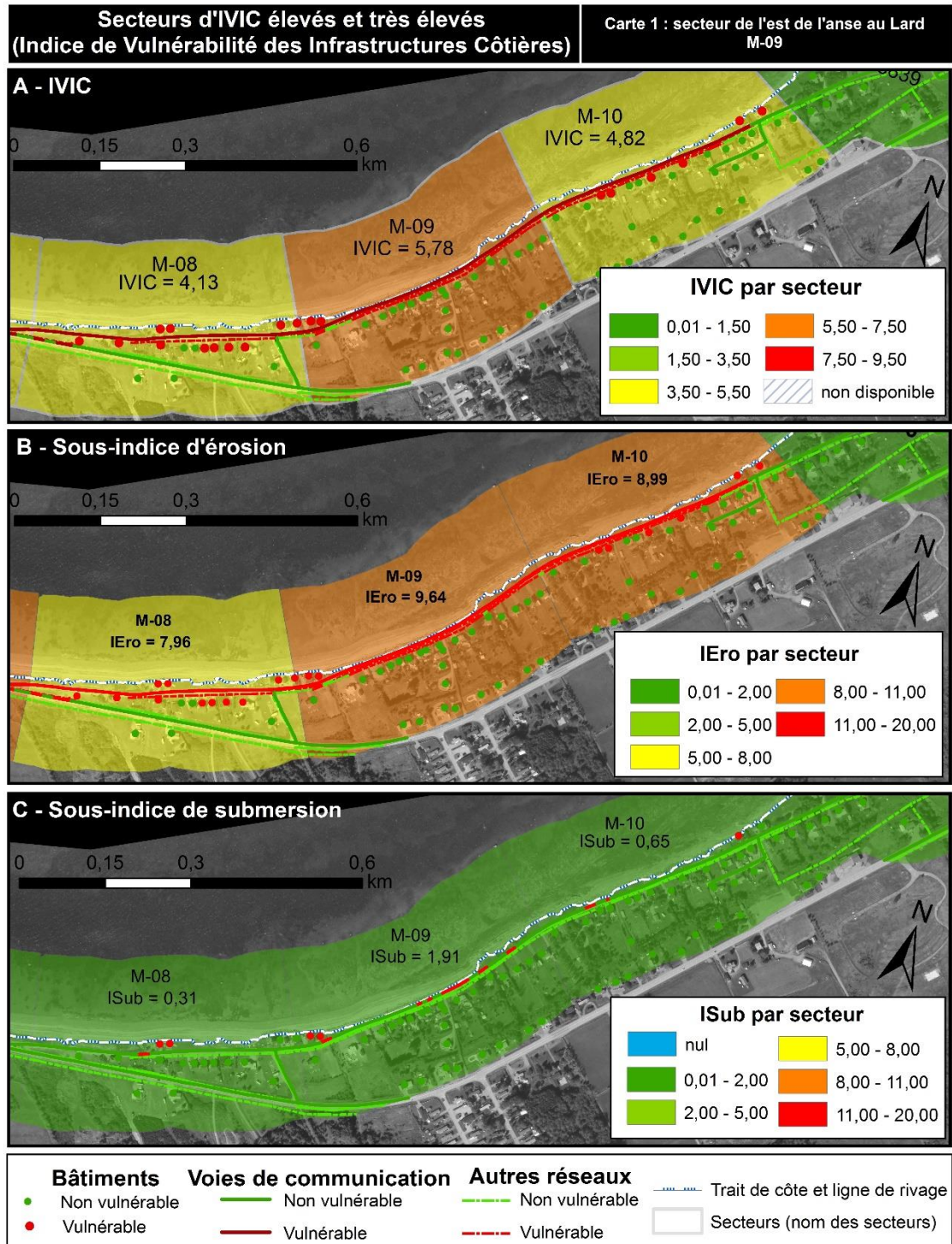
8.6 Cartes des indices et sous-indices de vulnérabilité des infrastructures côtières

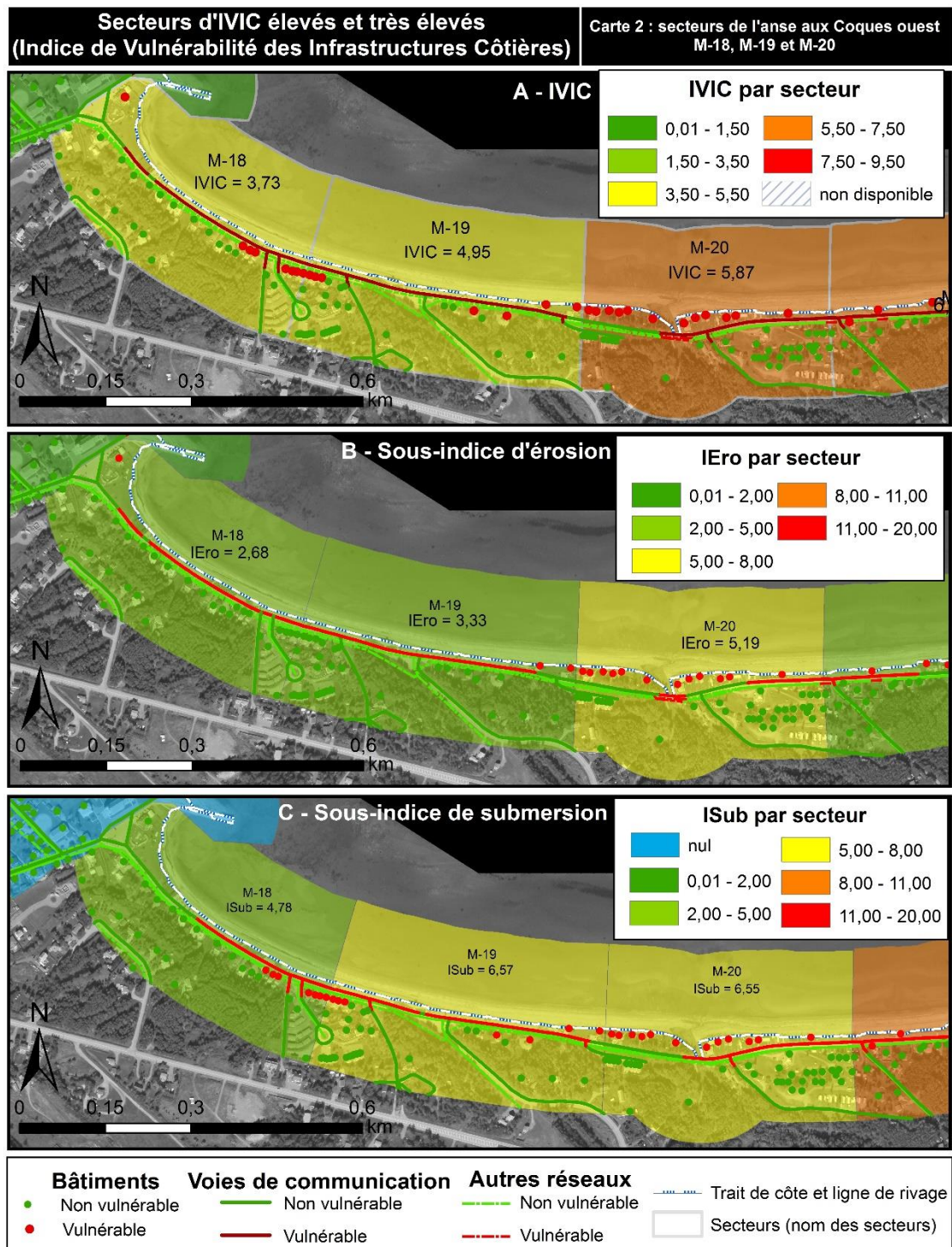
Les cartes présentent l'IVIC, mais aussi le sous-indice d'érosion et de submersion.

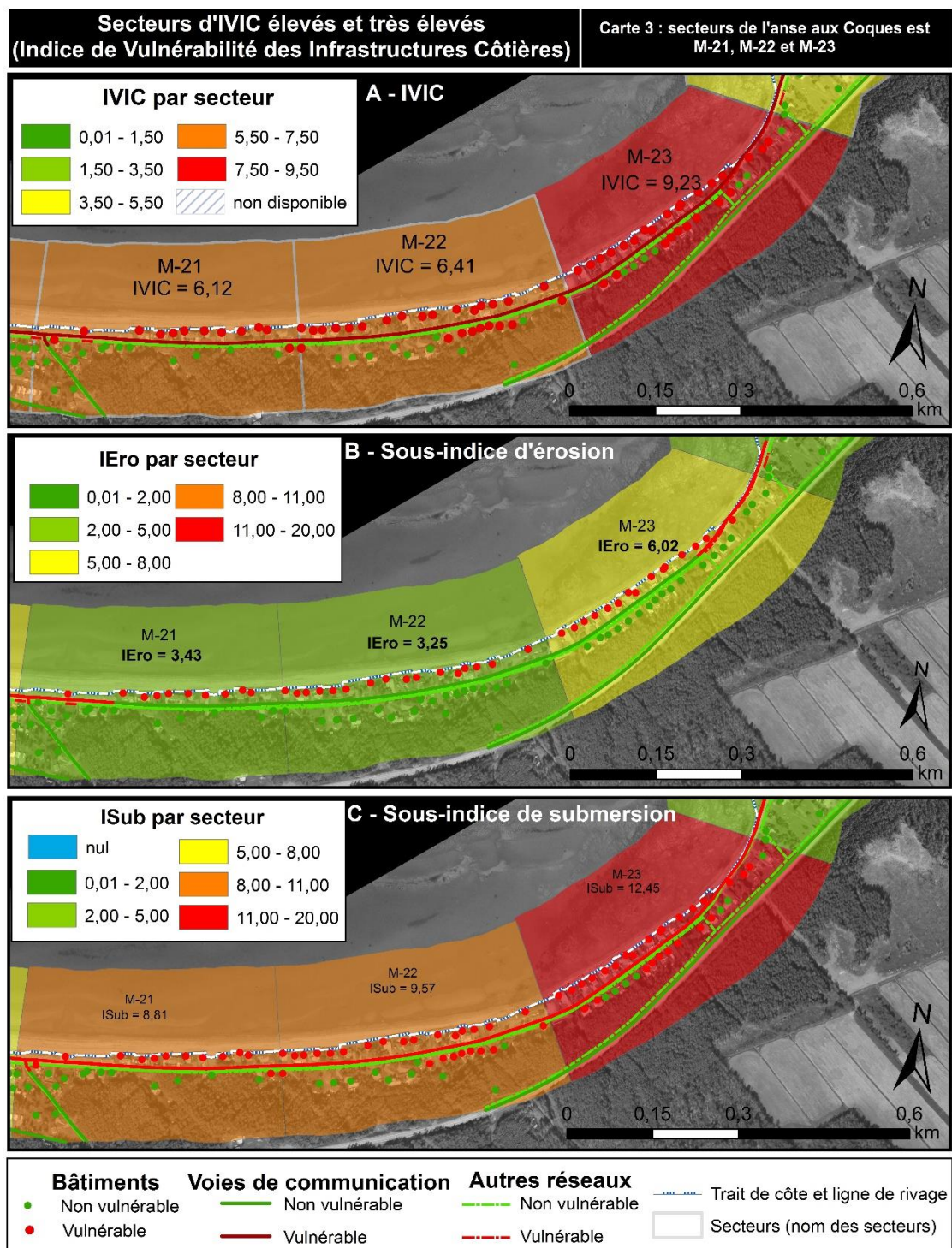
8.6.1 Site de La Mitis

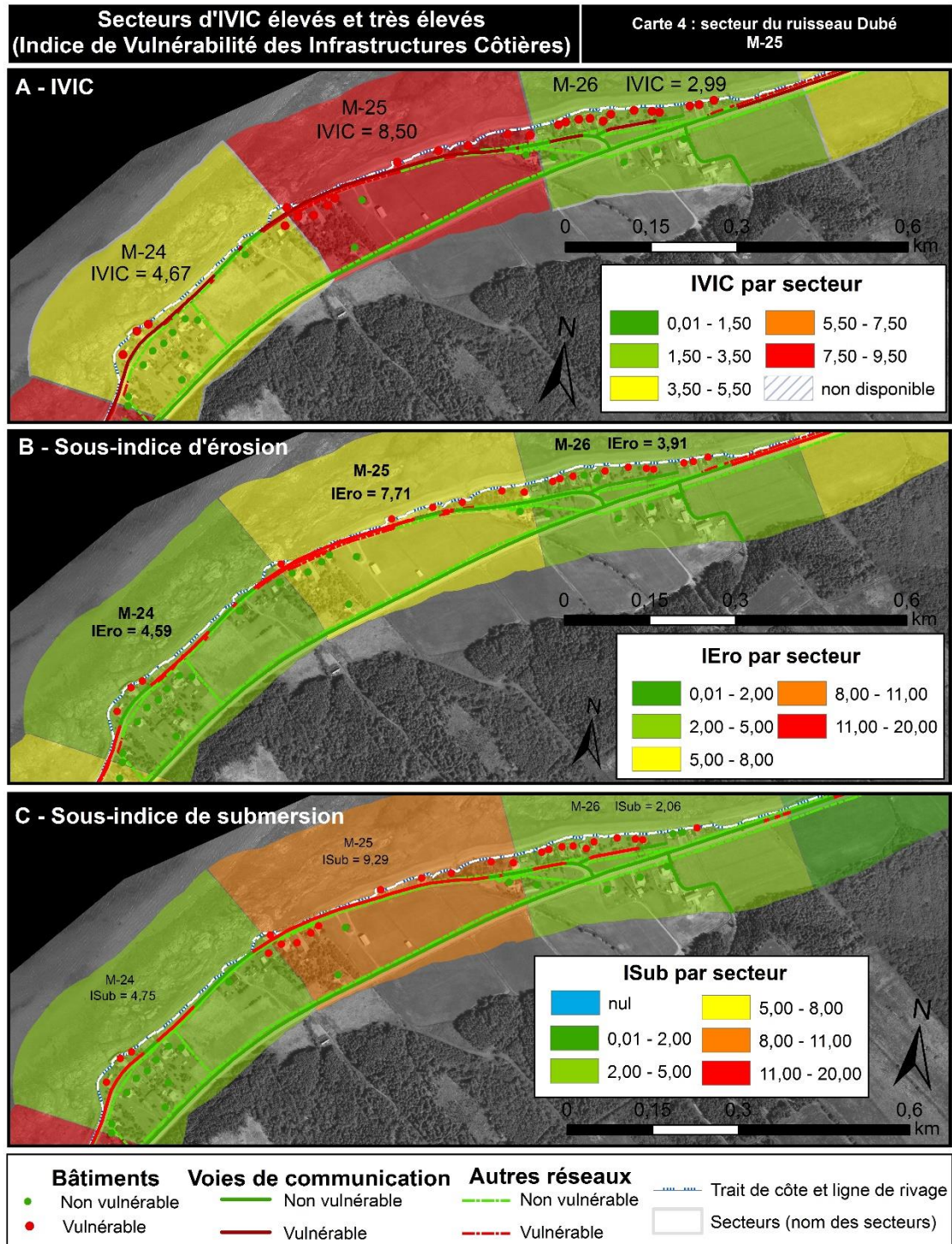
Pour le site de La Mitis, un total de 6 cartes sont présentées ci-après pour les secteurs avec les IVIC supérieurs à 5,5 (soit supérieur à 1 écart type au-dessus de la moyenne) :

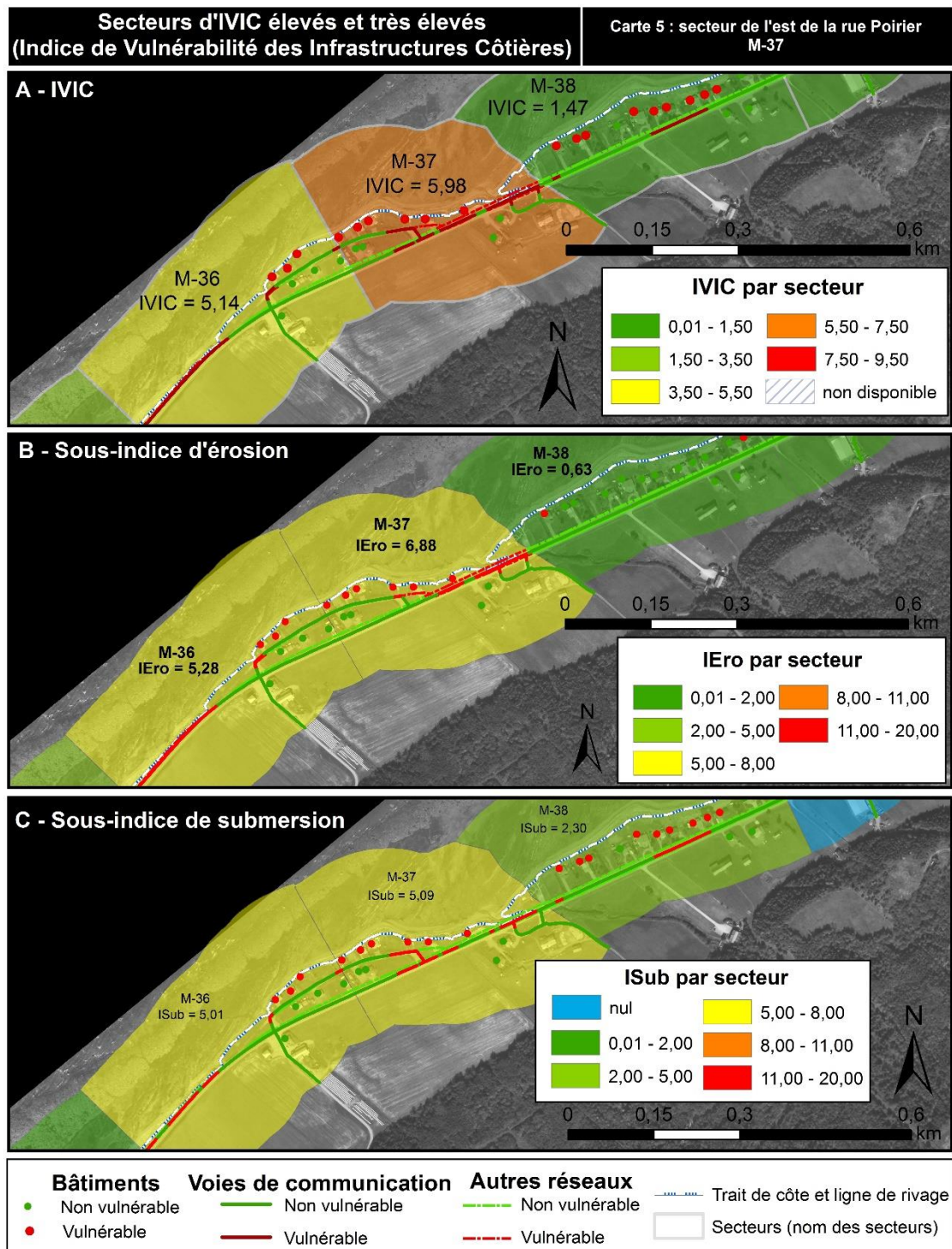
- Carte 1 : Secteur de l'est de l'anse au Lard
- Carte 2 : Secteurs de l'anse aux Coques ouest
- Carte 3 : Secteurs de l'anse aux Coques est
- Carte 4 : Secteur du ruisseau Dubé
- Carte 5 : Secteur de l'est de la rue Poirier
- Carte 6 : Secteur de l'est du village de Sainte-Flavie

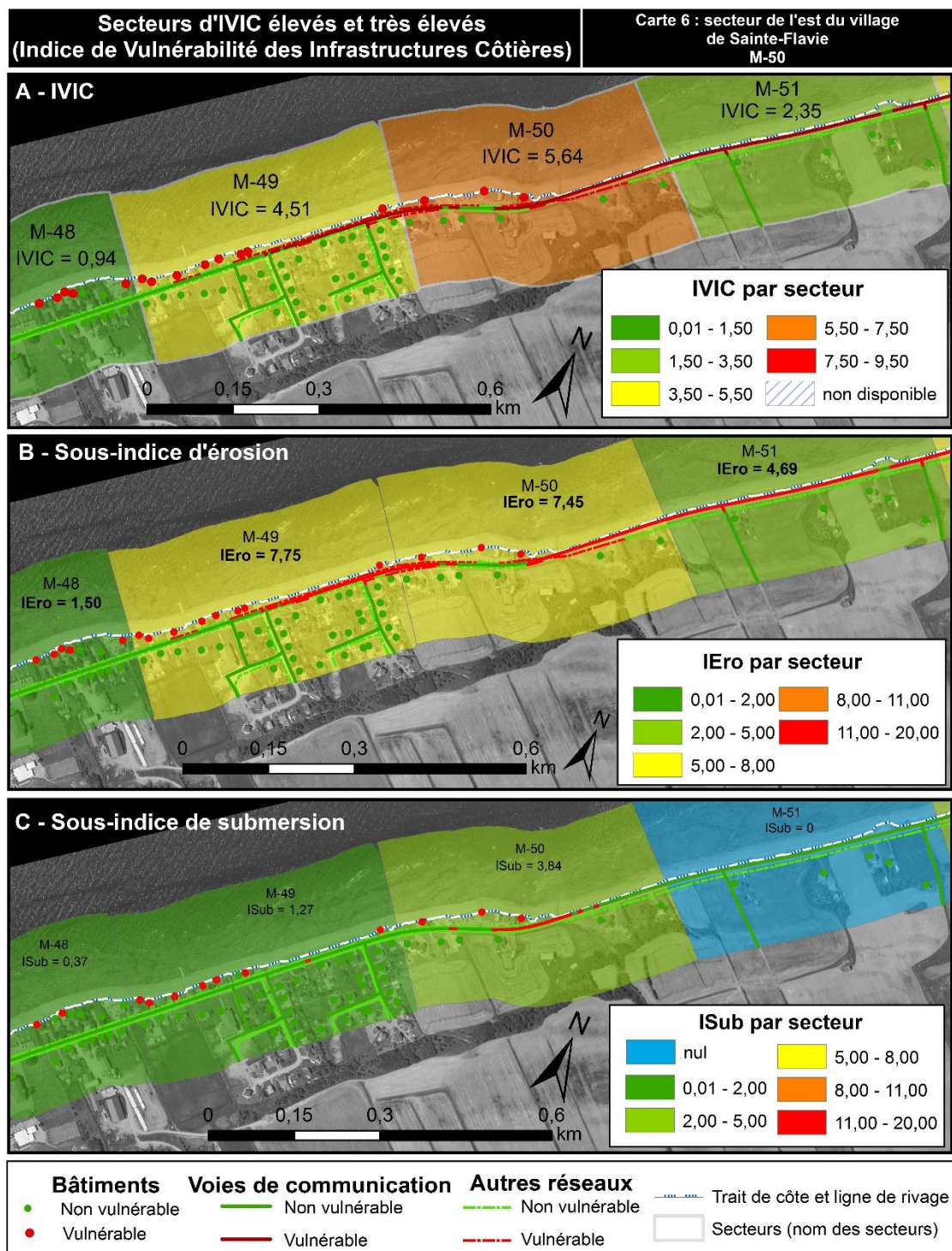












8.6.2 Site de La Manicouagan

Pour le site de La Manicouagan, un total de 3 cartes sont présentées ci-après pour couvrir l'ensemble du site d'étude :

- Carte 1 : Secteurs ouest
- Carte 2 : Secteurs centraux
- Carte 3 : Secteurs est

