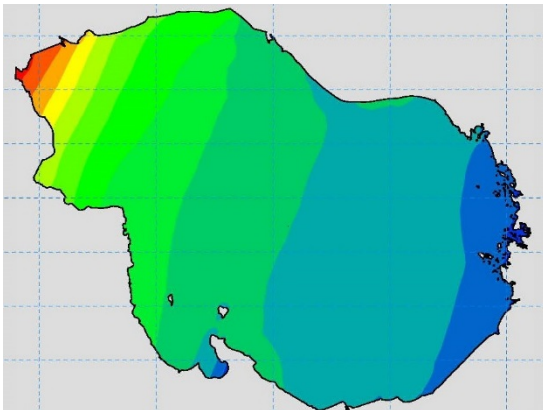




PROGRAMME DE STABILISATION DES BERGES DU LAC ST-JEAN (2017-2026)

Étude et modélisation de l'érosion des berges

R.0024 Volume 1



Préparé pour:

Rio Tinto Alcan

Rio Tinto Alcan



11 avril 2016

No référence lasalle | NHC 08000118

**PROGRAMME DE STABILISATION DES BERGES DU LAC SAINT-JEAN (2017-2026)
ÉTUDE ET MODÉLISATION DE L'ÉROSION DES BERGES**

RAPPORT D'ÉTUDE R.0024 VOLUME 1

Préparé pour:

Rio Tinto Alcan
Québec

Préparé par:

Lasalle | NHC
Montréal, Québec

11 avril 2016

Préparé par:



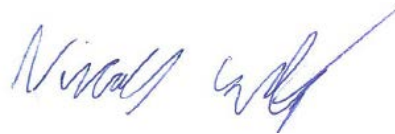
Catherine Denault, ing., M.A.Sc.
Ingénieure de projets, associée
No OIQ : 129802



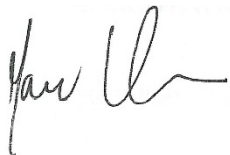
Arian Cueto Bergner, ing., M.Sc.
Ingénieure
No OIQ : 143692



Tristan Aubel, ing., M.Ing.
Ingénieur de projets, associé
No OIQ : 129611



Nicolas Gallant, ing. jr.
Ingénieur junior
No OIQ : 5047189



Marc Villeneuve, ing. M.Ing.
Président
No OIQ : 46139

CLAUSE DE LIMITATION DE RESPONSABILITÉ

Ce document a été préparé par Lasalle|NHC de façon conforme aux bonnes pratiques d'ingénierie et est destiné à l'usage exclusif de la firme **Rio Tinto Alcan** et de leurs représentants autorisés dans le cadre spécifique du projet **Programme des stabilisation des berges du lac Saint-Jean (2017-2026) - Étude et modélisation de l'érosion des berges**. Le contenu de ce document ne peut être appliqué ou utilisé, en tout ou en partie, par ou à l'avantage d'autres parties sans l'autorisation écrite de Lasalle|NHC. Aucune autre garantie, expresse ou tacite, n'est accordée.

Lasalle|NHC et ses directeurs, associés, employés et mandataires n'assument aucune responsabilité à l'utilisation ou au recours du présent document ou de son contenu par des parties autres que **Rio Tinto Alcan**.

SOMMAIRE

Rio Tinto Alcan procède actuellement à la réalisation de différentes études dans le but de poursuivre son Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean (PSBLSJ).

Dans ce contexte, Lasalle | NHC a procédé à l'étude et la modélisation de l'érosion des berges du lac Saint-Jean. Basée sur une analyse approfondie des données disponibles et l'utilisation de différents outils de modélisation de la suite logicielle MIKE, l'étude a permis de dresser un portrait complet des problématiques d'érosion affectant les huit principaux secteurs actuellement suivis par le PSBLSJ. Cette connaissance, et l'utilisation de modèles calibrés, a ensuite permis d'évaluer l'influence du mode de gestion du niveau d'eau du lac, l'impact potentiel des changements climatiques et l'efficacité de différents ouvrages sur les conditions érosives des plages.

Le rapport d'étude est divisé en quatre volumes. Le présent document constitue le volume principal de l'étude, avec une description détaillée des données, de la méthodologie et des modèles numériques mis en œuvre pour simuler les vagues et les niveaux d'eau du lac selon une approche bidimensionnelle, et les conditions érosives des plages de façon unidimensionnelle.

Deux secteurs présentant des composantes bidimensionnelles non-négligeables, l'embouchure de la rivière Belle-Rivière et le secteur de Pointe Langevin à Dolbeau-Mistassini, ont fait l'objet de travaux séparés, présentés dans les volumes 2 et 3 du rapport. Finalement, les rapports produits par les différents consultants ayant participé à l'étude sont regroupés dans un quatrième volume.

L'étude et la modélisation des berges du lac Saint-Jean a permis de dégager les conclusions principales suivantes :

Analyse des changements climatiques

L'augmentation future des températures de l'air prédite par la plupart des modèles climatiques aura pour effet de retarder la prise des glaces des lacs à l'automne et de devancer leur départ au printemps, augmentant ainsi la période d'eau libre et la durée pendant laquelle les berges seront exposées aux vagues de tempêtes.

Suivant ce raisonnement, la période d'eau libre, liée aux températures de l'air, a été choisie comme indicateur (ou proxy) pour quantifier l'impact des changements climatiques sur l'érosion des berges.

La comparaison des températures de l'air simulées par des modèles climatiques en conditions actuelles et futures a permis d'établir que la période d'eau libre serait allongée en moyenne de 17 jours à l'horizon 2035. Ce changement (ou delta) a été utilisé pour ajuster les séries temporelles des simulations de vagues en conditions futures.

Analyse des niveaux d'eau (surcotes et décotes)

L'analyse des niveaux d'eau historiques mesurés aux trois jauges de mesures du lac Saint-Jean a permis d'évaluer les gammes de surcotes et décotes dues aux vents actuellement observées sur le lac. Pour près

de 98% du temps, celles-ci sont de l'ordre de +/- 10 cm. Pour les tempêtes très fortes, les écarts de niveaux entre les trois jauges peuvent parfois atteindre des maximums de l'ordre de 25-30 cm, avec quelques rares extrêmes supérieurs à 40 cm.

Pour élargir l'étude des surcotes à l'ensemble du lac, un modèle numérique hydrodynamique a été mis en œuvre pour simuler le soulèvement de la masse d'eau sous différentes tempêtes de vents, historiques et synthétiques.

Cette analyse a d'abord permis de constater que, selon la direction des vents, les surcotes maximales ne sont pas forcément capturées par les mesures de niveau d'eau des trois jauges installées sur le lac.

Elle a également permis d'établir une nouvelle pondération des mesures de niveau pour calculer un niveau moyen reflétant mieux le niveau moyen réel du lac.

Modélisation des vagues

Un modèle numérique de simulation des vagues générées par le vent a été mis en œuvre pour simuler différents régimes de vagues sur le lac. Calibré sur des mesures effectuées à l'automne 2014, ce modèle a été utilisé pour simuler le régime actuel (1992-2014) et différents régimes futurs (2015-2037).

Le régime actuel a été simulé avec les données historiques des niveaux du lac, les données historiques de vents mesurées à la station météorologique de Mistook et les périodes d'eau libre déterminées à partir des températures de l'air historiques mesurées à la station météorologique de Roberval. En conditions futures, cinq scénarios de niveaux d'eau ont été testés, en maintenant les vents constants mais en modifiant les périodes d'eau libre par un delta de 17 jours.

Les changements apportés par les différents scénarios de gestion du niveau d'eau et l'allongement de la période d'eau libre ont par la suite été évalués en utilisant les différents régimes de vagues pour modéliser l'érosion des berges à long terme.

Analyse des problèmes d'érosion

La simulation de l'érosion des berges à l'aide de deux principaux modèles numériques a permis de mettre en évidence les mécanismes donnant lieu au développement de zones d'érosion problématiques, se traduisant par un recul important du trait de côte. L'analyse de l'évolution du trait de côte par transport longitudinal donne le portrait érosif à long terme (23 ans) alors que l'étude du transport transversal permet d'évaluer la réponse aux événements de tempêtes se produisant à court terme (72 heures).

Parmi les huit grands secteurs de plage, trois ont fait l'objet d'une étude détaillée d'interventions potentielles visant à contrôler l'érosion à long terme due aux gradients de transport longitudinal. Ces trois secteurs sont les sites spécifiques identifiés par Rio Tinto Alcan, soit Dolbeau-Mistassini, Métabetchouan-Lac-à-la-Croix et Saint-Henri-de-Taillon Nord. Les conclusions présentées ci-après rendent compte uniquement de la comparaison des variantes entre elles et de leur efficacité quant à corriger la problématique identifiée à chaque secteur :

- Dolbeau-Mistassini : les résultats montrent que la mise en place de champs d'épis dans les zones des bornes 40 et 100 permet de protéger les tronçons de plage en érosion. Parmi les variantes testées, la variante présentant des épis plus courts (45 à 60 m), mais plus nombreux et plus rapprochés, s'est révélée être la plus performante. Des simulations avec un rechargement sans épis dans ces deux secteurs montrent qu'il est possible de protéger localement la ligne de côte à long terme de cette façon. Cette avenue pourrait donc s'avérer moins coûteuse que la mise en place d'épis. Quant à la zone de la borne 60, les résultats montrent qu'à volume donné, un rechargement plus étalé offre de meilleures performances;
- Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, zone de la borne 3 : les résultats de simulation indiquent que les épis construits durant l'hiver 2014 dans la zone de la borne 3 permettent une protection de la plage en érosion. Le troisième épi contribue à réduire considérablement l'apport de sédiments vers l'embouchure de la rivière Belle-Rivière, auparavant soumise à un ensablement notable.
- Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, zone de la borne 19 : dans la zone de la borne 19, les variantes de rechargement suffiraient à protéger le tronçon de plage contre l'érosion longitudinale. La variante présentant des épis, elle-même accompagnée de rechargements, est également efficace mais semble plus complexe à mettre en œuvre;
- Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, zone de la borne 35 : les résultats des simulations indiquent que les épis construits en 2012 dans la zone de la borne 35 permettent une protection de la plage en érosion vis-à-vis de la borne et plus à l'est. À la borne 36, la situation connaît une certaine amélioration mais cette zone demeure exposée;
- Saint-Henri-de-Taillon Nord : les résultats montrent que les deux principales zones en érosion peuvent être adéquatement protégées à l'aide d'épis permettant une forte réduction de la dérive littorale vers le nord-ouest.

Dans le cas des autres sites présentant des ouvrages de contrôle, des simulations à partir d'un état initial pré-construction des ouvrages ont permis d'évaluer l'efficacité des ouvrages ainsi que les éventuels impacts associés.

L'analyse du transport transversal a permis de classer les différents sites en fonction de leur indice d'érosion traduisant leur propension à l'érosion en période de tempête. Ainsi, d'une manière générale, les secteurs situés dans l'ouest du lac (Dolbeau-Mistassini, Saint-Félicien) présentent un indice d'érosion relativement faible par rapport aux sites de l'est du lac (Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, Saint-Henri-de-Taillon Nord, Saint-Gédéon Sud ou Chambord (pointe et Domaine du Marais)) du fait de leur morphologie, impliquant une pente douce du profil, combinée à des tempêtes moins fréquentes.

Impact des scénarios de gestion du niveau d'eau sur l'érosion des berges

L'analyse des mécanismes de transport sédimentaire selon différentes échelles de temps (transport longitudinal à long terme et transport transversal à court terme) permet de montrer qu'à cause de la

spécificité de chacun des sites de plage du lac Saint-Jean, la réponse à un abaissement du niveau du lac en termes de volumes d'érosion est variable. En réponse à une tempête, donc à court terme, la tendance est généralement à la réduction des volumes d'érosion. Toutefois, ce sont les secteurs les plus sensibles à l'érosion transversale (pente raide du profil) qui conduisent aux variations de volumes les plus faibles alors que les sites les moins sensibles conduisent à une réduction plus marquée des volumes érodés. À long terme, selon les sites, la tendance peut être soit à la baisse, soit à la hausse, notamment dans les zones présentant des épis dont l'efficacité est réduite pour des niveaux d'eau inférieurs au niveau de conception. Ainsi, intervenir à l'échelle globale du lac par un abaissement du niveau d'eau n'apporte pas une solution systématique à tous les sites présentant une problématique d'érosion.

De plus, outre l'aspect d'érosion des berges et des plages du lac, un abaissement important du niveau d'eau du lac pourrait conduire à des problématiques connexes liées aux modifications de la dynamique sédimentaire et de la morphologie des embouchures et deltas de rivières dans le lac. Ces aspects n'ont pas été traités ici puisqu'ils font l'objet d'une étude d'impact réalisée par la firme WSP pour le compte de Rio Tinto Alcan dans le cadre du PSBLSJ (réf. [17]).

Les interventions locales développées spécifiquement en fonction du comportement des différents sites semblent donc être une approche à privilégier afin d'optimiser l'effet local sur l'érosion et de minimiser d'éventuels impacts par ailleurs. Les résultats de l'analyse des variantes d'aménagement dans les sous-secteurs en érosion des sites spécifiques montrent qu'une étude ciblée avec les outils adéquats permet d'évaluer et d'optimiser l'efficacité de scénarios d'intervention locale.

Impact du prolongement de la période d'eau libre sur l'érosion des berges

L'analyse de l'impact du prolongement de 17 jours de la période d'eau libre susceptible de se produire sur la période de 2015 à 2037 (fonte des glaces 7 jours plus tôt au printemps et prise des glaces 10 jours plus tard à la fin de l'automne) sur l'érosion des plages du lac Saint-Jean montre que l'accroissement des volumes d'érosion s'établit à environ 7% en moyenne à long terme (période de 23 ans). Cette augmentation équivaut globalement à l'érosion générée par 1,5 année moyenne, pour les deux modes de transport sédimentaires étudiés (longitudinal et transversal).

Distribution saisonnière de l'érosion

Les volumes érodés sont les plus élevés durant la saison d'automne (octobre et novembre) avec plus de 50% du volume total. Aux mois d'octobre et de novembre, les volumes érodés sont environ 2 à 3 fois supérieurs aux volumes érodés durant les mois d'été. L'importance relative des volumes érodés en automne s'explique principalement par la fréquence accrue des tempêtes durant cette saison. La distribution saisonnière de l'érosion est directement reliée à la distribution saisonnière des vagues.

Recommandations

L'ensemble des résultats présentés au cours de cette étude ont été obtenus à l'aide de modèles numériques calibrés sur la base de données caractérisant le milieu physique du lac Saint-Jean. Toutefois,

ces données, bien que d'une utilité précieuse, se sont révélées incomplètes pour un exercice optimal de validation des modèles et de caractérisation quantitative des sites étudiés (en particulier l'absence de relevés bathymétriques systématiques et fréquents dans certains secteurs). Il apparaît alors important de mettre en place un protocole de suivi détaillé, qui pourrait s'en tenir dans un premier temps aux trois sites spécifiques identifiés par Rio Tinto Alcan (Dolbeau-Mistassini, Métabetchouan-Lac-à-la-Croix et Saint-Henri-de-Taillon Nord), qui forment un échantillon représentatif des différents secteurs du lac.

Les grandes lignes d'un tel protocole se traduiraient par des relevés bathymétriques et topographiques des plages réalisés sur une base régulière au cours de l'année avec des relevés supplémentaires immédiatement avant et après un épisode de tempête significatif. Ces relevés permettraient alors d'effectuer des bilans des volumes d'érosion pour différentes échelles de temps (court, moyen et long termes). Il est bien entendu recommandé de poursuivre ce suivi sur plusieurs années afin de pouvoir établir des tendances d'une année à l'autre mais aussi d'identifier les mécanismes saisonniers récurrents.

Un tel suivi effectué sur une zone faisant l'objet d'un rechargement permettrait également d'évaluer le comportement du massif de rechargement et d'éventuellement procéder à des ajustements visant à en augmenter l'efficacité (pente plus douce, mise en place de butée en pied de plage, etc.).

Finalement, une campagne d'échantillonnage granulométrique permettrait d'éliminer, sinon de réduire, les incertitudes reliées à ce paramètre.

L'ensemble des données collectées lors de ces campagnes de suivi constituerait une base beaucoup plus complète pour interpréter l'évolution des secteurs de plage du lac, raffiner le choix des paramètres de calibrage des modèles utilisés et mettre au point des interventions de stabilisation optimales.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	I
TABLE DES MATIÈRES	VI
LISTE DE FIGURES	X
LISTE DES TABLEAUX	XIII
1 INTRODUCTION.....	1
2 PROBLÉMATIQUE, CONTEXTE ET OBJECTIFS	2
2.1 L'érosion des berges – Principes de bases.....	2
2.1.1 Causes du phénomène.....	2
2.1.2 Transport sédimentaire	3
2.1.3 Types de plages.....	4
2.1.4 Influence du niveau d'eau.....	4
2.1.5 Influence des couverts de glace.....	5
2.1.6 Mesures de protection.....	5
2.2 Érosion des berges au lac Saint-Jean	5
2.2.1 Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean (PSBLSJ)	5
2.2.2 Historique des interventions depuis 1986.....	6
2.3 Objectifs de l'étude.....	12
3 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	13
3.1 Données disponibles	13
3.2 Données recueillies en 2014.....	15
3.3 Outils de modélisation	15
4 RÉGIME DES VENTS.....	17
4.1 Volet 1 – Étude des vents.....	18
4.1.1 Comparaison des données de vents	18
4.1.2 Comparaison des données synchrones de vents.....	22
4.1.3 Analyse préliminaire des tempêtes	22
4.1.4 Choix final de la station météorologique aux fins de modélisation	22
4.2 Volet 2 – Étude des tempêtes.....	23
5 CHANGEMENTS CLIMATIQUES	24
5.1 Approche méthodologique.....	24
5.2 Statistiques en changements climatiques	24
5.3 Indicateur de changement climatique.....	26
5.4 Détermination du proxy.....	27
5.4.1 Prise des glaces	27
5.4.2 Départ des glaces.....	28
5.5 Observations et données de ré-analyses en conditions actuelles.....	30
5.5.1 Prise des glaces	31
5.5.2 Départ des glaces.....	34
5.6 Simulations climatiques	36
5.7 Calcul du delta entre 1961-2000 et 2041-2070	37

5.7.1	Prise des glaces	37
5.7.2	Départ du couvert de glace.....	40
5.8	Interpolation des changements estimés en 2035.....	42
6	MODÈLES DE TERRAIN	45
6.1	Données de base utilisées.....	45
6.2	Modèle de terrain pour la simulation des niveaux d'eau	46
6.3	Modèle de terrain pour la simulation des vagues	50
7	VARIATIONS DE NIVEAU LIÉES AUX VENTS.....	54
7.1	Analyse des niveaux d'eau horaires.....	55
7.2	Modélisation de la variation du niveau liée aux vents	58
7.2.1	Outil de modélisation.....	58
7.2.2	Épisodes de tempête	59
7.2.3	Calibrage du modèle numérique	60
7.3	Surcotes et décotes maximales	64
7.3.1	Épisodes de tempêtes historiques	64
7.3.2	Tempête synthétique.....	75
7.3.3	Analyse de sensibilité au niveau moyen du lac.....	75
7.4	Représentativité des jauges.....	81
8	CLIMAT DE VAGUES	83
8.1	Campagne de mesures des vagues	83
8.1.1	Stations de mesures.....	83
8.1.2	Instruments de mesures et échantillonnage	84
8.1.3	Résultats de la campagne de mesures.....	84
8.2	Modèle MIKE 21 SW	85
8.3	Paramètres de modélisation et calibrage	88
8.3.1	Modèle de terrain	88
8.3.2	Niveaux d'eau.....	88
8.3.3	Données de vent	88
8.3.4	Formulations.....	89
8.3.5	Choix des paramètres de MIKE21 SW.....	89
8.3.6	Choix de la station de vents.....	91
8.4	Scénarios modélisés.....	95
8.4.1	Période passée 1992-2014.....	95
8.4.2	Période future 2015-2037.....	95
8.5	Périodes simulées	101
8.6	Récapitulatif.....	101
8.7	Résultats pour la période 1992-2014.....	102
8.8	Résultats pour la période 2015-2037.....	107
9	MODÉLISATION DE L'ÉROSION DES BERGES	110
9.1	Approche méthodologique.....	110
9.1.1	Utilisation des résultats du modèle global du lac.....	112
9.1.2	Approche filaire – Transport longitudinal et évolution du trait de côte à long terme	112
9.1.3	Approche unidimensionnelle – Transport transversal en réponse aux tempêtes	113
9.2	Secteurs à l'étude.....	116

9.3	Données de base pour chacun des secteurs.....	118
9.3.1	Profils bathymétriques.....	118
9.3.2	Lignes de côte	118
9.3.3	Contours bathymétriques - Isobathes	118
9.3.4	Granulométrie.....	121
9.3.5	Niveau d'eau	124
9.3.6	Vagues.....	124
9.4	Paramètres de modélisation.....	127
9.4.1	Module d'évolution du trait de côte (transport longitudinal ou littoral)	127
9.4.2	Module de transport transversal	130
9.5	Calibrage du module d'évolution du trait de côte (transport longitudinal)	130
9.5.1	Approche générale.....	130
9.5.2	Exemples de résultats de calibrage.....	131
9.6	Calibrage du module de transport transversal	135
9.7	Présentation des résultats	138
9.8	Résultats pour le site de Saint-Gédéon Sud.....	139
9.8.1	Caractérisation du site	139
9.8.2	Évolution à long terme du trait de côte à long terme - Transport longitudinal	140
9.8.3	Transport transversal.....	143
9.9	Résultats pour le site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix	146
9.9.1	Caractérisation du site	146
9.9.2	Évolution du trait de côte à long terme - Transport longitudinal.....	146
9.9.3	Analyse des variantes proposées.....	150
9.9.4	Transport transversal.....	154
9.10	Résultats pour le site de Chambord (Domaine du Marais).....	156
9.10.1	Caractérisation du site.....	156
9.10.2	Évolution du trait de côte à long terme - Transport longitudinal	158
9.10.3	Transport transversal.....	161
9.11	Résultats pour le site de Chambord (Pointe).....	162
9.11.1	Caractérisation du site.....	162
9.11.2	Évolution du trait de côte à long terme - Transport longitudinal	163
9.11.3	Transport transversal.....	165
9.12	Résultats pour le site de Mashteuiatsh	166
9.12.1	Caractérisation du site.....	166
9.12.2	Évolution du trait de côte à long terme - Transport longitudinal	167
9.12.3	Transport transversal.....	169
9.13	Résultats pour le site de Saint-Félicien	170
9.13.1	Caractérisation du site.....	170
9.13.2	Évolution du trait de côte à long terme - Transport longitudinal	170
9.13.3	Transport transversal.....	173
9.14	Résultats pour le site de Dolbeau-Mistassini.....	174
9.14.1	Caractérisation du site.....	174
9.14.2	Évolution du trait de côte à long terme - Transport longitudinal	174
9.14.3	Analyse des variantes proposées	177
9.14.4	Transport transversal.....	180
9.15	Résultats pour le site de Saint-Henri-de-Taillon Nord	181

9.15.1	Caractérisation du site.....	181
9.15.2	Évolution du trait de côte à long terme - Transport longitudinal	183
9.15.3	Analyse des variantes proposées	185
9.15.4	Transport transversal.....	187
9.16	Synthèse sur l'interprétation conceptuelle des résultats.....	189
9.16.1	Interprétation des résultats.....	189
9.16.2	Limitation des modèles	190
10	ANALYSE DES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS DE GESTION DU NIVEAU D'EAU	193
10.1	Érosion à long terme - Transport longitudinal.....	194
10.2	Transport transversal.....	197
10.3	Résumé.....	199
11	ANALYSE DU PROLONGEMENT DE LA PÉRIODE D'EAU LIBRE ENGENDRÉ PAR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	203
12	ÉROSION SAISONNIÈRE.....	206
12.1	Variation saisonnière du climat de vagues	206
12.2	Distribution saisonnière des volumes érodés.....	208
13	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	210
14	RÉFÉRENCES.....	215

ANNEXE A : Recueil photographique des images MODIS au moment de la prise des glaces

ANNEXE B : Calibrage du modèle d'évolution du trait de côte (transport longitudinal)

ANNEXE C : Transport sédimentaire longitudinal net et brut

ANNEXE D : Caractéristiques des vagues formant les événements de 72 heures

ANNEXE E : Recul de la ligne de côte simulé avec un événement de 72 heures en transport transversal

LISTE DE FIGURES

Figure 2.1: Génération, propagation, réfraction et déferlement des vagues (<i>source: réf. [1]</i>)	2
Figure 2.2 Courants générés par les vagues (<i>source: réf. [2]</i>)	3
Figure 2.3: Carte de localisation des principaux secteurs étudiés en érosion (<i>image Google Earth</i>)	9
Figure 2.4: Historique des interventions par secteur (1993-2014)	10
Figure 2.5: Volumes de rechargement le long des secteurs (1993-2014).....	11
Figure 3.1: Approche méthodologique	14
Figure 3.2: Modules de modélisation numérique	16
Figure 4.1 : Rose des vents en seize secteurs avec équivalence en degrés	17
Figure 4.2: Localisation des stations météorologiques dans le secteur à l'étude.....	18
Figure 4.3: Rose des vents de la station de Roberval (1994-2014)	19
Figure 4.4: Rose des vents de la station de Normandin (1994-2014)	20
Figure 4.5: Rose des vents de la station de Mistook (1994-2014)	21
Figure 5.1: Approche méthodologique dans l'analyse des changements climatiques	25
Figure 5.2: Images satellites du lac Saint-Jean	28
Figure 5.3: Localisation des stations de mesures et des points de ré-analyses	32
Figure 5.4: Date de prise des glaces (-150°C-jours) – Données mesurées et ré-analyses entre 1979 et 2010... 33	
Figure 5.5: Date de départ des glaces (175°C-jours) – Données mesurées et ré-analyses entre 1979 et 2010 . 35	
Figure 5.6: Date de prise des glaces (-150°C-jours) – Simulations climatiques 1961-2000	39
Figure 5.7: Date de prise des glaces (-150°C-jours) – Simulations climatiques 2046-2065 ou 2041-2070	39
Figure 5.8: Date de départ des glaces (175°C-jours) – Simulations climatiques 1961-2000.....	41
Figure 5.9: Date de départ des glaces (175°C-jours) – Simulations climatiques 2046-2065 ou 2041-2070	41
Figure 5.10: Prolongement futur de la période d'eau libre retenue dans l'analyse	43
Figure 6.1: Couverture des données provenant du Service hydrographique du Canada	47
Figure 6.2: Couverture des données provenant des relevés topographiques et bathymétriques 2014	48
Figure 6.3: Modèle de terrain utilisé pour simuler les niveaux d'eau.....	49
Figure 6.4: Maillages analysés - Modèle détaillé à gauche et modèle simplifié à droite.....	50
Figure 6.5: Position des points d'analyse des modèles bathymétriques détaillé et simplifié	51
Figure 6.6: Modèle de terrain utilisé pour simuler les vagues.....	53
Figure 7.1: Localisation des stations de mesure du niveau d'eau dans le lac Saint-Jean.....	54
Figure 7.2: Distribution des écarts de niveaux entre Saint-Gédéon et Roberval de 1992 à 2014	56
Figure 7.3: Distribution des écarts de niveaux entre St-Henri-de-Taillon et Roberval de 1992 à 2014.....	57
Figure 7.4: Nombre d'heures de surcotes supérieures à 10 cm	58
Figure 7.5: Calibrage de MIKE 21 HD – Variation du coefficient de frottement des vents	61
Figure 7.6: Calibrage du modèle MIKE 21 HD – Variation de la rugosité des fonds	62
Figure 7.7: Calibrage du modèle MIKE 21 HD – Variation du facteur de recalage des vents (k)	63
Figure 7.8: Calibrage du modèle MIKE 21 HD – Paramètres finaux	63
Figure 7.9: Vents enregistrés lors de la tempête du 23 au 26 novembre 2013	65

Figure 7.10: Écart de niveau mesurés et modélisés du 23 au 26 novembre 2013	66
Figure 7.11: Vents enregistrés lors de la tempête du 17 au 20 novembre 2013	67
Figure 7.12 : Écart de niveau mesurés et modélisés du 17 au 21 novembre 2013	68
Figure 7.13: Vents enregistrés lors de la tempête du 9 au 12 août 2013	69
Figure 7.14: Écart de niveau mesurés et modélisés du 9 au 12 août 2013	70
Figure 7.15: Vents enregistrés lors de la tempête du 5 au 7 novembre 2007	71
Figure 7.16: Écart de niveau mesurés et modélisés 5 au 7 novembre 2007	72
Figure 7.17: Écart de niveau maximums pour la tempête du 23 au 26 novembre 2013	73
Figure 7.18: Écart de niveau maximums pour la tempête du 17 au 20 novembre 2013	73
Figure 7.19: Écart de niveau maximums pour la tempête du 9 au 11 août 2013	74
Figure 7.20: Écart de niveau maximums pour la tempête 5 au 7 novembre 2007	74
Figure 7.21: Écart de niveaux par rapport à la station de Roberval – Vents de 40 km/h du nord-est	76
Figure 7.22: Écart de niveaux par rapport à la station de Roberval – Vents de 40 km/h de l’est	76
Figure 7.23: Écart de niveaux par rapport à la station de Roberval – Vents de 40 km/h du sud-est	77
Figure 7.24: Écart de niveaux par rapport à la station de Roberval – Vents de 40 km/h du sud	77
Figure 7.25: Écart de niveaux par rapport à la station de Roberval – Vents de 40 km/h du sud-ouest.....	78
Figure 7.26: Écart de niveaux par rapport à la station de Roberval – Vents de 40 km/h de l’ouest	78
Figure 7.27: Écart de niveaux par rapport à la station de Roberval – Vents de 40 km/h du nord-ouest.....	79
Figure 7.28: Écart de niveaux par rapport à la station de Roberval – Vents de 40 km/h du nord	79
Figure 7.29: Surcotes et décotes pour une tempête synthétique de 40 km/h	80
Figure 7.30: Écart de niveau maximums (17 au 20 novembre 2013) - Niveau initial abaissé à 15,5 pi	80
Figure 7.31: Écart de niveaux d’eau par rapport au niveau moyen du lac (101,54 m).....	82
Figure 8.1: Localisation des instruments de mesure des vagues	84
Figure 8.2: Vitesses des vents mesurées lors de la campagne d’automne 2014	86
Figure 8.3: Directions des vents mesurées lors de la campagne d’automne 2014.....	86
Figure 8.4: Hauteurs significatives (H_s) mesurées aux stations 1 et 2 lors de la campagne d’automne 2014....	87
Figure 8.5: Périodes de pointe (T_p) mesurées aux stations 1 et 2 lors de la campagne d’automne 2014.....	87
Figure 8.6: Niveaux d’eau mesurés aux jauges lors de la campagne d’automne 2014.....	88
Figure 8.7: Calibrage du modèle – Comparaison des hauteurs significatives (H_s) mesurées et simulées	92
Figure 8.8: Calibrage du modèle – Comparaison des périodes de pointe (T_p) mesurées et simulées.....	93
Figure 8.9: Calibrage du modèle – Comparaison des directions des vagues mesurées et simulées	94
Figure 8.10: Scénario A.....	97
Figure 8.11: Scénario B.....	97
Figure 8.12: Scénario C.....	98
Figure 8.13: Scénario D	98
Figure 8.14: Scénario E.....	99
Figure 8.15: Scénario F	99
Figure 8.16: Scénarios A à F - Comparaison des niveaux maximums, médians et minimums.....	100
Figure 8.17: Sites d’intérêt et d’extraction des résultats de modélisation des vagues	104
Figure 8.18: Rose des vagues 1992-2014 simulées aux points 1 à 5a	105
Figure 8.19: Rose des vagues 1992-2014 simulées aux points 5a à 7b.....	106
Figure 8.20: Rose des vagues 1992-2014 simulées au point 8, stations 1 et 2 et centre du lac	107
Figure 8.21: Classes de vagues simulées au point 7a en conditions actuelles et pour le scénario E	109

Figure 8.22: Classes de vagues simulées à la station 1 en conditions actuelles et pour le scénario E.....	109
Figure 9.1: Organigramme de modélisation du transport sédimentaire	111
Figure 9.2: Organigramme de modélisation du transport transversal.....	114
Figure 9.3: Organigramme de modélisation du transport transversal (suite)	114
Figure 9.4: Méthode de calcul de l'indice d'érosion	115
Figure 9.5: Localisation des secteurs modélisés	117
Figure 9.6: Profils de plage des différents secteurs à l'étude	120
Figure 9.7: Profils typiques des différents secteurs à l'étude	121
Figure 9.8: Transport littoral obtenu en fonction de la série de vagues considérée	125
Figure 9.9: Contribution des vagues au transport longitudinal	126
Figure 9.10: Signification physique de la profondeur active.....	128
Figure 9.11: Étendue transversale du transport longitudinal	129
Figure 9.12: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Dolbeau-Mistassini	132
Figure 9.13: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Dolbeau-Mistassini (suite)	133
Figure 9.14: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Métabetchouan-Lac-à-la-Croix	134
Figure 9.15: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Métabetchouan-Lac-à-la-Croix (suite)	134
Figure 9.16: Évolution de la ligne de côte mesurée à Métabetchouan-Lac-à-la-Croix entre novembre 2013 et mai 2014.....	136
Figure 9.17: Évolution de la ligne de côte mesurée à Dolbeau-Mistassini entre novembre 2013 et mai 2014.....	137
Figure 9.18 : Secteur Saint-Gédéon Sud.....	140
Figure 9.19: Roses des vagues pour Saint-Gédéon Sud	140
Figure 9.20: Résultats de simulation de l'évolution du trait de côte à long terme pour Saint-Gédéon Sud	142
Figure 9.21 : Secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix.....	148
Figure 9.22: Roses des vagues pour Métabetchouan-Lac-à-la-Croix	148
Figure 9.23: Résultats de simulations de l'évolution du trait de côte à long terme pour Métabetchouan-Lac-à-la-Croix	149
Figure 9.24: Efficacité des épis aménagés en 2014 dans la zone de la borne 3 de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix	151
Figure 9.25: Performance des aménagements dans la zone de la borne 19 de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix	152
Figure 9.26: Efficacité des ouvrages aménagés en 2012 dans la zone de la borne 35 de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix	153
Figure 9.27: Comportement d'un massif de rechargement.....	156
Figure 9.28 : Secteur de Chambord (Domaine du Marais).....	157
Figure 9.29: Roses des vagues pour le site de Chambord (Domaine du Marais).....	157
Figure 9.30 : Analyse conceptuelle de l'approche des vagues au site de Chambord (Domaine du Marais)	158
Figure 9.31: Résultats de simulations de l'évolution du trait de côte à long terme pour Chambord (Domaine du Marais)	159
Figure 9.32 : Extrémité ouest du secteur de Chambord (Domaine du Marais)	160
Figure 9.33 : Secteur de Chambord (Pointe).....	162
Figure 9.34: Rose des vagues pour Chambord (Pointe).....	163
Figure 9.35: Résultats de simulations de l'évolution du trait de côte à long terme pour Chambord (Pointe) .	164
Figure 9.36 : Secteur de Mashteuiatsh	166

Figure 9.37: Roses des vagues pour Mashteuiatsh	166
Figure 9.38: Résultats de simulations de l'évolution du trait de côte à long terme pour Mashteuiatsh	168
Figure 9.39 : Secteur de Saint-Félicien	171
Figure 9.40: Roses des vagues pour Saint-Félicien.....	171
Figure 9.41: Résultats de simulations de l'évolution du trait de côte à long terme pour Saint-Félicien	172
Figure 9.42: Secteur du Dolbeau-Mistassini.....	175
Figure 9.43: Roses des vagues pour Dolbeau-Mistassini	175
Figure 9.44: Résultats de simulations de l'évolution du trait de côte à long terme pour Dolbeau-Mistassini	176
Figure 9.45: Efficacité des interventions proposées - Zones des bornes 100 et 40 de Dolbeau-Mistassini	178
Figure 9.46: Évolution de la position du trait de côte des rechargements à la zone de la borne 60.....	180
Figure 9.47 : Secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord	182
Figure 9.48: Roses des vagues pour Saint-Henri-de-Taillon Nord.....	182
Figure 9.49: Schématisation du site de Saint-Henri-de-Taillon Nord 2 aux bornes 17 et 27	183
Figure 9.50: Résultats de simulations de l'évolution du trait de côte à long terme pour Saint-Henri-de-Taillon Nord.....	184
Figure 9.51: Efficacité des variantes dans la zone de la borne 15 de Saint-Henri-de-Taillon Nord	186
Figure 9.52: Efficacité des variantes dans la zone de la borne 26 de Saint-Henri-de-Taillon Nord	187
Figure 10.1: Scénarios alternatifs de gestion du niveau d'eau	193
Figure 10.2 : Synthèse des résultats pour les différents scénarios de gestion du niveau d'eau.....	200
Figure 10.3: Largeur de plage supplémentaire pour différents niveaux d'eau.....	202
Figure 12.1: Distribution saisonnière des vagues sur une période de 23 ans.....	207
Figure 12.2: Synthèse des résultats de l'analyse de l'érosion saisonnière	209

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5.1: Nombre de degré-jours de gel à la prise des glaces (°C-jours).....	29
Tableau 5.2: Nombre de degré-jours de réchauffement au départ des glaces (°C-jours)	29
Tableau 5.3: Mesures et ré-analyses des températures de l’air quotidiennes.....	32
Tableau 5.4: Date de prise du couvert de glace basée sur -150°C-jours de gel (1979-2010)	34
Tableau 5.5: Date de départ du couvert de glace basée sur 175°C-jours de réchauffement (1979-2010)	35
Tableau 5.6: Simulations climatiques.....	37
Tableau 5.7: Statistiques des simulations climatiques pour la prise des glaces	40
Tableau 5.8: Statistiques des simulations climatiques pour le départ des glaces	42
Tableau 5.9: Interpolation des deltas de changements climatiques en 2035.....	43
Tableau 6.1: Analyse de sensibilité de la taille de maille maximale pour la simulation des niveaux d’eau	50
Tableau 6.2: Résultats comparatifs des deux modèles de terrain (Détailé versus Simplifié)	52
Tableau 7.1: Écarts de niveau par rapport au niveau moyen du lac.....	81
Tableau 8.1: Paramètres testés lors du calibrage du modèle MIKE21 SW	90
Tableau 8.2: Scénarios de gestion du niveau d’eau du lac Saint-Jean (niveaux en pieds).....	96
Tableau 8.3: Niveaux historiques en pieds et équivalence en niveau géodésique (NMM)	96
Tableau 8.4: Périodes d’eau libre pour les périodes passée (1992-2014) et future (2015-2037)	102
Tableau 9.1: Caractéristiques des secteurs modélisés.....	118
Tableau 9.2: Sensibilité de la granulométrie sur le transport longitudinal à long terme	123
Tableau 9.3: Sensibilité de la granulométrie sur le transport transversal	124
Tableau 9.4: Calibrage du modèle de transport transversal.....	138
Tableau 9.5: Zone du profil A de Saint-Gédéon Sud – Matrice de volume érodé vers le large	144
Tableau 9.6: Zone du profil B de Saint-Gédéon Sud - Matrice de volume érodé vers le large	144
Tableau 9.7: Comparaison des aménagements entre les variantes pour la zone de la borne 3	150
Tableau 9.8: Comparaison des variantes pour la zone de la borne 19	152
Tableau 9.9: Secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix – Matrice de volume érodé vers le large.....	154
Tableau 9.10: Secteur de Chambord (Domaine du Marais) – Matrice de volume érodé vers le large.....	161
Tableau 9.11: Secteur de Chambord (pointe) – Matrice de volume érodé vers le large.....	165
Tableau 9.12: Secteur de Mashteuiatsh - Matrice de volume érodé vers le large	169
Tableau 9.13: Secteur de Saint-Félicien – Matrice de volume érodé vers le large	173
Tableau 9.14: Comparaison des variantes d’aménagements pour les zones des bornes 100 et 40	178
Tableau 9.15: Variantes d’aménagements pour la zone de la borne 60 de Dolbeau-Mistassini.....	179
Tableau 9.16: Secteur de Dolbeau-Mistassini – Matrice de volume érodé vers le large.....	181
Tableau 9.17: Comparaison des variantes pour la zone de la borne 15	185
Tableau 9.18: Comparaison des aménagements entre les variantes pour la zone de la borne 26	186
Tableau 9.19: Secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord 1 – Matrice de volume érodé vers le large	188
Tableau 9.20: Secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord 2 – Matrice de volume érodé vers le large	188
Tableau 10.1: Contraintes en termes de niveaux d’eau maximums.....	193

Tableau 10.2: Effet du scénario de gestion du niveau d'eau sur l'érosion à long terme (23 ans)	194
Tableau 10.3: Effet du scénario de gestion du niveau d'eau sur l'érosion à long terme (23 ans) (suite)	195
Tableau 10.4: Effet du scénario de gestion du niveau d'eau sur l'érosion à long terme (23 ans) (moyenne)..	195
Tableau 10.5: Effet du scénario de gestion du niveau d'eau sur le transport transversal lors des événements de tempêtes	198
Tableau 10.6: Synthèse des résultats pour les différents scénarios de gestion du niveau d'eau	201
Tableau 11.1: Effet du prolongement de la période d'eau libre sur l'érosion longitudinale	204
Tableau 11.2 : Effet du prolongement de la période d'eau libre sur l'érosion transversale	205

1 INTRODUCTION

Rio Tinto Alcan procède actuellement à la réalisation de différentes études dans le but de poursuivre son Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean (PSBLSJ), lequel fait l'objet d'un décret émis initialement par le Gouvernement du Québec en 1986, qui a été reconduit en 1996 puis en 2006. Ce décret et l'entente qui l'accompagne précisent les paramètres du PSBLSJ et fixe le mode de gestion du niveau du lac Saint-Jean.

En vue de bien préparer les démarches qui mèneront à la définition de la prochaine entente, Rio Tinto Alcan souhaite mettre à jour les moyens d'étude et de modélisation mis en œuvre pour quantifier l'érosion des berges et évaluer différents modes de gestion des niveaux du lac et leurs impacts sur l'érosion.

Lasalle|NHC a été mandaté par Rio Tinto Alcan pour réaliser une étude de modélisation de l'érosion des berges du lac Saint-Jean. Lasalle|NHC s'est adjoint les services d'Environnement Illimité pour réaliser une campagne de mesures des vagues à l'automne 2014 ainsi que ceux de la firme Consultants Ropars (CRI) pour procéder à une analyse détaillée des données de vent disponibles dans le secteur.

Le rapport d'étude est réparti en quatre volumes distincts. La première partie, comprise dans le présent document, présente l'étude de l'érosion des berges du lac Saint-Jean dans son ensemble, incluant la préparation et l'analyse des données requises pour la modélisation proprement dite de l'érosion des berges autour du lac. Deux sites présentant des caractéristiques plus complexes, l'embouchure de la rivière Belle-Rivière et le secteur Pointe Langevin à Dolbeau-Mistassini, font l'objet des deuxième et troisième volumes. Finalement, les rapports produits par les consultants ayant participé à l'étude sont regroupés dans le volume 4.

Le présent rapport comprend 11 chapitres. Les chapitres 2 et 3 introduisent la problématique à l'étude et l'approche méthodologique mise au point pour l'étudier. Les chapitres 4, 5 et 6 décrivent les paramètres de base analysés pour appuyer les travaux de modélisation, soit les vents, les changements climatiques, et les levés bathymétriques/topographiques. Les données de niveau d'eau et de vagues, ainsi que les travaux de modélisation numérique associés, sont de leur côté présentées aux chapitres 7 et 8. Les résultats obtenus dans la modélisation de l'érosion des berges du lac Saint-Jean sont décrits pour chaque secteur au chapitre 9, et analysés aux chapitres 10 à 12 en termes de scénario de gestion du niveau d'eau de changements climatiques et de variations saisonnières.

2 PROBLÉMATIQUE, CONTEXTE ET OBJECTIFS

Suite à la mise en service de la centrale de l'Isle-Maligne, en 1926, le lac Saint-Jean a subi un rehaussement important de son niveau d'eau moyen pour les besoins de la production hydroélectrique.

L'augmentation notable du niveau d'eau moyen du lac Saint-Jean a modifié la dynamique hydro-sédimentaire de ses berges et de ses plages, avec comme principale conséquence une forte augmentation de la fréquence des vagues de tempêtes agissant en tête de plage et de talus, conduisant dans certains secteurs à de l'érosion importante des berges.

2.1 L'érosion des berges – Principes de bases

L'érosion des plages et des berges d'une zone littorale est un processus dynamique par lequel les matériaux sont remaniés sous l'action des vagues, des courants littoraux et des vents. La sévérité de l'érosion dépend des forces naturelles agissant sur le plan d'eau, des caractéristiques hydrosédimentologiques des berges et des interventions humaines mises en place pour contrer les problèmes des secteurs affectés.

2.1.1 Causes du phénomène

Dans un milieu comme le lac Saint-Jean, la cause première de l'érosion est l'action des vagues sur les sédiments des plages.

Selon la force, la direction et la durée des vents soufflant sur un lac, des vagues d'intensité variable sont générées par les vents. À l'approche du rivage, les vagues commencent à ressentir l'influence de la réduction de la profondeur et de la forme des fonds et ont tendance à tourner pour s'aligner avec les isobathes. Ce phénomène, appelé réfraction, entraîne une décélération des vagues et une augmentation de leur hauteur. Rendues en eau peu profonde, les vagues deviennent instables et déferlent (figure 2.1).

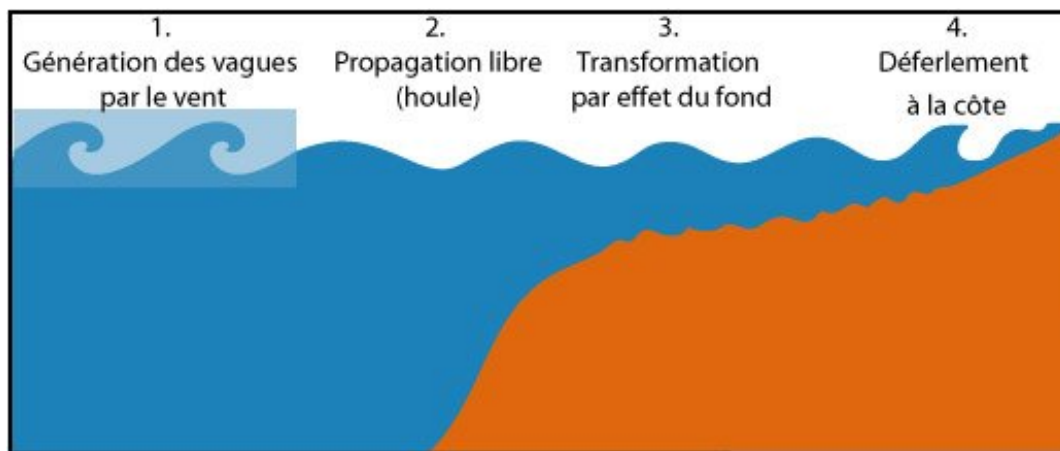


Figure 2.1: Génération, propagation, réfraction et déferlement des vagues (source: réf. [1])

Le déferlement des vagues libère une énergie qui génère des courants sur les fonds. Comme les vagues conservent généralement un certain angle d'incidence par rapport au rivage, les courants ont deux composantes : vers le large et parallèle au rivage (figure 2.2). Si la force de cisaillement induite par ces courants est supérieure à la résistance des sédiments en place, ceux-ci sont entraînés et transportés par les courants. Le transport transversal désigne le transport des sédiments vers le large, et le transport longitudinal (aussi appelé transport littoral), celui parallèle à la côte.

Selon les caractéristiques hydrosédimentologiques du site et de celles des vagues, le transport transversal et le transport longitudinal peuvent ensuite causer des zones d'accumulation et/ou d'érosion des matériaux.

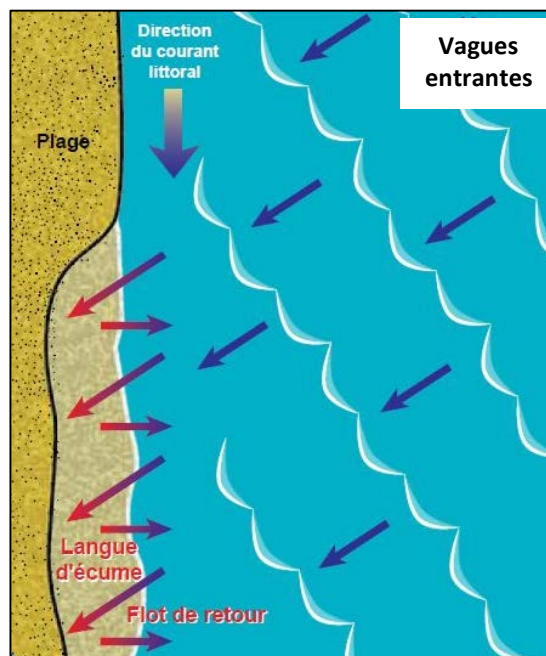


Figure 2.2 Courants générés par les vagues (source: réf. [2])

2.1.2 Transport sédimentaire

Tel que mentionné à la section précédente, on distingue deux principaux mécanismes de transport des sédiments, selon leur direction dominante par rapport à la côte : le transport longitudinal et le transport transversal.

Le transport longitudinal est induit par les courants littoraux. Il façonne à long terme le trait de côte. La variation de son gradient conduit à des zones d'accrétion (progression) ou d'érosion (recul) de la plage.

Le transport transversal est induit par l'impact des vagues elles-mêmes et les courants qu'elles induisent perpendiculairement à la plage. Il est responsable de l'évolution du profil de plage, qui varie en fonction des épisodes de tempêtes et des périodes de temps calmes.

2.1.3 Types de plages

Les plages sont des milieux dynamiques qui se divisent en deux principaux types : stables (à l'équilibre) ou en érosion. Ces plages subissent toutes deux des cycles naturels d'érosion et d'accumulation.

Lors de tempêtes, l'attaque frontale des vagues érode les berges et les plages, ce qui résulte en une perte de sédiments vers le large, où ils s'accumulent en eau plus profonde. En périodes plus calmes, l'action frontale des vagues tend à ramener les sédiments vers la plage et on assiste, dans le cas de plages naturelles à l'équilibre, à un processus de reconstruction de la plage.

Les plages stables présentent ainsi des changements morphologiques ponctuels, autour de leur profil d'équilibre, mais n'ont pas de pertes ou de gains sédimentaires à long terme. Les plages en érosion, de leur côté, présentent un profil généralement plus irrégulier. À long terme, elles perdent plus de sédiments qu'elles n'en gagnent et ont un bilan sédimentaire négatif.

2.1.4 Influence du niveau d'eau

Le niveau d'eau d'un lac agit sur l'érosion des berges car il dicte la hauteur de plage mouillée par les vagues et les profondeurs d'eau, lesquelles influencent potentiellement la transformation des vagues en direction du rivage et les phénomènes qui en découlent (réfraction, déferlement, courants littoraux).

L'influence du niveau d'eau sur le transport longitudinal dépend des caractéristiques du site examiné. Pour une plage au profil régulier, la variation du niveau d'eau a peu d'influence sur le transport longitudinal, puisque les fonds sous les vagues restent similaires, peu importe le niveau. Le transport longitudinal est simplement déplacé vers le large à niveau bas, et vers le rivage à niveau haut. Pour une plage présentant des variations subites de bathymétrie, par contre, la variation du niveau d'eau peut altérer les phénomènes de réfraction des vagues et le transport longitudinal qui en résulte.

L'impact du niveau d'eau sur le transport transversal est plus direct, le point d'attaque des vagues sur la plage bougeant verticalement avec le niveau. Pour un rehaussement de niveau au-dessus du niveau maximum existant, le haut de plage s'érode et la plage recule, tentant d'atteindre un nouveau profil d'équilibre. Pour un abaissement du niveau maximal, le haut de plage désormais exondé peut également subir des changements, dus notamment à l'érosion par le ruissellement et le vent et, dans certain cas, au développement de végétation. Encore une fois, si la variation du niveau intervient sur un profil de plage régulier, les conséquences sur l'érosion sont moins prononcées que pour un profil irrégulier.

Suite à une modification du niveau d'eau, l'aggravation ou l'amélioration des problèmes d'érosion dépend donc du profil de plage existant et de la nouvelle gamme de niveaux envisagée. Si cette gamme coïncide avec un segment du profil de plage de pente relativement constante, les phénomènes d'érosion demeureront similaires aux conditions actuelles. Si toutefois elle correspond à un segment de plage présentant des changements importants de pente, l'érosion sera modifiée, à la hausse ou à la baisse, par rapport aux conditions actuelles.

L'impact d'un changement de niveau d'eau sur le transport sédimentaire est donc très étroitement lié aux caractéristiques spécifiques des différents sites soumis à ce changement et, dans le cas d'une étendue d'eau comme le lac Saint-Jean, ne pourra être le même pour l'ensemble des berges soumises à l'érosion (réf. [3]).

2.1.5 Influence des couverts de glace

Dans les régions froides, la formation de glace de rive au pourtour d'une étendue d'eau en début d'hiver contribue à protéger les berges de l'action directe des vagues. Lorsque le couvert est complètement fermé, il empêche la génération de vagues par le vent. On considère ainsi qu'il y a très peu de phénomènes érosifs dans les lacs en période hivernale, à l'exception des embouchures de rivières qui peuvent être plus dynamiques.

2.1.6 Mesures de protection

Depuis plusieurs décennies, l'occupation grandissante du littoral a contribué à l'implantation de différentes mesures de protection contre l'érosion : perrés, murs de soutènement, épis, brise-lames, rechargements, etc. Ces mesures, souvent efficaces de façon locale, viennent toutefois perturber les processus globaux de la dynamique côtière, et mènent dans bien des cas à une détérioration des secteurs adjacents. D'autres interventions deviennent alors nécessaires, créant un effet domino (réf. [4]).

2.2 Érosion des berges au lac Saint-Jean

La régulation du niveau d'eau du lac Saint-Jean fait en sorte que les niveaux d'eau du lac sont abaissés en période estivale et rehaussés à l'automne, en prévision du tarissement hivernal. L'abaissement des niveaux d'eau en été déplace les phénomènes érosifs et le transport des sédiments plus loin vers le large, ce qui diminue la reconstitution des hauts de plage en période calme. Le rehaussement du niveau à l'automne, lui, fait coïncider les épisodes de tempêtes avec les niveaux hauts, favorisant une attaque plus forte et plus haute des vagues de tempêtes sur les berges.

Le problème d'érosion de berges du lac Saint-Jean est devenu évident dès 1926, suite à la mise en service de la centrale de l'Isle Maligne. Au début des années '80, des interventions ciblées ont été mise en œuvre par Rio Tinto Alcan (autrefois Alcan). Jusqu'en 1986, les interventions ont principalement consisté en la recharge de plages à l'aide de sédiments dragués dans le lac, en pose de gravier recouvert de sable et en construction de perrés (réf. [5]).

2.2.1 Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean (PSBLSJ)

Malgré ces efforts de stabilisation, les dommages causés par l'érosion sont demeurés importants. Afin de trouver des solutions plus durables, tout en tenant compte des aspects techniques, économiques, sociaux et environnementaux, Rio Tinto Alcan a conclu en 1986 une entente avec le Gouvernement du Québec. Cette entente était basée sur l'étude d'impact du Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean (PSBLSJ) déposée auprès du ministère de l'Environnement et du Bureau d'audiences publiques en environnement (BAPE, 1985). Cette entente régit les mesures de protection contre l'érosion et les règles de gestion du niveau du lac. D'abord en vigueur de 1986 à 1996, le PSBLSJ a été reconduit par décret pour

deux autres périodes de 10 ans, soit de 1996 à 2006 et de 2006 à 2016. La prochaine entente devrait s'étendre de 2017 à 2026.

En termes de gestion du niveau d'eau, le décret précise les modalités d'application des niveaux maximum et minimum à respecter dans des conditions normales de gestion. Bien que les droits d'eau de Rio Tinto Alcan soient liés à un niveau maximum de 17,5 pi (101,84 m)¹ à l'échelle du quai d'étiage de Roberval et que le décret reconnaisse ces droits, l'entreprise a choisi en 1990 d'abaisser le niveau maximum d'opération à 16,5 pi (101,54 m), sous réserve de dépassements occasionnels causés par des phénomènes naturels ou imprévisibles.

2.2.2 Historique des interventions depuis 1986

Les problèmes d'érosion affectant les berges du lac Saint-Jean ont nécessité de la part de Rio Tinto Alcan des travaux importants de stabilisation des berges. Ces travaux comprennent notamment les interventions suivantes :

- Rechargements de plages;
- Mise en place d'ouvrages de contrôle du transport sédimentaire (épis, brise-lames détachés, géotubes, etc.) dans les secteurs de plage les plus vulnérables;
- Protection de berges à l'aide de perrés et de techniques de génie végétal;
- Construction d'accès à l'eau (escaliers ou rampes) dans les secteurs où la protection de berge réduit l'accessibilité au plan d'eau.

Au total, près de 45 km de berges du lac Saint-Jean sont reconnus comme étant des plages dans l'entente de 1986. La presque totalité de ces plages a fait l'objet d'interventions depuis la mise en place du programme, répartis en huit principaux secteurs : Saint-Gédéon Sud, Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, Chambord (Domaine du Marais), Chambord (Pointe), Mashteuiatsh, Saint-Félicien, Dolbeau-Mistassini et Saint-Henri-de-Taillon Nord (figure 2.3).

La plupart des secteurs ont fait l'objet d'interventions dans les premières années suivant le début du PSBLSJ. Ces premiers travaux ont permis de stabiliser de nombreux segments de plage. Dans d'autres endroits, toutefois, des interventions régulières ont été requises au fil des ans.

Les figures 2.4 et 2.5 offre une synthèse des principales interventions effectuées dans le cadre du PSBLSJ pour les secteurs analysés dans le cadre de la présente étude. Pour faciliter la lecture des informations

¹ Le niveau du lac en pieds se rapporte à la référence historique, qui correspond au zéro de la règle d'étiage du quai de Roberval. Les niveaux relatifs les plus souvent cités et leur équivalence en élévation géodésique sont présentés au tableau 8.3.

présentées, les figures utilisent le même système de repérage que celui du PSBLSJ, soit le réseau de bornes inamovibles (BI) qui divise chaque secteur en plusieurs segments de plage.

La figure 2.4 offre un historique des interventions faites depuis 1993² pour stabiliser les plages des huit principaux secteurs à l'étude. Deux principales informations sont fournies :

- Rechargements : les volumes de rechargement sont illustrés graphiquement en fonction du temps, et par sous-secteurs, lesquels sont définis par les bornes inamovibles situées à chacune de leurs extrémités. Les tonnes de matériaux sont cumulées en fonction du temps, ce qui permet d'évaluer la quantité totale mise en place et d'identifier les périodes pendant lesquelles aucun rechargement n'a eu lieu (courbe horizontale). À titre d'exemple, au site de Chambord (Pointe), il y a eu un premier rechargement en 1996, un deuxième en 2006 puis un troisième en 2014, pour une quantité totale d'environ 30 000 tonnes;
- Ouvrages : les épis, brise-lames et géotubes implantés dans chaque secteur sont spécifiés en fonction de leur nombre et année de construction, pour les segments de plage modélisés et étudiés au chapitre 9. Les secteurs de Chambord (Domaine du Marais) de Saint-Henri-de-Taillon Nord n'ont aucun ouvrage.

La figure 2.5 reprend de son côté la synthèse des rechargements entre 1993 et 2014, mais présente l'information spatialement, plutôt que temporellement. Les volumes de rechargement exprimés en tonne par mètre permettent de repérer facilement les segments de plage les plus affectés par l'érosion.

Les caractéristiques érosives de chacun des secteurs identifiés aux figures 2.4 et 2.5 sont analysées en détails au chapitre 9. L'examen global des figures 2.4 et 2.5 permet toutefois de dégager certains points intéressants :

- Les secteurs situés du côté ouest du lac, soit Chambord (Pointe), Mashteuiatsh et Saint-Félicien, ont des volumes de rechargement cumulatifs du même ordre et présentent une stabilité de plage similaire. Ces dernières années, les rechargements ont été effectués aux 5 à 7 ans. Dans les tronçons étudiés, les secteurs de Mashteuiatsh et Saint-Félicien ont chacun cinq structures, épis ou brise-lames, construits au début du programme. Le secteur de Chambord (Pointe) comprend un seul épi, très court, construit en 2007;
- Au nord du lac, le secteur de Dolbeau-Mistassini se divise en quatre principaux sous-secteurs de stabilité variable. Le segment le plus à l'est (BI 35 à 46) est le plus stable, son dernier rechargement, avant celui de 2014, datant de 2002. La longueur importante du secteur fait en

² L'historique présenté à la figure 2.4 ne présente pas les travaux initiaux, réalisés dans les premières années du PSBLSJ. Cette abstraction permet de mettre en évidence les travaux d'entretien qui ont été requis suite à la mise en œuvre du programme.

sorte que le volume total de rechargement des plages est beaucoup plus important que celui des secteurs dans la portion ouest du lac;

- À l'est du lac, le secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord³ se distingue par l'absence d'ouvrages et deux principaux sous-secteurs en érosion, contrôlés par des rechargements effectués aux 5 à 7 ans dans les douze dernières années. Les volumes de rechargement sont du même ordre que ceux des secteurs dans la portion ouest du lac;
- Le secteur de Saint-Gédéon Sud a été stabilisé au début du programme par un champ d'épis au nord de la BI 27. Ce tronçon de plage est demeuré stable depuis, ne nécessitant que quelques rechargements localisés. Au sud de la BI 27, par contre, la plage connaît depuis 2008 des rechargements fréquents, sur une base quasi annuelle. Les volumes impliqués sont du même ordre que les autres secteurs susmentionnés, à l'exception du secteur de Dolbeau-Mistassini;
- Le secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, très long, a connu au fil des ans de nombreuses interventions. On y dénombre plus de 20 structures, sous forme d'épis, de brise-lames ou de géotubes. Le plus ancien épi date de 1988 et le plus récent de 2014. Outre ces structures, de nombreux rechargements ont été effectués pour stabiliser les plages. À l'ouest du secteur (BI 63 à 36), les plages semblent être stables depuis 2006. Plus à l'est, par contre, les problèmes d'érosion persistent, notamment près de la borne 35, et entre les bornes 2 et 6. Ces deux zones ont fait l'objet de nombreux rechargements ces dernières années et cumulent des volumes importants de rechargement. Les épis implantés récemment, en 2012 et 2014, devraient contribuer à améliorer la situation;
- Finalement, le secteur le plus au sud du lac, Chambord (Domaine du Marais), diffère des autres secteurs par ses volumes de rechargement importants. Stable pendant presque 10 ans, le secteur a toutefois été rechargé en 2014.

Sur la base des points soulignés ci-haut, il ressort que la plupart des plages du lac Saint-Jean qui sont affectées par l'érosion doivent être rechargées minimalement aux 5 à 7 ans. La fréquence de rechargements ces dernières années identifient les secteurs de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, Saint-Gédéon Sud et Dolbeau-Mistassini comme étant les plus sensibles. Leur situation géographique aux deux extrémités du plus long fetch du lac les rend en effet particulièrement vulnérables aux plus fortes vagues de tempêtes.

³ Le secteur de Saint-Henri-de-Taillon est divisé en deux sous-secteurs, Saint-Henri-de-Taillon Nord 1 et Saint-Henri-de-Taillon Nord 2. Ce choix de nomenclature a été effectué lors des travaux de modélisation de l'érosion. Se référer au chapitre 9 pour plus de détails.

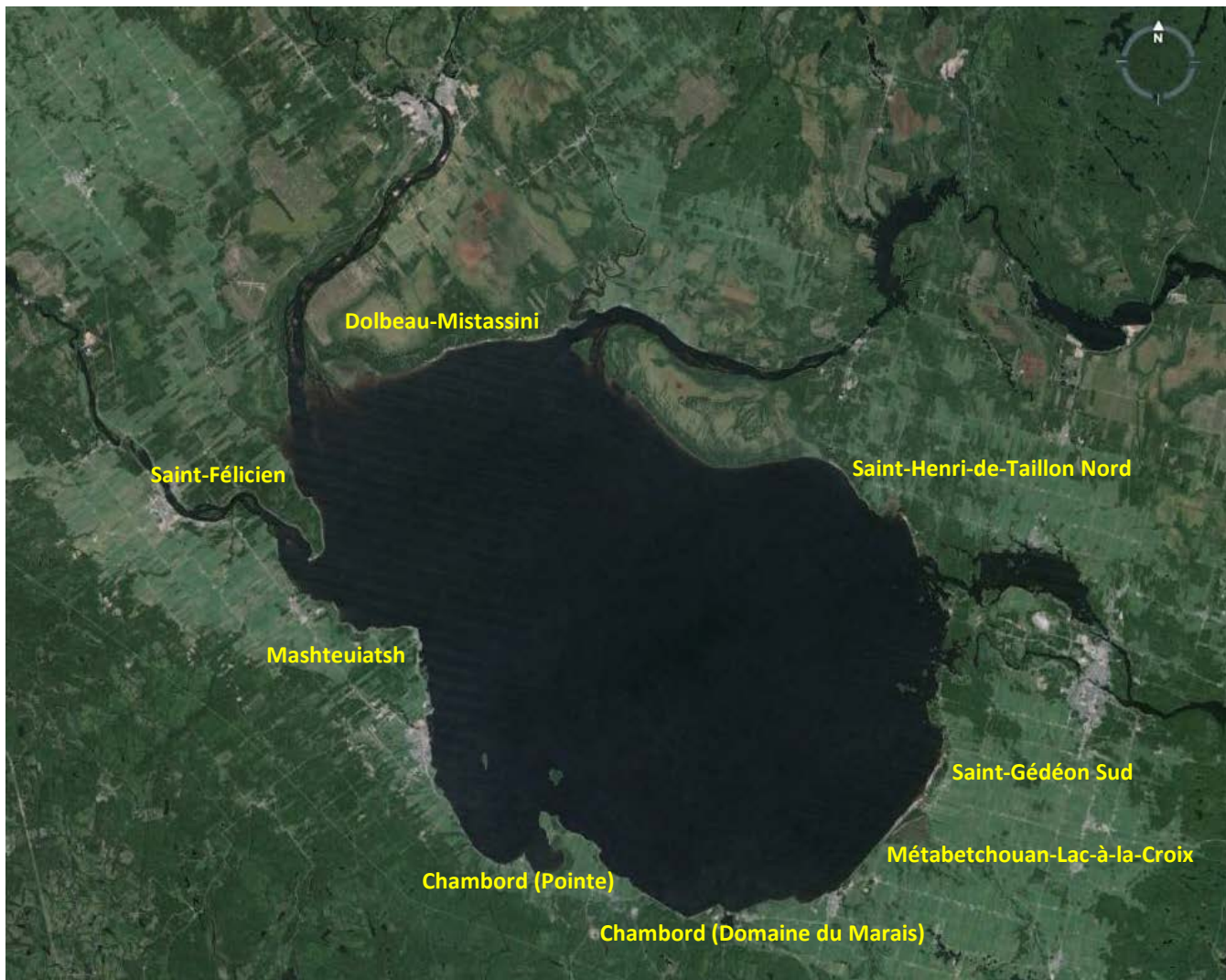


Figure 2.3: Carte de localisation des principaux secteurs étudiés en érosion (*image Google Earth*)

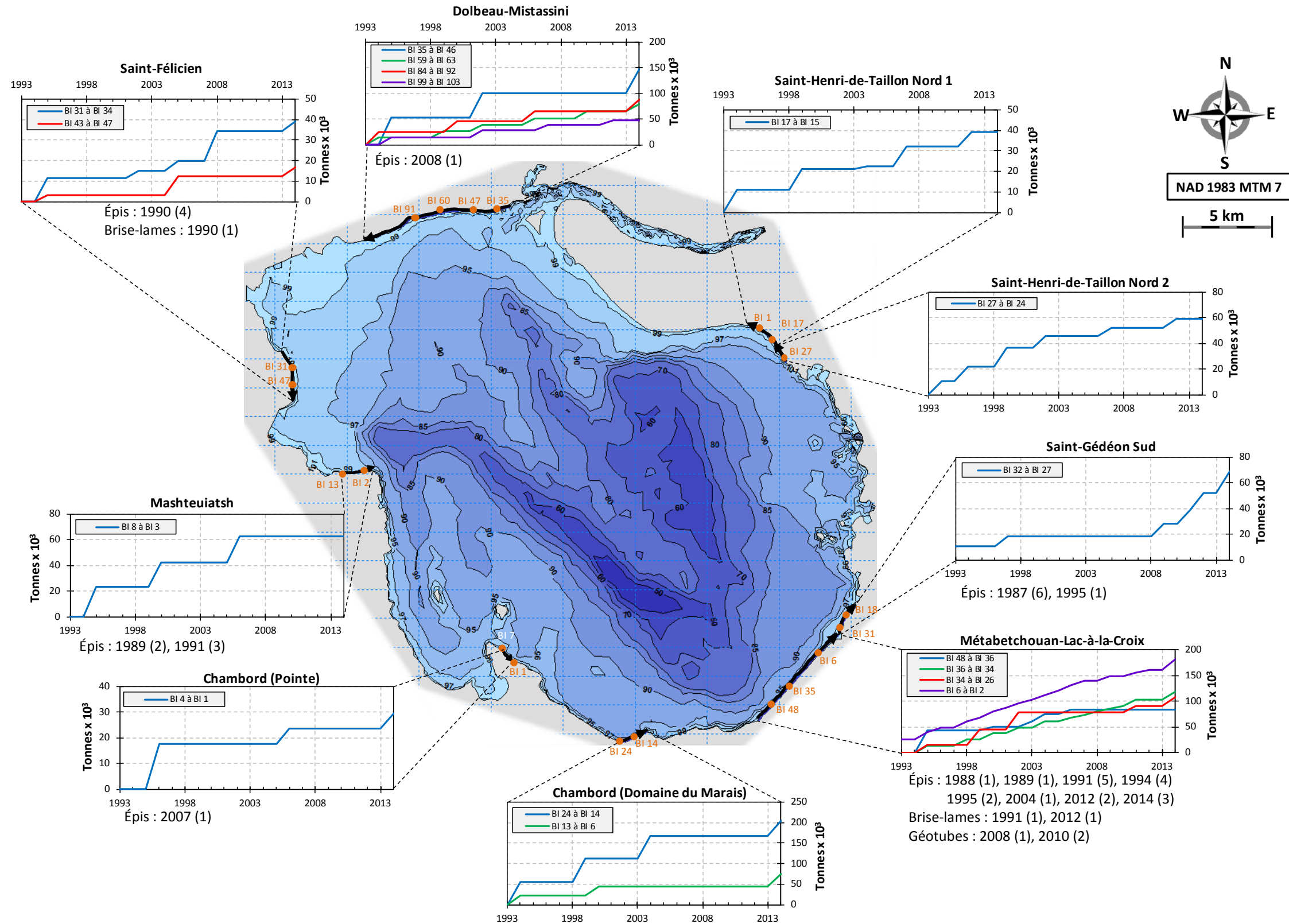


Figure 2.4: Historique des interventions par secteur (1993-2014)

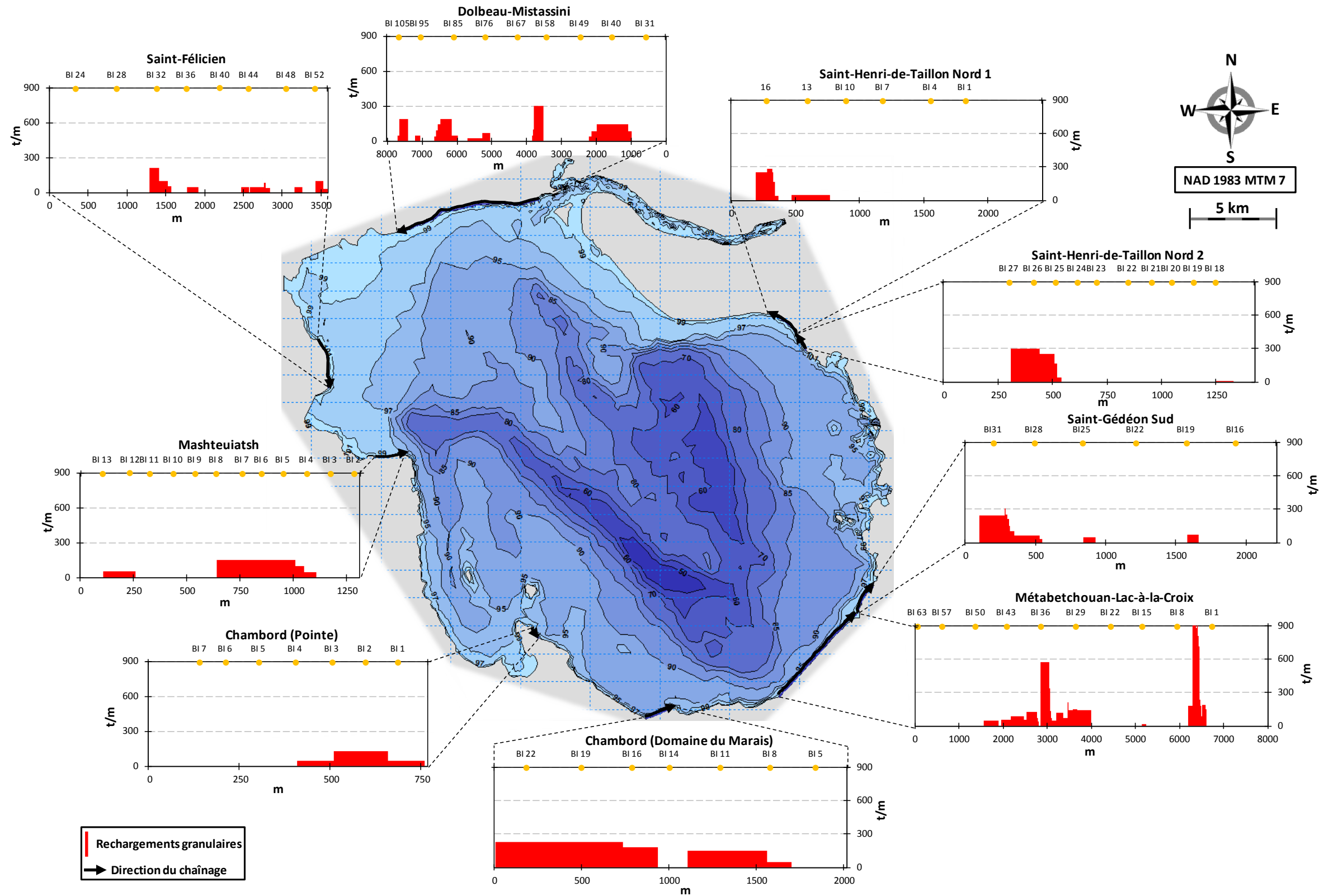


Figure 2.5: Volumes de rechargement le long des secteurs (1993-2014)

2.3 Objectifs de l'étude

En vue de bien préparer les démarches qui mèneront à la définition de la prochaine entente encadrant les travaux de stabilisation et la gestion des niveaux d'eau, Rio Tinto Alcan désire mettre à jour les moyens d'étude et de modélisation mis en œuvre pour quantifier l'érosion des berges.

Au-delà du choix des outils de modélisation, Rio Tinto Alcan se questionne également sur l'impact potentiel des changements climatiques sur les conditions d'érosion des berges du lac Saint-Jean. Il est anticipé que le réchauffement des températures de l'air allongera les périodes d'eau libre. Cette prédiction pourrait s'avérer particulièrement critique en automne car un gel plus tardif du lac rendrait les berges plus vulnérables à l'action érosive des vagues de tempêtes automnales.

Dans ce contexte, les principaux objectifs de la présente étude sont les suivants :

1. Sélection rigoureuse des données de vents utilisées pour la génération des vagues;
2. Analyse des niveaux d'eau historiques;
3. Mise à jour des outils de modélisation numérique permettant d'obtenir une description plus complète des processus en jeu;
4. Modélisation des vagues et de l'érosion des berges à long terme;
5. Évaluation de l'efficacité des interventions futures;
6. Évaluation de l'impact sur les conditions érosives de nouveaux scénarios de gestion des niveaux du lac;
7. Évaluation de l'impact du prolongement de la période d'eau libre sur l'érosion des berges.

3 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Pour répondre aux différents objectifs de l'étude, une analyse détaillée des données disponibles et la mise en œuvre de différents modèles numériques ont été effectuées.

Les mesures et observations historiques de vents, de niveaux d'eau, de températures de l'air et de couverture de glace ont d'abord été analysées pour servir d'intrants à un modèle d'ensemble du lac en conditions actuelles. Calibré sur la base de mesures de niveaux d'eau et de vagues, ce modèle bidimensionnel a ensuite été utilisé pour analyser les surcotes du niveau d'eau dues aux vents et simuler des climats de vagues. Les vagues ont d'abord été générées en conditions historiques (1992-2014) puis en conditions futures (2015-2037).

Pour simuler les conditions futures, les données de vents historiques ont été conservées telles quelles. Les données de niveau d'eau ont toutefois été modifiées pour tenir compte des différents scénarios de gestion du niveau d'eau envisagés par Rio Tinto Alcan, et en considérant les périodes d'eau libre allongées pour refléter l'impact des changements climatiques.

Sur la base des climats de vagues ainsi obtenus, l'érosion à long terme des berges du lac Saint-Jean a été simulée en conditions actuelles et futures. Différents schémas futurs ont été élaborés, en testant successivement les différents scénarios de gestion du niveau d'eau de Rio Tinto Alcan et en simulant pour un même scénario différentes mesures de protection des berges.

Les principales étapes de l'étude sont illustrées sous forme de diagramme à la figure 3.1.

3.1 Données disponibles

Le PSBLSJ a été mis sur pied il y a près de trente ans. Une somme considérable d'informations a donc été accumulée dans les rapports de suivis annuels de même que dans les rapports de synthèse décennaux effectués par Rio Tinto Alcan. Les principales données suivantes ont été passées en revue :

- Données de vent des stations météorologiques de Mistook, Roberval et Normandin (chapitres 4, 7 et 8);
- Données de températures de l'air et documentation visuelle rendant compte des dates de prise et de départ des glaces sur le lac Saint-Jean (chapitre 5);
- Données historiques de niveau d'eau du lac enregistrées aux jauges de Roberval, Saint-Gédéon et St-Henri-de-Taillon (chapitre 7);
- Base de données de Rio Tinto Alcan: importante base de données mise en ligne par Rio Tinto Alcan qui répertorie notamment les lignes de côte arpentées annuellement et les interventions ou ouvrages mis en place pour contrôler ou compenser l'érosion (chapitre 9).

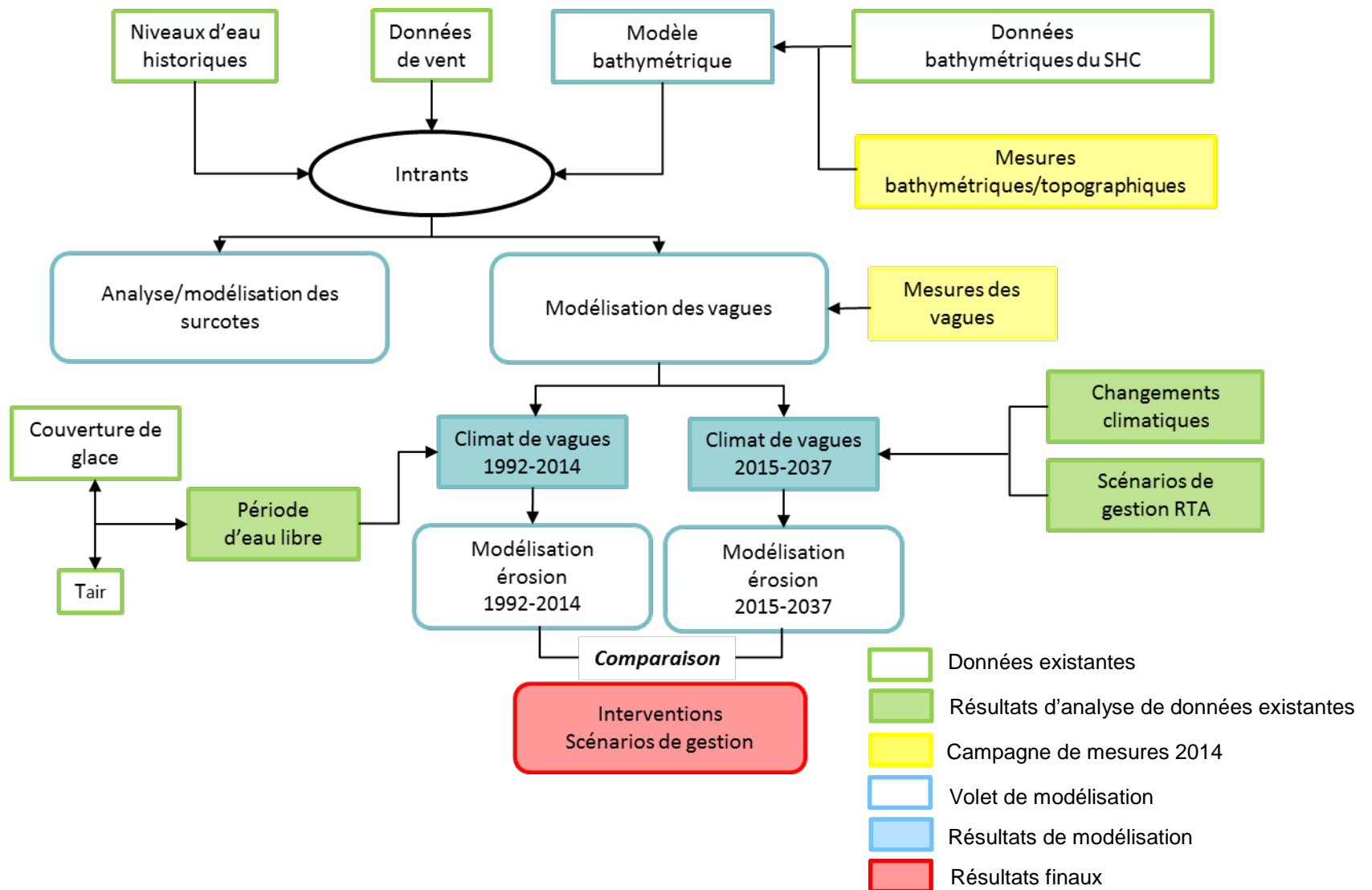


Figure 3.1: Approche méthodologique

3.2 Données recueillies en 2014

Pour compléter les données existantes, deux importantes campagnes de mesures ont été effectuées en 2014 :

1. Relevés bathymétriques et topographiques du pourtour du lac (section 6.1);
2. Mesures de vagues à deux endroits dans le lac Saint-Jean (section 8.1).

3.3 Outils de modélisation

L'ensemble des travaux de modélisation, de même que le montage des modèles numériques de terrain, ont été réalisés à l'aide des divers modules de la suite logicielle MIKE, conçue et commercialisée par la firme danoise *DHI Water & Environment*.

Les divers modules de MIKE permettent une description complète de l'ensemble des processus régissant l'hydrodynamique et le transport sédimentaire en milieu côtier : niveaux d'eau, agitation due aux vagues, courants littoraux, transport sédimentaire en charriage et en suspension, évolution à court et long terme de la morphologie littorale, etc.

Le modèle bidimensionnel MIKE 21 combine l'ensemble des modules requis pour une description détaillée de l'érosion côtière. Toutefois, le besoin d'effectuer des simulations à long terme sur près de 45 km de littoral n'est pas compatible avec l'utilisation de la modélisation bidimensionnelle, qui conduirait dans un tel cas à des temps de mise en œuvre et de calcul clairement excessifs.

Par surcroît, de longs tronçons de plage du lac Saint-Jean montrent un profil relativement uniforme pour lequel la modélisation bidimensionnelle n'est aucunement nécessaire d'un point de vue physique. Il existe pour de telles applications des modèles quasi-stationnaires spécifiquement conçus pour modéliser l'évolution à long terme de la stabilité littorale. Ces modèles, comme Litpack ou son successeur Littoral Process FM, qui font partie de la suite MIKE, permettent des simulations à long terme avec des temps de calculs raisonnables et prennent également en compte l'influence des ouvrages usuels de contrôle de l'érosion : protection de plage, épis, jetées, brise-lames détachés, etc. Un tel outil semble parfaitement adapté à la simulation de l'évolution sédimentaire à long terme des divers sites d'intérêt identifiés par Rio Tinto Alcan.

La modélisation bidimensionnelle demeure toutefois requise pour les sites où d'importantes discontinuités dans le littoral ne permettent pas d'appliquer la modélisation unidimensionnelle. La présence d'ouvrages de géométrie complexe, de dépôts sédimentaires localisés ou d'embouchures de rivières sont tous des exemples de ce type de discontinuités qui nécessitent la mise en œuvre d'une modélisation plus détaillée, utilisant une approche bidimensionnelle. Dans le cas présent, deux secteurs problématiques nécessitant la mise en œuvre d'un modèle bidimensionnel ont été identifiés : l'embouchure de la rivière Belle-Rivière, située entre les secteurs de Saint-Gédéon Sud et de Métabetchouan-lac-à-la-Croix, et Pointe Langevin dans le secteur Dolbeau-Mistassini (se référer aux volumes 2 et 3 du rapport).

Les travaux de modélisation sont donc répartis en cinq principaux volets, qui reposent chacun sur l'un des modules MIKE suivants:

1. MIKE Zero : construction des modèles de terrain (chapitre 6), pré-traitement des données ainsi que post-traitement et présentation des résultats de simulation;
2. MIKE 21 FM HD (*Hydrodynamics*) : modélisation des surcotes dues aux ondes de tempêtes et des courants littoraux générés par les vagues (chapitre 7);
3. MIKE 21 SW (*Spectral Waves*) : génération des vagues par le vent, transformation des vagues à l'approche du littoral, génération des contraintes de radiation produisant les courants littoraux (chapitre 8);
4. LITPACK (ou *Littoral Process FM*) : simulations à long terme du transport longitudinal et de l'érosion dans l'ensemble des sites où les profils de plage montrent une certaine uniformité (chapitre 9);

Les paramètres de modélisation sont décrits plus en détails dans les chapitres du rapport traitant de l'utilisation de chacun de ces modules.

La figure 3.2 présente schématiquement les principaux outils de modélisation.

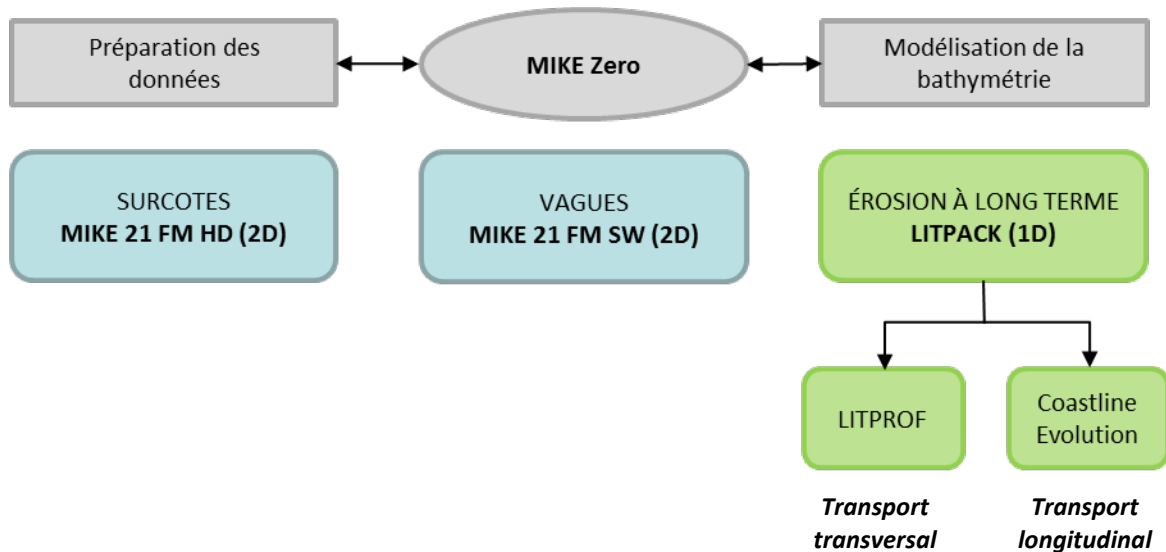


Figure 3.2: Modules de modélisation numérique

4 RÉGIME DES VENTS

Les données de vents disponibles dans la région du lac Saint-Jean ont été analysées en deux volets par la firme CRI, dont les rapports sont également inclus dans le volume 4 du rapport d'étude. Dans un premier temps, les données de vents enregistrées à trois stations météorologiques différentes ont été analysées et comparées dans le but principal de sélectionner la station de mesures la plus représentative des vents sur le lac (réf. [6]). Les données de vents ont ensuite été analysées plus spécifiquement en termes de tempêtes, afin d'établir un index de sévérité et de fréquence permettant de les caractériser (réf. [7]).

Les principaux points ressortant des études de la firme CRI sont résumés aux sections suivantes.

Pour faciliter la compréhension des termes relatifs aux vents dans ce chapitre et dans les suivants, une rose des vents donnant les seize principaux secteurs des directions de vent et leur angle par rapport au nord est illustrée à la figure 4.1. À noter que la direction des vents fait toujours référence à la direction d'où souffle le vent.

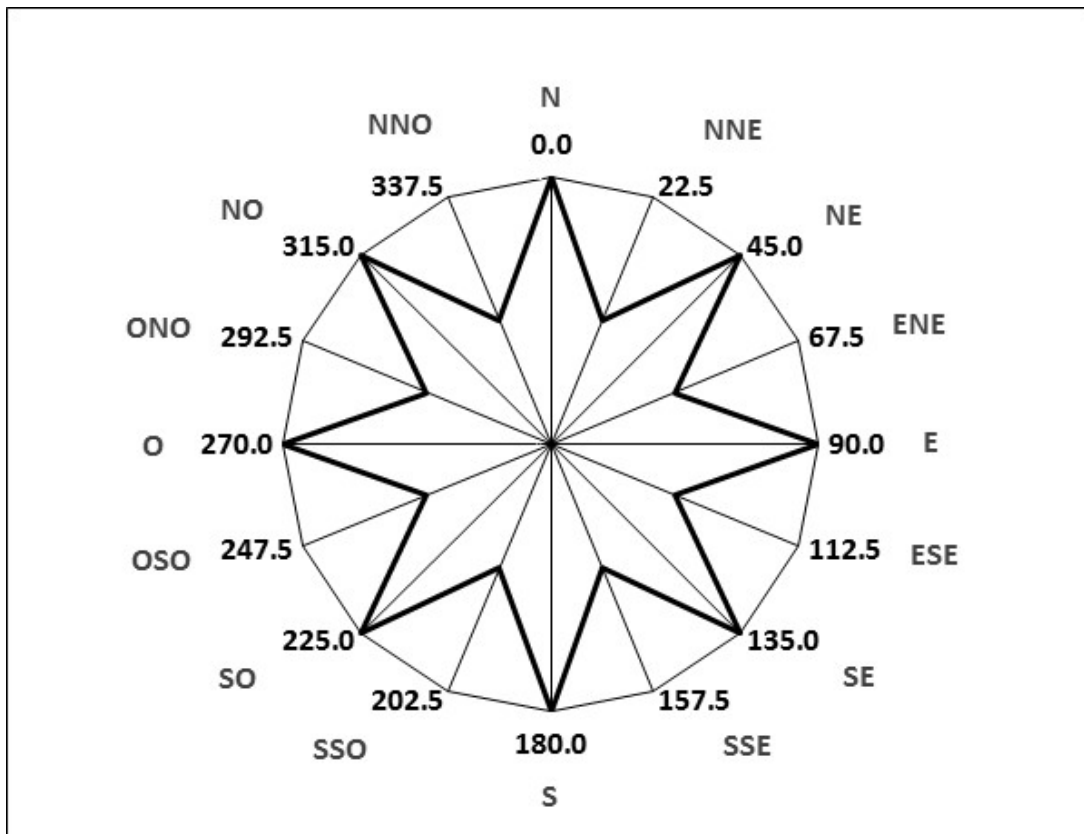


Figure 4.1 : Rose des vents en seize secteurs avec équivalence en degrés

4.1 Volet 1 – Étude des vents

4.1.1 Comparaison des données de vents

Trois stations météorologiques permettent de connaître les vents dans la région du lac Saint-Jean: Roberval, Normandin et Mistook (figure 4.2). La firme CRI a analysé les données historiques enregistrées à chacune de ces stations pour différentes périodes de temps, selon la disponibilité des données. Les roses de vents des trois stations sont illustrées aux figures 4.3 à 4.5 pour la période commune d’enregistrement des données (1994-2014), pour l’année complète et la saison d’eau libre.

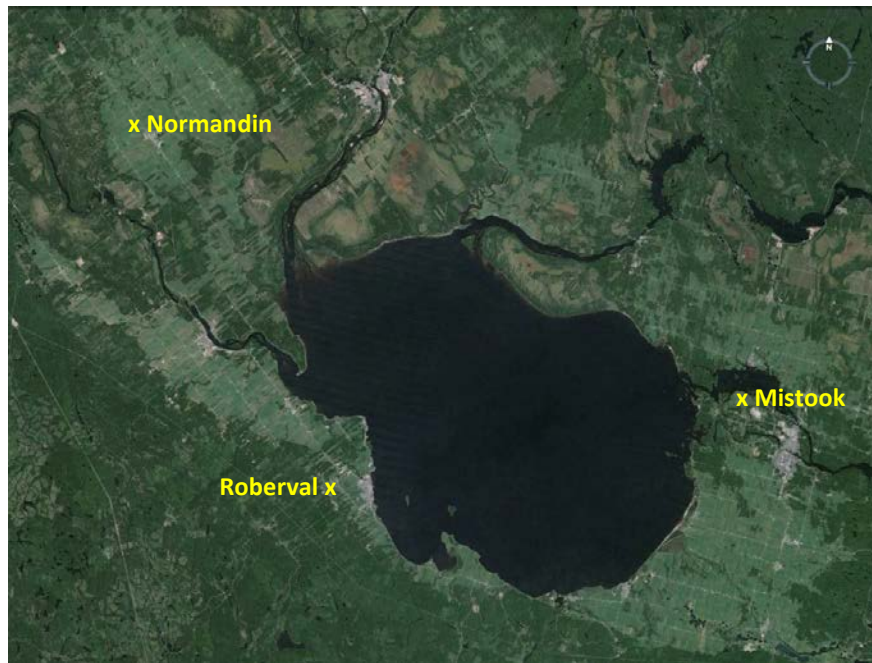
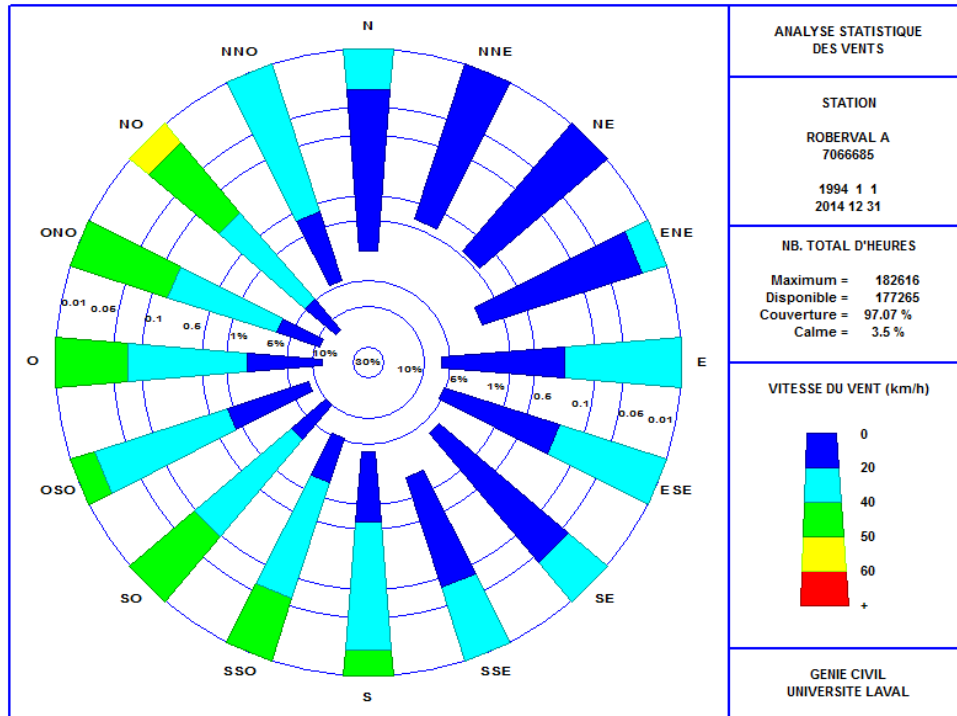


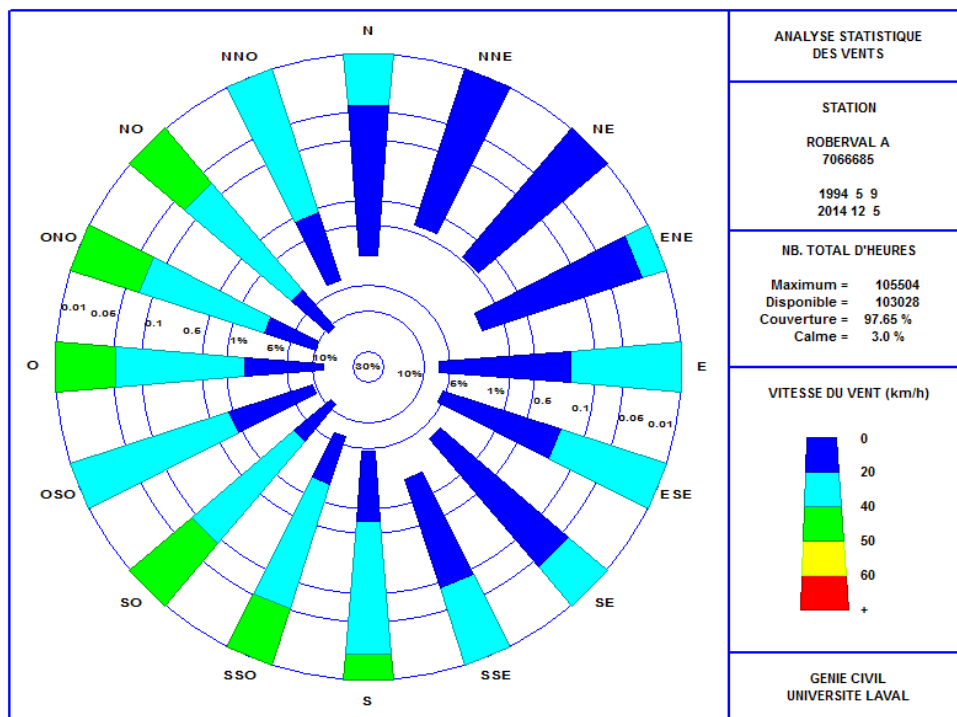
Figure 4.2: Localisation des stations météorologiques dans le secteur à l’étude

En ce qui concerne les directions de vent, les stations de Roberval et de Normandin montrent une nette dominance des vents d’ouest alors que la station de Mistook montre un équilibre entre les vents d’ouest et d’est-sud-est. Pour les vitesses en période d’eau libre, les stations de Normandin et de Roberval sont relativement similaires, alors que la station de Mistook donne des vents un peu plus forts.

En termes de régime général des vents, la station de Mistook se démarque des deux autres stations, tant au niveau de l’intensité que de la direction des vents.

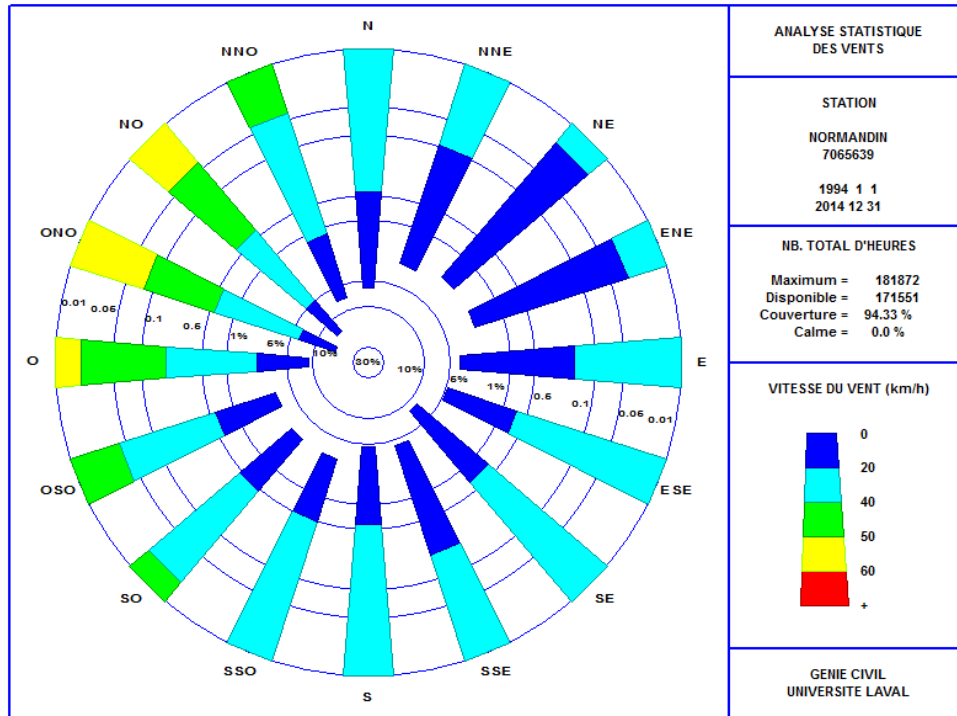


a) Année complète

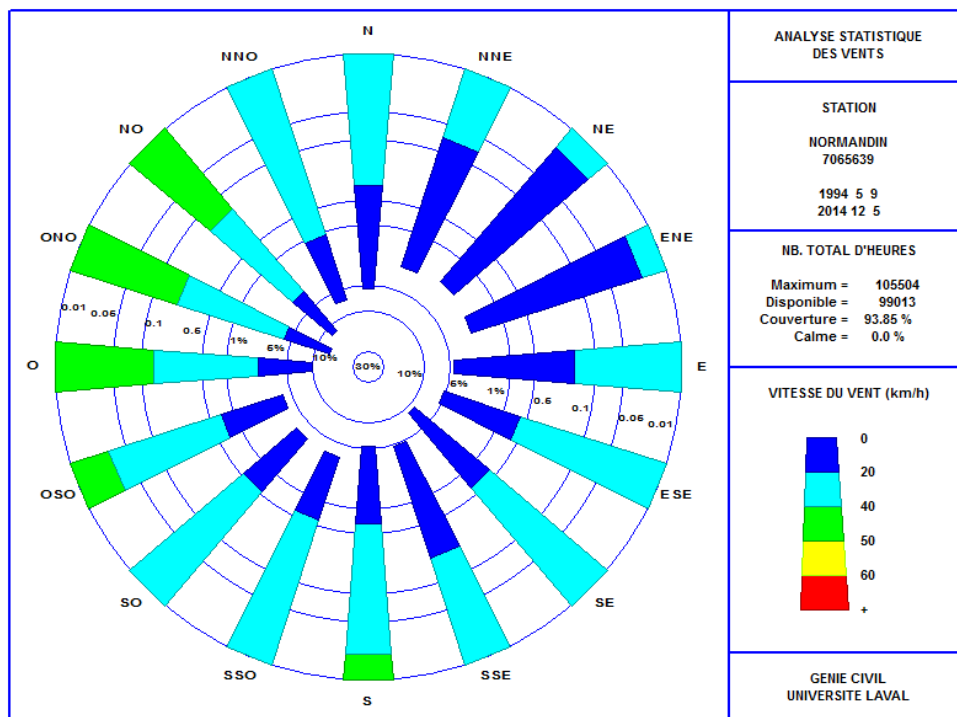


b) Saison d'eau libre

Figure 4.3: Rose des vents de la station de Roberval (1994-2014)

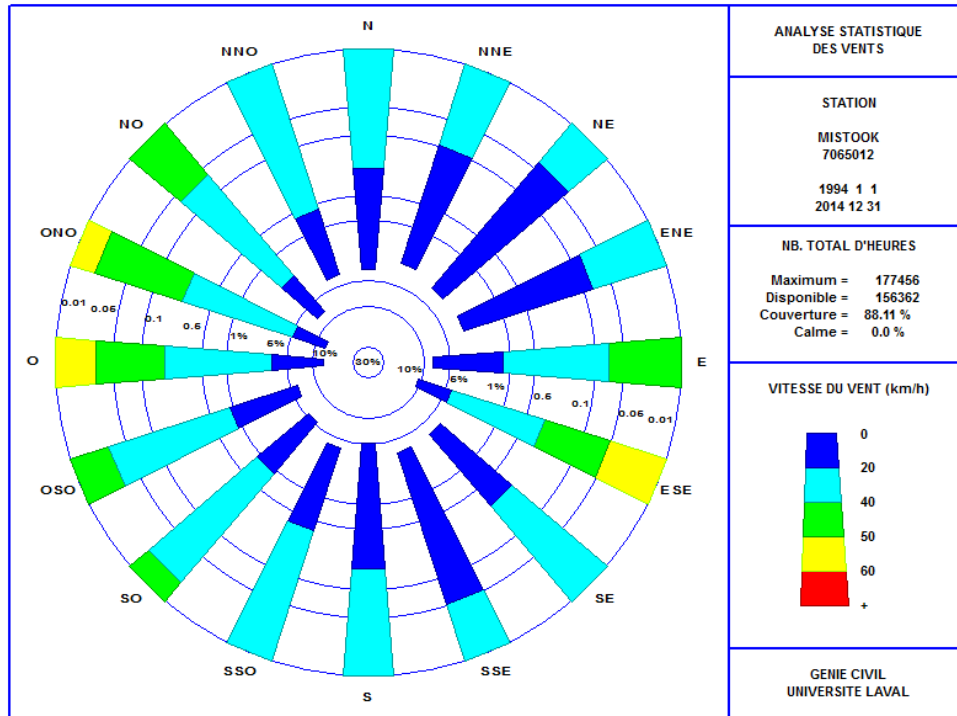


a) Année complète

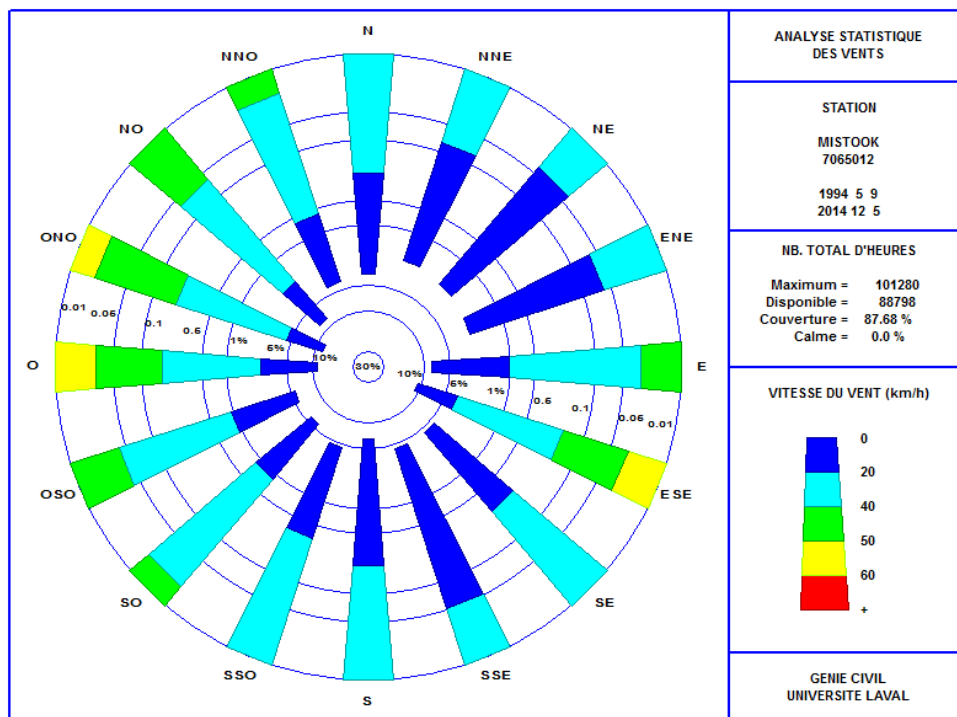


b) Saison d'eau libre

Figure 4.4: Rose des vents de la station de Normandin (1994-2014)



a) Année complète



b) Saison d'eau libre

Figure 4.5: Rose des vents de la station de Mistook (1994-2014)

4.1.2 Comparaison des données synchrones de vents

La représentativité d'une station météorologique par rapport à une région est souvent problématique car de nombreux phénomènes se produisent à une échelle très locale. Le fait de chercher à représenter des vents soufflant sur un plan d'eau comme le lac Saint-Jean à partir de données de stations terrestres augmente encore plus le niveau de difficulté.

La comparaison des données synchrones (i.e. enregistrées en même temps) de vent a été réalisée par la firme CRI sur l'ensemble des trois stations météorologiques, en analysant les stations par paires. Les vitesses et directions de vent ont été comparées en triant les données selon différents seuils de vitesses du vent, soit 20, 30 et 40 km/h.

Dans tous les cas, cet exercice a montré que les vitesses de vent entre chaque paire de stations présentaient de grandes divergences et peu de corrélation. Les directions de vent étaient mieux corrélées, mais comportaient une dispersion importante.

À un instant donné, les vents diffèrent substantiellement d'une extrémité à l'autre du lac.

4.1.3 Analyse préliminaire des tempêtes

Les tempêtes enregistrées aux trois stations météorologiques depuis 2005 ont été analysées afin d'examiner les tendances récentes et d'isoler des événements requis dans la modélisation des vagues. Les principaux points suivants sont soulignés :

- Les tempêtes présentant les vents les plus violents se produisent généralement à l'automne, plus particulièrement en novembre;
- Le secteur dominant des vents lors des tempêtes automnales est l'ouest.
- Les vitesses maximales enregistrées par les trois stations météorologiques lors des tempêtes d'ouest sont très similaires. La station de Roberval indique des vitesses maximales inférieures d'environ 10%. Par secteur d'est, les vents de Mistook sont systématiquement plus forts qu'aux autres stations (voir figures 4.3 à 4.5);
- Les tempêtes des secteurs nord et sud sont beaucoup plus rares que celles des secteurs est et ouest. Une seule tempête en provenance du secteur nord et cinq tempêtes du secteur sud ont été répertoriées entre 2005 et 2014. Ces tempêtes sont non seulement plus rares, mais beaucoup plus courtes, ne durant typiquement que quelques heures.

4.1.4 Choix final de la station météorologique aux fins de modélisation

Sur la base de son analyse des données de vents, la firme CRI considère la station de Mistook comme étant la plus susceptible de donner des informations cohérentes par rapport aux tempêtes réelles sur le lac Saint-Jean. La situation géographique et topographique de cette station la rend plus pertinente que les autres stations.

Il est également recommandé d'appliquer un facteur de recalage variant de 1,05 à 1,1 pour tenir compte de la situation terrestre de la station et de la distance la séparant du lac.

Le choix final des données de vent et de leur facteur de recalage a été déterminé par le calibrage des modèles numériques simulant dans un premier lieu les variations du niveau d'eau (chapitre 7) et dans un deuxième temps la génération et la transformation des vagues par le vent (chapitre 8).

4.2 Volet 2 – Étude des tempêtes

Les données de vent enregistrées à Mistook, la station de référence identifiée dans le premier volet d'étude de CRI, ont fait l'objet d'une analyse plus approfondie afin de pouvoir caractériser les tempêtes sévissant sur le lac en termes de durée, d'intensité et de sévérité.

Pour sélectionner les épisodes de tempêtes, la firme CRI a établi des critères basés sur une vitesse minimale de vent et une permanence de la direction du vent. Pour constituer un épisode de tempête, les données de vents devaient présenter les paramètres suivants :

- (1) Vitesse de vent supérieure à 30 km/h⁴ pendant au moins trois de douze heures consécutives, sans tomber en-deçà de 20 km/h entre deux vitesses à 30 km/h, ou (2) supérieure à 40 km/h pendant au moins deux de six heures consécutives sans tomber en-deçà de 20 km/h entre deux vitesses de 30 km/h⁵;
- Variation maximale de direction de 60 degrés entre les deux extrêmes.

La base de données de tempêtes ainsi créée a permis à la firme CRI d'établir des index d'intensité et de sévérité de tempêtes et de compléter des analyses statistiques de récurrence pour fournir des outils précieux de communication à Rio Tinto Alcan. À titre d'exemple, la tempête du 23 au 26 novembre 2013, qui a causé des dommages importants à Saint-Gédéon Sud, a un index de sévérité qui lui donne une récurrence d'environ 10 ans.

⁴ Des tests de sensibilité avec une vitesse limite de 28 km/h ont également été réalisés pour vérifier la qualité de l'homogénéité des résultats.

⁵ Jusqu'à maintenant, une tempête était définie dans le PSBLSJ comme étant un épisode de vents d'au moins 6 heures avec une vitesse d'au moins 30 km/h. La définition adoptée par la firme CRI est moins limitative et permet d'inclure des épisodes connaissant une variation d'intensité de courte durée.

5 CHANGEMENTS CLIMATIQUES

L'érosion des berges du lac Saint-Jean est principalement causée par les vagues de tempêtes ayant lieu lorsque le niveau d'eau est élevé. Comme il est difficile de prédire des changements dans le régime des vents d'une région aussi petite en conditions futures, il a été décidé d'évaluer l'impact des changements climatiques sur l'érosion des berges par le biais des périodes d'eau libre. Celles-ci jouent en effet un rôle important puisqu'elles déterminent les périodes pendant lesquelles les vagues de tempêtes peuvent attaquer directement les berges. L'analyse des changements climatiques s'est donc concentrée sur les températures de l'air, à partir desquelles il est possible d'estimer les périodes d'eau libre.

Cette portion de l'étude a été réalisée en collaboration avec M. Jean-Pierre Savard, océanographe de formation et chercheur depuis plusieurs années au sein d'Ouranos, un consortium de recherches sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques.

5.1 Approche méthodologique

Dans un premier temps, les observations disponibles ayant trait à l'état du couvert de glace au début et à la fin de l'hiver ont été passées en revue pour déterminer les périodes d'eau libre des dernières années.

Pour chacune de ces années, le nombre de degré-jours de gel et de réchauffement cumulé en date de formation puis du départ des glaces a été calculé à l'aide des températures de l'air enregistrées quotidiennement à la station météorologique de Roberval. La moyenne interannuelle de ces valeurs a ensuite été utilisée pour cibler les dates de début et de fin d'eau libre de différentes séries de températures de l'air, issues de mesures ou de simulations climatiques.

Cette approche a permis d'examiner le climat actuel du lac Saint-Jean, tel que défini par des températures de l'air mesurées et provenant de ré-analyses, puis de déterminer l'ampleur des changements climatiques en comparant les données de seize simulations climatiques du climat passé (1961-2000) puis futur (2041-2070). L'approche méthodologique suivie dans l'analyse des changements climatiques est illustrée schématiquement à la figure 5.1.

5.2 Statistiques en changements climatiques

L'étude des changements climatiques fait usage de données statistiques pour quantifier le signal du changement ainsi que la probabilité que ce changement se produise. Les principaux termes statistiques utilisés dans ce rapport se définissent comme suit :

- Médiane : la médiane divise un ensemble de données en deux parties égales. Elle est généralement utilisée pour caractériser l'ampleur du signal des changements climatiques. Pour les distributions asymétriques, elle est une meilleure mesure de la tendance centrale que la moyenne arithmétique;

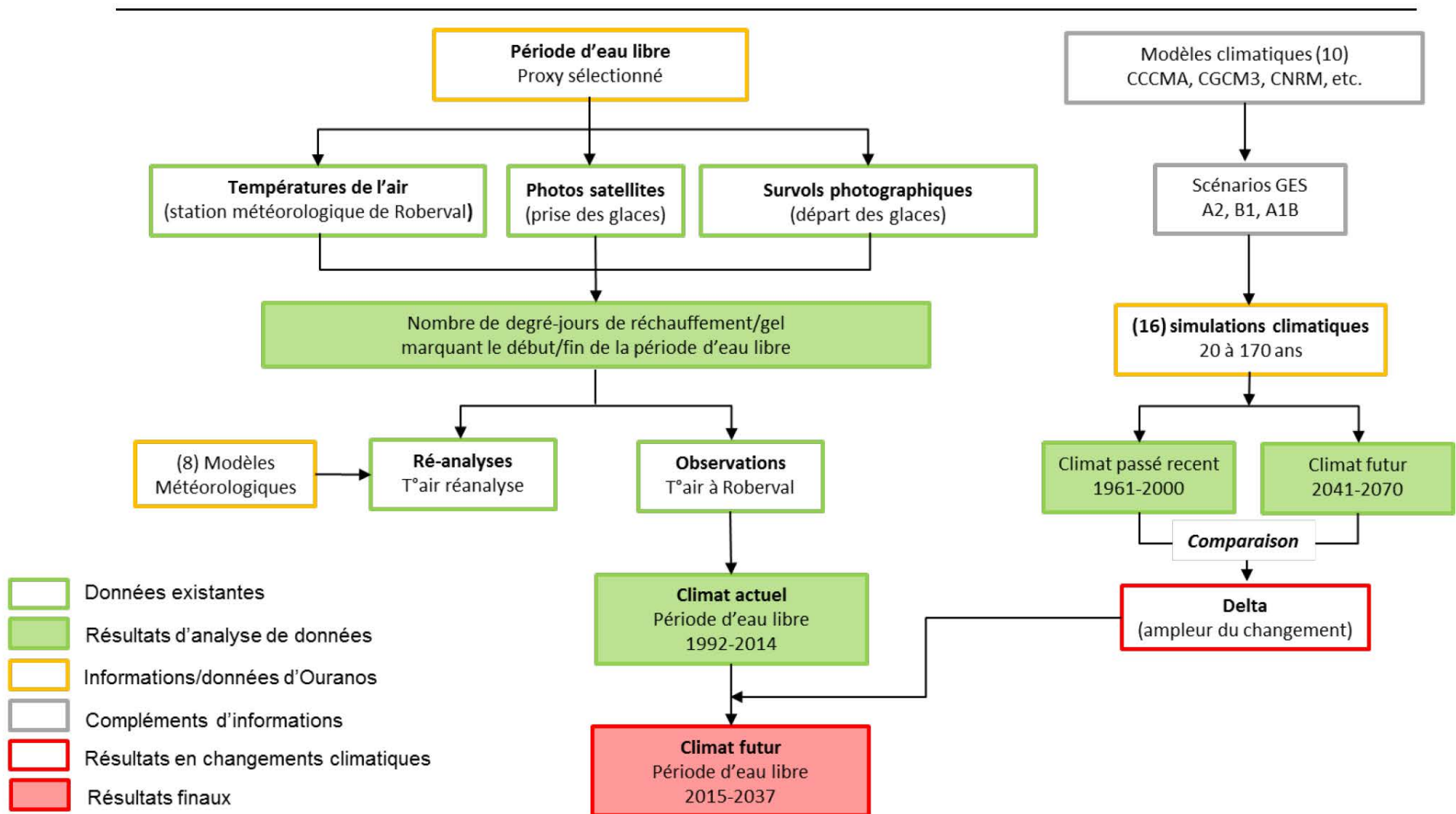


Figure 5.1: Approche méthodologique dans l'analyse des changements climatiques

- Premier quartile : le premier quartile (Q_1) est la valeur d'une série de données telle qu'au moins 25% des données sont inférieures ou égales à Q_1 ;
- Troisième quartile : le troisième quartile (Q_3) est la valeur d'une série de données telle qu'au moins 75% des données sont inférieures ou égales à Q_3 ;
- Écart interquartile : l'écart interquartile est une mesure de la dispersion des données obtenue en calculant la différence entre le troisième et le premier quartile ($Q_3 - Q_1$). L'écart interquartile couvre 50% d'un ensemble de données et élimine l'influence de 25% des valeurs les plus faibles et de 25% des valeurs les plus fortes. Il est généralement utilisé pour exprimer la variabilité de la médiane.
- 10^e centile : le 10^e centile est la valeur qui sépare une série de données entre les 10% inférieurs et le reste des données;
- 90^e centile : le 90^e centile est la valeur qui sépare une série de données entre les 90% inférieurs et le reste des données.

De façon générale, la médiane et l'écart interquartile permettent de définir l'ampleur et la variabilité d'un scénario probable, tandis que les 10^e et 90^e centiles sont utilisés pour définir des scénarios optimistes et pessimistes.

5.3 Indicateur de changement climatique

Un indicateur de changement climatique, ou proxy, est un paramètre associé à un phénomène physique choisi pour qualifier et quantifier le signal du changement. Tel que mentionné précédemment, la période d'eau libre, déterminée sur la base des températures de l'air, a été sélectionnée comme proxy dans le cadre de la présente étude.

La période d'eau libre est déterminée à chaque année par le nombre de jours séparant la date du départ des glaces au printemps et la date de prise des glaces à la fin de l'automne. Ces deux dates varient d'une année à l'autre en fonction des conditions météorologiques : température de l'air, température de l'eau, couverture neigeuse, ensoleillement, vents, précipitations, etc. Les différents phénomènes qui régissent la prise et le départ des glaces sont complexes et leur analyse dépasse largement le cadre de cette étude. Bien que la température de l'air ne soit pas seule responsable de l'apparition et de la disparition des glaces sur les lacs, elle demeure un bon indicateur en l'absence d'autres données.

À partir de séries temporelles de températures de l'air, les deux variables suivantes ont été calculées:

- Degré-jours de gel : nombre de degrés cumulés en-dessous de 0°C suite à la première occurrence de températures négatives à l'automne. Par exemple, deux journées consécutives de -5°C correspondent à -10°C-jours de gel, tout comme deux journées consécutives de -1°C et -9°C;

- Degré-jours de réchauffement : nombre de degrés cumulés au-dessus de 0°C après la première occurrence de températures positives au printemps. Ainsi, trois journées de 2°C, 5°C et 3°C et une journée à 10°C cumulent dans les deux cas 10°C-jours de réchauffement.

Des observations visuelles du couvert de glace, lorsqu'elles sont datées, permettent ensuite de corrélérer le nombre de degré-jours de gel/réchauffement à l'état du couvert de glace.

À noter que les légers redoux à l'automne et les petites périodes de gel au printemps ont été comptabilisées dans le calcul des degré-jours. L'impact de cette approche a été vérifié et affecte peu les résultats dans leur ensemble.

5.4 Détermination du proxy

5.4.1 Prise des glaces

Pour la prise des glaces, aucune observation visuelle directe du couvert n'était disponible. Des images du satellite MODIS de la NASA ont donc été utilisées. Ce satellite passe au-dessus du lac Saint-Jean deux fois par jour et offre une résolution de 250 m/pixel, ce qui est suffisant pour avoir une image claire de l'état du couvert de glace, lorsque la couverture nuageuse le permet. Les images-satellites prises entre 2004 et 2014, à l'exception de 2007 et 2011, ont été fournies par Rio Tinto Alcan puis analysées visuellement par Lasalle|NHC pour déterminer les dates de prise des glaces de chaque année. L'ensemble des images fournies est réuni à l'annexe A du présent document.

La formation du couvert de glace dans le lac Saint-Jean se fait progressivement. Avec l'arrivée des températures plus froides, la glace de rive se forme d'abord dans les petites baies, peu profondes. Cette glace est peu épaisse et disparaît facilement lors d'épisodes de redoux ou de vents plus forts. Il faut généralement attendre plusieurs semaines avant la formation complète du couvert de glace.

Malgré la présence de glace de rive en début d'hiver, les vents peuvent générer des vagues sur les portions en eau libre du lac et peuvent même morceler un couvert de glace mince formé au préalable par temps calme (réf. [8]). Lors d'épisodes de tempêtes, les vagues atteignent les berges, brisent la glace et peuvent causer des dommages importants. Plus tard, lorsque le couvert de glace recouvre une plus grande portion du lac, la génération de vagues est minimisée et on peut considérer que les berges sont protégées de l'action directe des vagues. L'état du couvert de glace qui offre une protection contre l'érosion est donc un stade intermédiaire entre l'apparition de la glace de rive et le gel complet du couvert de glace.

En l'absence d'observations plus détaillées, la fin de la période d'eau libre a été déterminée comme étant un moment intermédiaire, défini par la moyenne des degré-jours de gel correspondant à l'apparition de la glace de rive puis au gel complet du couvert de glace. La figure 5.2 montre un exemple de cette approche pour l'année 2008.

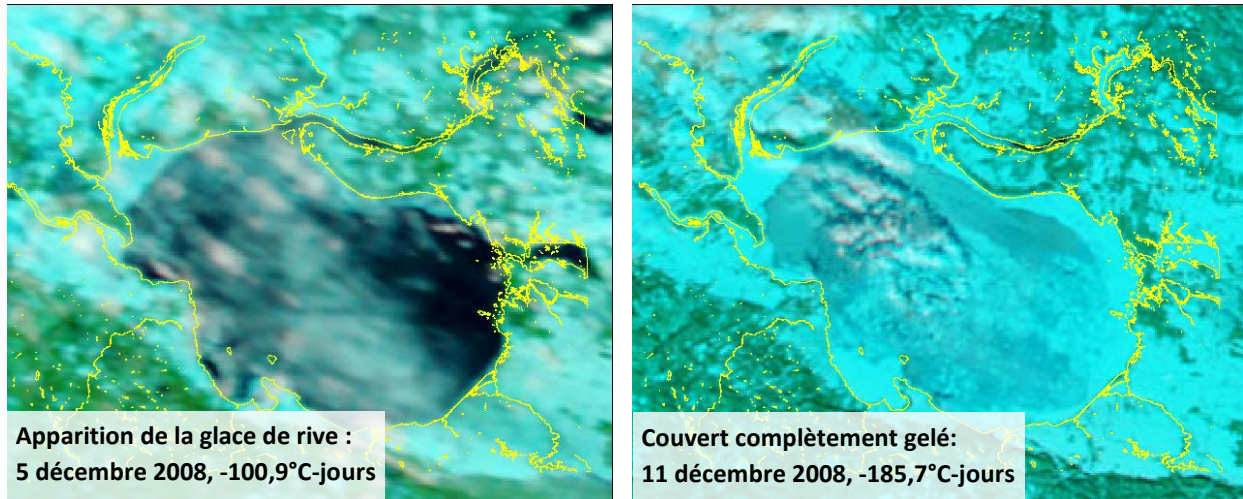


Figure 5.2: Images satellites du lac Saint-Jean en 2008

Dans les images présentées à la figure 5.2, l'apparition du couvert de glace survient le 5 décembre, lorsque les températures de l'air ont cumulé -100,9°C-jours de gel. Il faut ensuite attendre 6 jours, lorsque les températures de l'air ont cumulé -185,7°C-jours de gel, avant que le lac ne soit complètement gelé. Pour 2008, la fin de la période d'eau libre correspond donc à -144,3°C-jours de gel.

Le tableau 5.1 énumère pour chaque année le nombre de degré-jours de gel correspondant à l'apparition de la glace, le gel complet du couvert de glace et la valeur moyenne entre les deux.

En moyenne, le couvert de glace protège les rives lorsque les températures de l'air atteignent -151,4°C-jours de gel, avec un écart-type de 13,2. Cette faible variabilité indique que l'utilisation du nombre de degré-jours de gel pour caractériser la prise des glaces n'est pas assorti d'une grande d'incertitude. Ce résultat est d'autant plus intéressant qu'une source d'incertitude non-négligeable à considérer est la disponibilité des images satellites. En effet, à cause des nuages, il est fréquent d'avoir plusieurs journées consécutives où il est impossible de visualiser l'état du couvert de glace.

5.4.2 Départ des glaces

Entre 1916 et 1986, la date de départ des glaces au printemps a été notée dans la région de Roberval par des résidents du lac⁶. Depuis 1986, la date du départ des glaces est déterminée plus rigoureusement, par des survols du lac. Lorsqu'environ 70% du couvert de glace est fondu, le lac est considéré comme étant libre de glace. Les dates observées et les séries journalières de températures de l'air enregistrées à Roberval entre 1986 et 2014 ont donc été utilisées pour calculer le nombre moyen de degré-jours de réchauffement correspondant au départ des glaces (tableau 5.2).

⁶ M. Israël Dumais de Roberval et M. Adrien Boivin d'Alma. Information transmise par Rio Tinto Alcan.

Tableau 5.1: Nombre de degré-jours de gel à la prise des glaces (°C-jours)

Année*	État du couvert		Moyenne
	Glace de rive	Gel complet	
2004	-103,3	-219,0	-161,2
2005	-63,9	-213,4	-138,7
2006	-101,0	-201,7	-151,4
2008	-100,9	-185,7	-143,3
2009	-95,3	-186,0	-140,7
2010	-106,3	-217,1	-161,7
2012	-69,5	-174,1	-121,8
2013	-108,8	-205,1	-157,0
2014	-115,5	-200,0	-157,8
		Médiane:	-151,4
		Écart-type:	13,2

*Note: les années 2007 et 2011 sont manquantes

Tableau 5.2: Nombre de degré-jours de réchauffement au départ des glaces (°C-jours)

Année	JJ-MM	°C-jours	Année	JJ-MM	°C-jours
1986	02-mai	188,1	2001	09-mai	232,9
1987	21-avr	253,0	2002	01-mai	83,5
1988	05-mai	157,4	2003	13-mai	138,7
1989	13-mai	175,9	2004	12-mai	118,9
1990	09-mai	204,0	2005	08-mai	194,2
1991	07-mai	181,1	2006	26-avr	138,7
1992	15-mai	209,8	2007	08-mai	190,0
1993	10-mai	267,3	2008	07-mai	187,9
1994	21-mai	232,8	2009	03-mai	149,8
1995	14-mai	153,0	2010	22-avr	146,7
1996	12-mai	153,9	2011	12-mai	136,3
1997	07-mai	88,6	2012	18-avr	108,2
1998	03-mai	177,4	2013	06-mai	188,0
1999	08-mai	247,4	2014	12-mai	139,8
2000	07-mai	136,9			
		Médiane:	175,9	Écart-type:	47,2

D'après les données compilées au tableau 5.2, le départ des glaces a lieu de façon médiane lorsque les températures de l'air cumulent 175,9°C-jours de réchauffement au lac Saint-Jean. L'écart-type des données est de l'ordre de 47,2°C-jours, ce qui témoigne d'une grande variabilité. Le départ le plus hâtif se produit en 2002 à 83,5°C-jours de réchauffement, et le plus tardif en 1993, à 267,3°C-jours de réchauffement. Cette grande variabilité s'explique probablement par les mécanismes de départ des glaces au printemps, qui font intervenir plusieurs phénomènes mécaniques et thermiques. Outre la température de l'air, le rayonnement solaire, l'albédo de la glace, l'épaisseur de la neige, la fonte de la neige, les précipitations, les vents et la température de l'eau jouent tous un rôle dans la fonte du couvert de glace. La complexité des phénomènes en jeu et de leurs interactions fait en sorte que la relation entre la température de l'air et l'état du couvert de glace n'est pas aussi bien définie qu'à l'automne, où moins de phénomènes interviennent.

5.5 Observations et données de ré-analyses en conditions actuelles

Pour simplifier les analyses subséquentes, les valeurs médianes de degré-jours de gel et de réchauffement calculés à la section précédente ont été arrondies respectivement à -150°C-jours de gel et 175°C-jours de réchauffement.

Bien que la banque de données des températures de l'air quotidiennes enregistrées à la station météorologique de Roberval soit pratiquement complète pour la période examinée (1,3% de données manquantes), celle-ci a d'abord été comparée à plusieurs ré-analyses. Cet exercice avait pour but de déterminer si les données enregistrées à la station de Roberval étaient comparables à des données provenant de modèles météorologiques. La variance et les biais systématiques entre les données de modèles et les données de stations peuvent ainsi être évalués.

Il est en effet de pratique courante dans l'étude des changements climatiques de comparer les données observées dans le secteur à l'étude avec des données de ré-analyses. Les ré-analyses sont produites à l'aide d'un modèle de prévision météorologique qui assimile les observations de stations météorologiques et de satellites (depuis 1979) pour produire des archives d'un grand nombre de variables atmosphériques et océaniques. Les ré-analyses sont fort utiles lorsque la variable étudiée n'est pas mesurée directement ou lorsque les séries de mesures sont incomplètes. Elles fournissent aussi des valeurs moyennes pour la surface d'une tuile de la grille du modèle utilisé alors qu'une station météorologique fournit les données en un point. La dimension spatiale de la grille dépend du modèle utilisé et se situe entre 32 km et 210 km de côté (voir tableau 5.3).

Mêmes si les ré-analyses intègrent des données observées et bien qu'elles dressent un portrait du climat actuel, elles peuvent présenter des différences notables selon les bases de données, la résolution des grilles et les schémas de calculs utilisés. La température de l'air à 2 m de la surface mesurée à une station est un point très localisé dans l'espace. La température de l'air à 2 m de la surface de la grille d'un modèle correspond à la température moyenne calculée par le modèle pour l'ensemble de la surface de la tuile à l'altitude moyenne de cette tuile. Donc, il peut y avoir une différence systématique entre ces deux manières d'exprimer la température de l'air.

Les températures de l'air quotidiennes prédites à 2 m du sol provenant de huit ré-analyses différentes ont été fournies par Ouranos. Elles ont ensuite été analysées et comparées à deux séries de mesures : les données mesurées à la station météorologique de Roberval, et les données interpolées provenant de différentes stations météorologiques locales de Ressources naturelles Canada (NRCAN). Le tableau 5.3 donne le détail de chacune de ces sources de données, et la figure 5.3 illustre leur localisation. À noter que la résolution spatiale horizontale des modèles de ré-analyses indiquée dans le tableau 5.3 est approximative, celle-ci étant parfois donnée en degrés dans la documentation disponible.

La période de données commune au plus grand nombre de sources de données est 1979-2010. Pour cette raison, les ré-analyses ERA-40 listées au tableau 5.3, prenant fin en 2002, n'ont pas été utilisées.

Pour chaque source de donnée, les températures quotidiennes de l'air ont été converties en degré-jours de gel à l'automne et en degré-jours de réchauffement au printemps. Les dates correspondant à -150°C-jours de gel et 175°C-jours de réchauffement ont ensuite été identifiées puis extraites pour former deux séries temporelles : année/date de prise des glaces et année/date de départ des glaces.

5.5.1 Prise des glaces

Le graphique de la figure 5.4 donne la probabilité de non-dépassement de la date de la prise des glaces pour les différentes séries de données étudiées. Pour une date donnée, le pourcentage lu sur la courbe correspond à la probabilité que cette date ne soit pas dépassée. Par exemple, selon les données mesurées à Roberval, la date de prise des glaces sur le lac Saint-Jean survient avant le 13 décembre dans 75% des cas. La médiane à Roberval correspond au 10 décembre, ce qui signifie que dans la moitié des cas, la glace se forme avant le 10 décembre, et dans l'autre moitié, après le 10 décembre.

L'examen des courbes de la figure 5.4 montre clairement que trois ré-analyses ont un biais froid, c'est-à-dire qu'elles prédisent un gel hâtif du couvert de glace (ERA20C, Ré-analyses 2 et 20CR). La résolution de la grille spatiale de ces trois ré-analyses est probablement à l'origine de ce résultat (voir tableau 5.2). Comme le niveau topographique est moyenné sur chaque élément de grille, et que ces trois ré-analyses ont une grille plus grossière que les autres, elles projettent les résultats à une élévation plus élevée, ce qui se traduit par des températures de l'air plus froides. Les centroïdes du point de grille de ces trois ré-analyses sont aussi les plus éloignés du centre du Lac (voir figure 5.3).

Les courbes de fréquence de dépassement illustrées à la figure 5.4 ont sensiblement toutes la même forme et sont parallèles les unes par rapport aux autres, ce qui indique une distribution des fréquences de dépassement comparable d'une série de ré-analyses à l'autre. Les distributions ne sont pas symétriques autour de la médiane : à Roberval, les glaces se forment entre le 28 novembre et le 10 décembre (période de 12 jours) pour la moitié des hivers alors que l'autre moitié des hivers voit la glace se former entre le 10 décembre et le 28 décembre (période de 18 jours). Cette asymétrie de la distribution des fréquences de dépassement s'accroît lorsqu'on compare les 10^e et 90^e centiles et elle n'est pas très bien reproduite par les trois ré-analyses à grilles grossières (ERA20C, Réanalyse2 et 20CR). Par contre, elle est correctement reproduite par les ré-analyses à grilles fines (MERRA, ERA-Intérim, CFSR et NARR). Pour cette raison, les ré-analyses à grilles grossières n'ont pas été retenues pour la suite de l'étude.

Tableau 5.3: Mesures et ré-analyses des températures de l'air quotidiennes

	NOM	DISPONIBILITÉ		TYPE	RÉSOLUTION horizontale (km)
		Début	Fin		
i	Station Roberval (EC)	11-oct-1957	-	n/a	n/a
ii	NRCAN	01-janv-1950	31-déc-2012	n/a	n/a
1	ERA20C	01-janv-1900	31-déc-2010	global	125
2	Réanalyse 2	01-janv-1979	31-déc-2012	global	210
3	20CR	01-janv-1981	31-déc-2012	global	200
4	MERRA	01-janv-1979	31-déc-2013	régional	50
5	ERA-Interim	01-janv-1979	31-déc-2014	régional	79
6	NARR	01-janv-1979	31-déc-2010	régional	32
7	CFSR	01-janv-1979	31-déc-2010	régional	38
8	ERA-40	01-sept-1957	31-août-2002	global	125



Figure 5.3: Localisation des stations de mesures et des points de ré-analyses

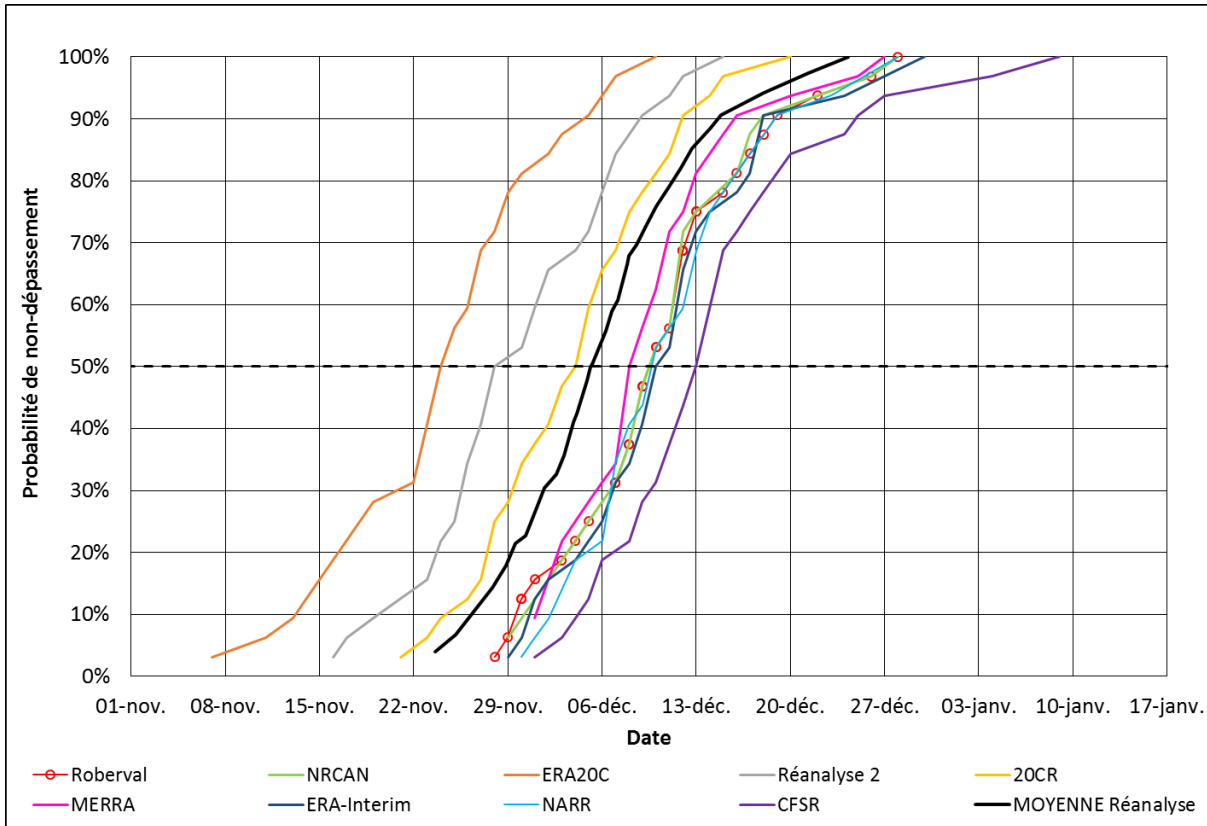


Figure 5.4: Date de prise des glaces (-150°C-jours) – Données mesurées et ré-analyses entre 1979 et 2010

Lorsque les trois ré-analyses grossières et froides sont retirées de l’exercice de comparaison, la moyenne des dates (quantile par quantile) des quatre ré-analyses à grille fine est pratiquement identique aux valeurs observées à la station de Roberval et par NRCAN (tableau 5.4). La comparaison de plusieurs types de ré-analyses montre que la taille de la grille, en plus de la variabilité intrinsèque due aux modèles, contribue aux biais et aux incertitudes liées à la modélisation des températures. Il est important de se rappeler que cette variabilité sera aussi présente pour les simulations par des modèles climatiques. Les températures de l’air mesurées à la station météorologique de Roberval, tout comme les ré-analyses, offrent une bonne représentation des températures de l’air du lac Saint-Jean, et il y a peu d’incertitude associée à la description du climat actuel.

Le tableau 5.4 résume les principales valeurs statistiques des séries temporelles issues des ré-analyses. En s’attardant aux statistiques de la station météorologique de Roberval, il ressort que la date moyenne de prise des glaces dans le climat actuel est le 10 décembre avec un intervalle interquartile d’une semaine. D’après les observations entre 1979 et 2010, la prise des glaces peut être aussi hâtive que le 28 novembre et aussi tardive que le 28 décembre (voir figure 5.4).

Tableau 5.4: Date de prise du couvert de glace basée sur -150°C-jours de gel (1979-2010)

	NOM	MÉDIANE	25 ^e	75 ^e	Écart interquartile	10 ^e	90 ^e
i	Station Roberval (EC)	10-déc	06-déc	13-déc	7,0	30-nov	18-déc
ii	NRCAN	10-déc	05-déc	13-déc	8,0	03-déc	17-déc
moyenne des mesures		10-déc	06-déc	13-déc	7,5	01-déc	18-déc
1	ERA20C	24-nov	18-nov	29-nov	10,3	14-nov	04-déc
2	Ré-analyses 2	29-nov	25-nov	06-déc	10,3	23-nov	08-déc
3	20CR	04-déc	28-nov	08-déc	9,5	26-nov	12-déc
4	MERRA	08-déc	05-déc	12-déc	7,3	12-déc	15-déc
5	ERA-Interim	10-déc	06-déc	14-déc	7,8	01-déc	18-déc
6	NARR	10-déc	07-déc	14-déc	7,5	04-déc	18-déc
7	CFSR	13-déc	09-déc	17-déc	8,3	05-déc	24-déc
<i>Moyenne des ré-analyses 1 à 7</i>		05-déc	01-déc	10-déc	8,7	29-nov	14-déc
Moyenne des ré-analyses 4 à 7		10-déc	06-déc	14-déc	7,7	05-déc	18-déc

5.5.2 Départ des glaces

L'analyse présentée à la section précédente a été reprise pour la période printanière avec les mêmes sources de données que pour la prise des glaces. La figure 5.5 présente les courbes de fréquence de non-dépassement de la date à laquelle survient le départ des glaces pour les différentes séries de données étudiées.

Tout comme en début d'hiver, les ré-analyses ERA20C, Ré-analyses 2 et 20CR présentent un biais froid au printemps, prédisant un départ des glaces tardif vers la fin mai/début juin. Pour les raisons évoquées à la section 5.5.1, ces ré-analyses ont été éliminées, ce qui donne lieu à une concordance presque parfaite entre les mesures et les ré-analyses (tableau 5.5). Tout comme en début d'hiver, les températures de l'air mesurées à la station météorologique de Roberval sont bien représentatives des températures de l'air printanières du lac Saint-Jean.

Le climat actuel, tel que décrit par les mesures de la station météorologique de Roberval, indique un départ des glaces survenant en moyenne le 8 mai, avec un écart interquartile d'environ 10 jours. D'après les observations entre 1979 et 2010, la fonte du couvert peut toutefois être aussi hâtive que le 17 avril et aussi tardive que le 22 mai (voir figure 5.5).

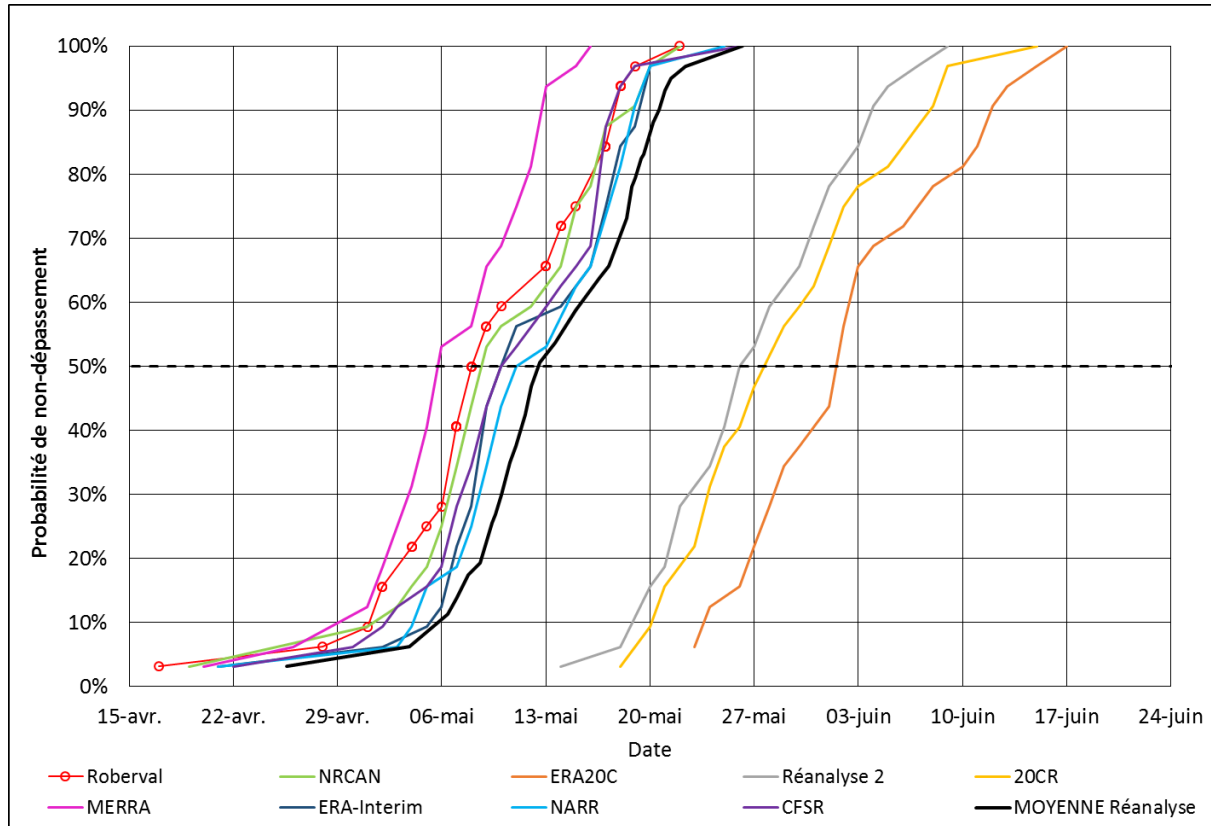


Figure 5.5: Date de départ des glaces (175°C-jours) – Données mesurées et ré-analyses entre 1979 et 2010

Tableau 5.5: Date de départ du couvert de glace basée sur 175°C-jours de réchauffement (1979-2010)

	NOM	MÉDIANE	25 ^e	75 ^e	Écart interquartile	10 ^e	90 ^e
i	Station Roberval (EC)	08-mai	05-mai	15-mai	9,8	02-mai	18-mai
ii	NRCAN	09-mai	06-mai	15-mai	8,5	03-mai	18-mai
	moyenne des mesures	08-mai	06-mai	15-mai	9,1	02-mai	18-mai
1	ERA20C	02-juin	28-mai	07-juin	10,3	24-mai	12-juin
2	Ré-analyses 2	26-mai	22-mai	01-juin	10,0	20-mai	04-juin
3	20CR	29-mai	24-mai	02-juin	9,3	21-mai	07-juin
4	MERRA	06-mai	03-mai	11-mai	7,5	01-mai	13-mai
5	ERA-Interim	10-mai	08-mai	17-mai	9,3	06-mai	19-mai
6	NARR	12-mai	08-mai	18-mai	9,3	05-mai	19-mai
7	CFSR	10-mai	07-mai	17-mai	10,0	03-mai	17-mai
	<i>moyenne des ré-analyses 1 à 7</i>	18-mai	14-mai	23-mai	9,4	11-mai	26-mai
	moyenne des ré-analyses 4 à 7	09-mai	06-mai	15-mai	9,0	03-mai	17-mai

5.6 Simulations climatiques

La comparaison des mesures de températures de l'air à la station météorologique de Roberval avec des ré-analyses a permis de conclure que les données de Roberval permettaient de dresser un portrait réaliste des températures de l'air, et donc des périodes d'eau libre, du climat actuel du lac Saint-Jean.

Pour prédire l'influence des changements climatiques sur les périodes d'eau libre du lac Saint-Jean en conditions futures, les résultats de simulations climatiques produites par des modèles physiques de climat ont été utilisées.

Les modèles physiques de climat simulent le climat de la planète Terre sur la base de paramètres géophysiques (sols, végétation, plans d'eau, etc.), chimiques (gaz à effet de serre (GES), ozone, aérosols) et physiques (gravité, rayonnement solaire, etc.). Les modèles climatiques créent ainsi des climats virtuels, composés de centaines de variables climatiques. Les simulations climatiques couvrent généralement de longues périodes de temps, d'une durée de plusieurs décennies et parfois, de plusieurs siècles.

Les modèles physiques de climat se divisent en deux principaux groupes: les modèles climatiques globaux ou modèles de circulation générale (MCG) qui couvrent toute la planète, et les modèles climatiques régionaux (MCR), à résolution plus fine sur un domaine restreint comme une région ou un continent. Les modèles globaux ont une résolution plus grossière et peuvent être utilisés pour piloter les modèles régionaux à leur frontière externe. Chaque modèle physique peut être à l'origine de plusieurs simulations climatiques, lesquelles varient en fonction des scénarios d'émission de GES et d'aérosols dans l'atmosphère imposés au modèle ou en fonction des conditions initiales imposées à chaque simulation.

L'étude des changements climatiques consiste à évaluer si les concentrations de GES et d'aérosols décrites par les scénarios d'émission viendront modifier les caractéristiques statistiques (moyenne, variabilité, fréquence) du climat de la région étudiée. Les changements climatiques sont estimés en comparant un climat projeté pour un horizon futur à un climat du passé récent. La comparaison des résultats d'une même simulation pour deux périodes d'analyse différentes permet de réduire les incertitudes liées à la résolution et la formulation des modèles climatiques. Pour minimiser d'autres sources d'incertitude telles la qualité des modèles, les scénarios d'émission et la nature chaotique du climat-même, il est recommandé d'utiliser les résultats de plusieurs simulations climatiques.

Pour l'étude des changements climatiques ayant trait à l'érosion des berges du lac Saint-Jean, Ouranos a fourni des séries de la température quotidienne de l'air de 16 simulations climatiques différentes, dont les caractéristiques de base sont fournies au tableau 5.6. Les simulations climatiques proviennent de 9 modèles globaux différents et d'un modèle régional. Les scénarios GES utilisés sont A1B, A2 et B1.

Tableau 5.6: Simulations climatiques

ID	NOM	Période passée	Période future	Modèle global	Modèle régional	Scénario GES
1	cmip3-miroc3_2_medres-sresb1-run3	1961-2000	2046-2065	MIROC3.2 MEDRES	-	B1
2	cmip3-cccma_cgcm3_1-sresa2-run1	1961-2000	2041-2070	CCCMA CGCM3.1	-	A2
3	cmip3-iap_fgoals1_0_g-sresb1-run2	1961-2000	2046-2065	IAP	-	B1
4	cmip3-giss_aom-sresb1-run1	1961-2000	2046-2065	GISS		B1
5	cmip3-mri_cgcm2_3_2a-sresb1-run5	1961-2000	2046-2065	MRI CGCM2.1	-	B1
6	cmip3-cccma_cgcm3_1-sresb1-run5	1961-2000	2041-2070	CCCMA CGCM3.1	-	B1
7	cmip3-miub_echo_g-sresa2-run3	1961-2000	2046-2065	MIUB ECHO G	-	A2
8	cmip3-miroc3_2_medres-sresa1b-run3	1961-2000	2046-2065	MIROC3.2 MEDRES	-	A1B
9	cmip3-csiro_mk3_5-sresa1b-run1	1961-2000	2041-2070	CSIRO MK3	-	A1B
10	cmip3-cccma_cgcm3_1-sresa2-run4	1961-2000	2041-2070	CCCMA CGCM3.1	-	A2
11	cmip3-miroc3_2_medres-sresb1-run2	1961-2000	2046-2065	MIROC3.2 MEDRES	-	B1
12	cmip3-mpi_echam5-sresb1-run1	1961-2000	2046-2065	MPI ECHAM 5		B1
13	cmip3-miroc3_2_medres-sresa1b-run2	1961-2000	2046-2065	MIROC3.2 MEDRES	-	A1B
14	CRCM-CGCM3 (aet)	1961-2000	2041-2070	CGCM3	CRCM	A2
15	CRCM-ECHAM5 (agx)	1961-2000	2041-2070	ECHAM5	CRCM	A2
16	CRCM-CNRM (agw)	1961-2000	2041-2070	CNRM	CRCM	A1B

5.7 Calcul du delta entre 1961-2000 et 2041-2070

Tel que mentionné précédemment, l'ampleur des changements climatique (aussi appelé « delta ») est déterminé en comparant les résultats de simulations climatiques sur deux périodes de temps différentes: climat passé récent et climat futur. Il est préférable que ces deux périodes soient suffisamment éloignées dans le temps pour que le signal du changement se distingue de la variabilité des données et du climat lui-même. Pour la présente étude, le climat passé récent est défini par la période 1961-2000 et le climat futur par la période 2041-2070.

La méthodologie utilisée pour analyser le climat actuel (voir section 5.5) a été appliquée aux séries de températures de l'air des simulations climatiques.

5.7.1 Prise des glaces

Les courbes de fréquence de la date de prise des glaces des 16 simulations climatiques sont présentées aux figures 5.6 et 5.7 pour les deux périodes de référence considérées. À noter que certaines simulations en conditions futures ne couvrent pas entièrement la période 2041-2070, mais plutôt les années 2046-

2065. Certaines simulations issues de la série CMIP-3⁷ couvrent une période future de 20 ans, et d'autres une période de 30 ans. Dans tous les cas, les simulations sont centrées sur 2055. Les périodes couvertes par les simulations sont indiquées au tableau 5.6.

En examinant les graphiques des figures 5.6 et 5.7, il ressort que la majorité des simulations climatiques ont un biais froid. Comparativement aux observations et ré-analyses du climat actuel, qui situent la date moyenne de prise des glaces au 10 décembre (voir tableau 5.4), la plupart des simulations climatiques prédisent une prise des glaces plus hâtive, et ce, même pour les conditions futures. Cette différence s'explique en partie par les grilles plus grossières des modèles globaux. Ce résultat illustre bien l'importance de déterminer le signal du changement sur la base des simulations climatiques seulement, et non en comparant directement les simulations climatiques futures aux observations actuelles.

Le tableau 5.7 donne pour chacune des simulations climatiques et les deux périodes de référence la date médiane de la prise des glaces, et les écarts obtenus entre chacune d'entre elles. L'ampleur du changement correspond à la médiane (50^e centile) de la distribution des écarts. Les données du tableau 5.7 indiquent donc que la prise des glaces en conditions futures serait retardée de 13 jours, avec une variabilité de de 6 à 21 jours.

La variabilité des écarts est indicative de l'incertitude découlant de plusieurs facteurs : incertitude liée au modèle lui-même, taille de la grille et distance du centre du lac, variabilité climatique etc. Notons aussi que la période de référence 1961-2000 du climat passé récent est différente de la période des ré-analyses (1979-2010). Comme les années 1961-1980 sont caractérisées par des hivers froids, et les années 1995-2010 par des hivers doux, les modélisations climatiques ont un biais froid (prise des glaces plus hâtive) que les ré-analyses et les observations.

Les valeurs moyennes similaires des différents percentiles et l'allure parallèle des courbes aux figures 5.6 et 5.7 indiquent que les simulations climatiques ont une distribution semblable. De plus, il y a consensus entre les différentes simulations climatiques, i.e. qu'elles prédisent toutes un retard de la date de prise des glaces en climat futur (écarts positifs au tableau 5.7).

⁷ Couple Model Intercomparison Project-3, http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip3_overview.html.

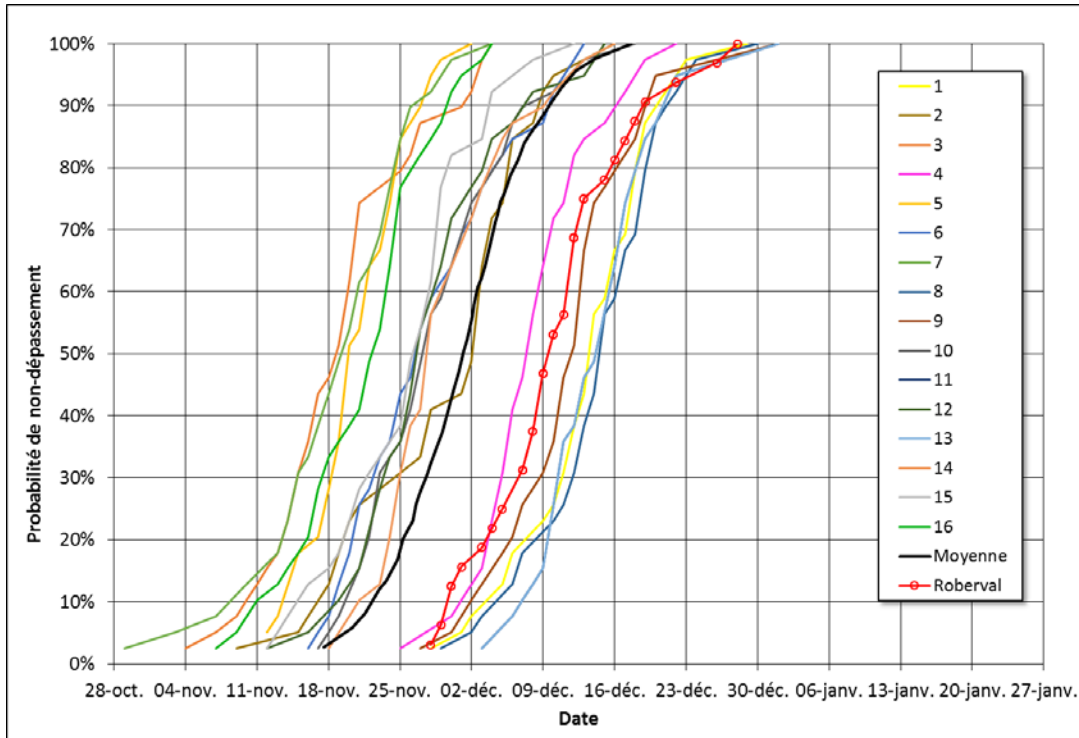


Figure 5.6: Date de prise des glaces (-150°C-jours) – Simulations climatiques 1961-2000

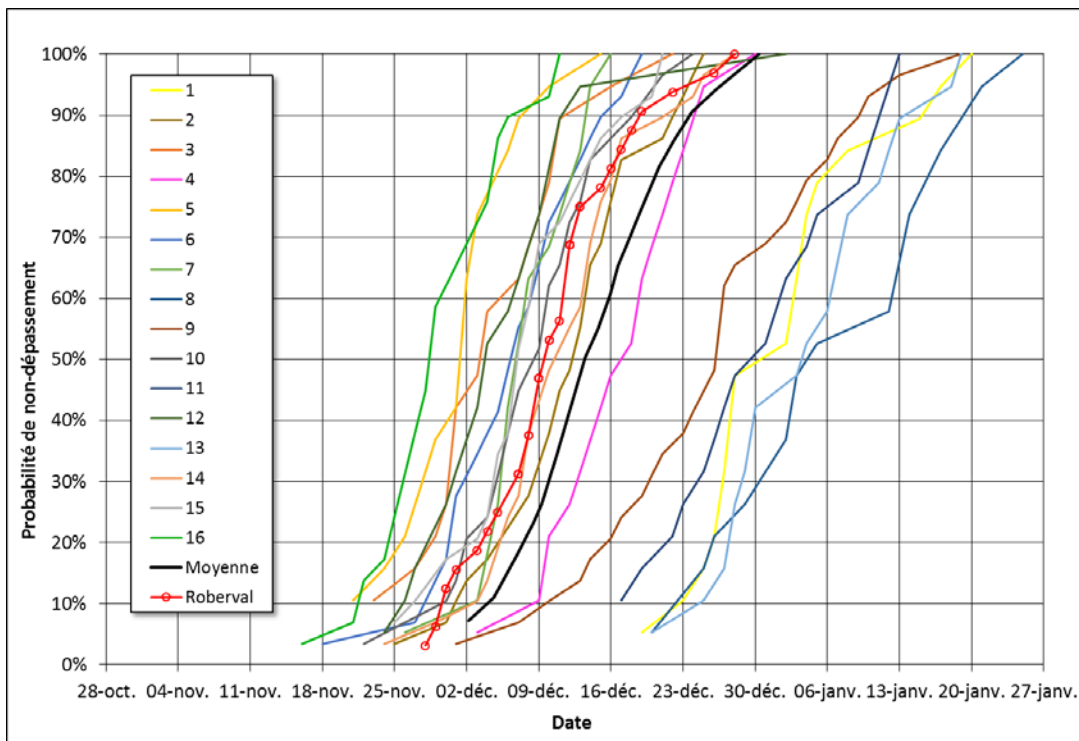


Figure 5.7: Date de prise des glaces (-150°C-jours) – Simulations climatiques 2046-2065 ou 2041-2070

Tableau 5.7: Statistiques des simulations climatiques pour la prise des glaces

Simulation climatique	Période		Écart jours
	1961-2000	2041-2070	
1	14-déc	02-janv	19,0
2	03-déc	13-déc	10,0
3	19-nov	04-déc	15,0
4	08-déc	18-déc	10,0
5	20-nov	02-déc	12,0
6	27-nov	07-déc	10,0
7	20-nov	07-déc	17,0
8	15-déc	05-janv	21,0
9	12-déc	27-déc	15,0
10	28-nov	09-déc	11,0
11	16-déc	31-déc	15,0
12	27-nov	04-déc	7,0
13	16-déc	04-janv	19,0
14	28-nov	12-déc	14,0
15	27-nov	07-déc	10,0
16	23-nov	29-nov	6,0

Distribution des écarts:

statistique	jours
10 ^e	8,5
25 ^e	10,0
50 ^e	13,0
75 ^e	15,5
90 ^e	19,0
min	6,0
max	21,0

Note : Les dates de prise des glaces correspondent à -150°C-jours de gel

5.7.2 Départ du couvert de glace

L'analyse présentée à la section précédente pour la prise des glaces a été répétée pour le départ des glaces au printemps. Les résultats sont présentés sous forme graphique aux figures 5.8 et 5.9 et sous forme tabulaire au tableau 5.8.

Encore une fois, le biais froid des simulations climatiques ressort clairement des résultats présentés aux figures 5.8 et 5.9. Comparativement aux observations et ré-analyses, qui placent le départ des glaces en moyenne le 8 mai, les simulations climatiques placent la disparition des glaces le 24 mai. Ce biais froid est principalement dû à la période de référence 1961-2000 plus froide que celle des ré-analyses (1979-2010) et aux grilles spatiales généralement plus grossières des simulations climatiques par rapport aux ré-analyses utilisées.

Par contre, lorsque les simulations climatiques sont comparées entre elles, les résultats sont conformes au changement anticipé, i.e. que le départ des glaces se produit plus tôt. La direction du changement fait consensus entre les différentes simulations climatiques, qui anticipent toutes un devancement de 10 jours du départ des glaces en climat futur (centré sur 2055), variant de 2 à 25 jours selon la simulation.

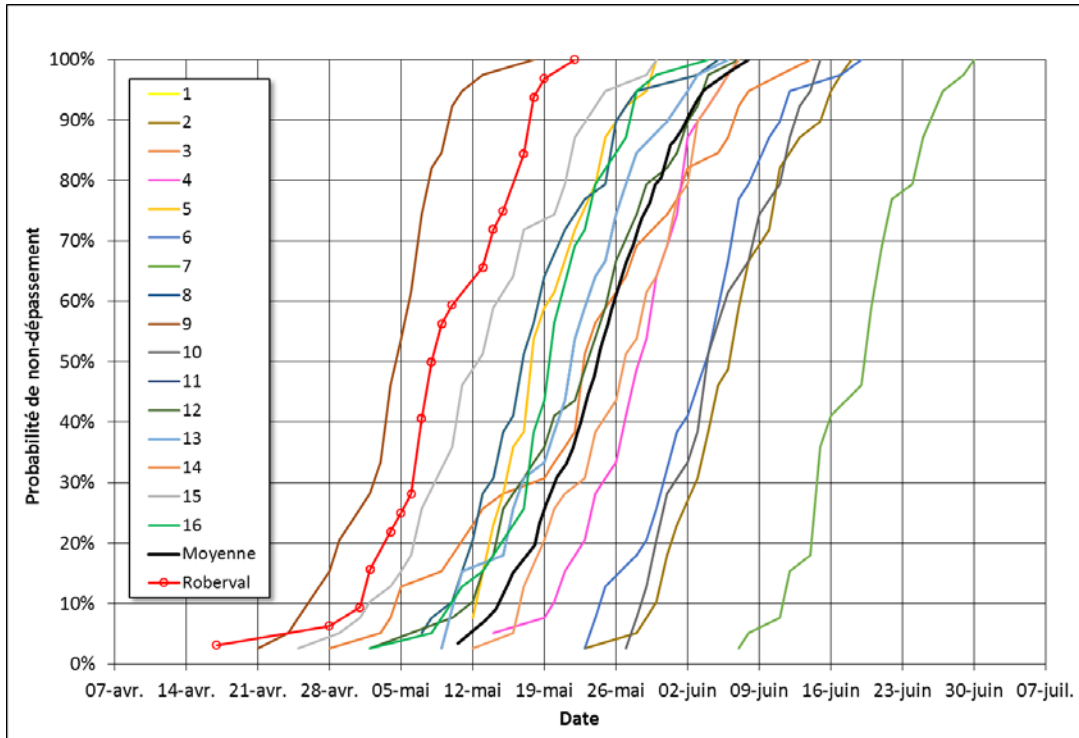


Figure 5.8: Date de départ des glaces (175°C-jours) – Simulations climatiques 1961-2000

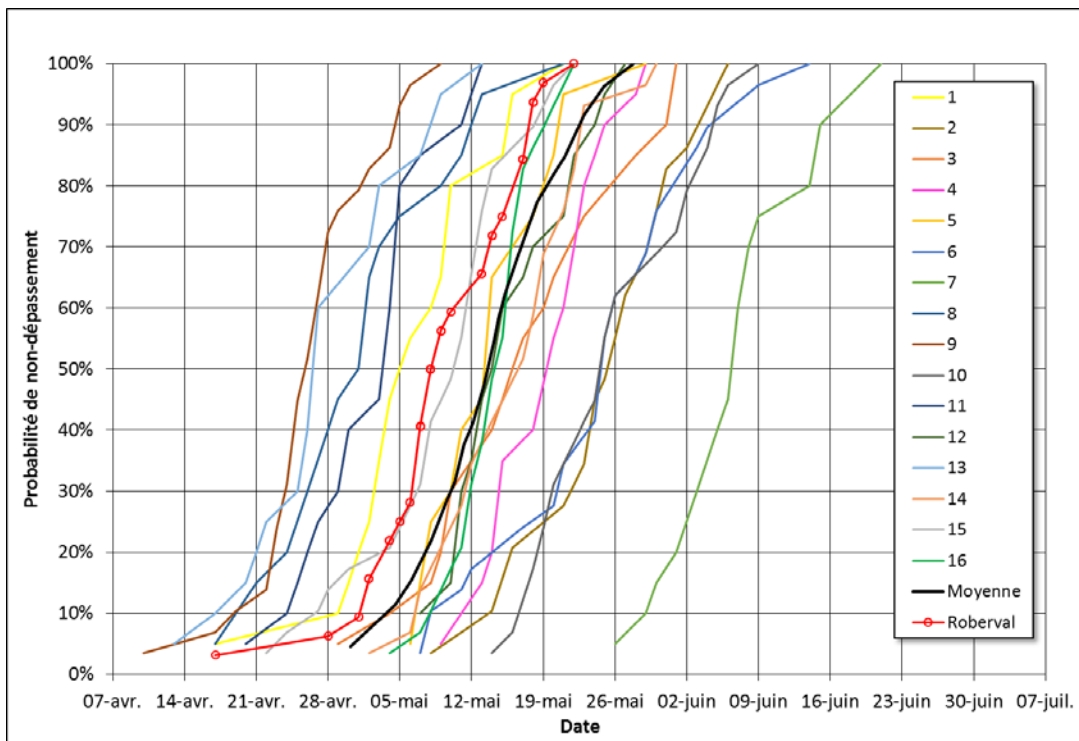


Figure 5.9: Date de départ des glaces (175°C-jours) – Simulations climatiques 2046-2065 ou 2041-2070

Tableau 5.8: Statistiques des simulations climatiques pour le départ des glaces

Simulation climatique	Période		Écart jours
	1961-2000	2041-2070	
1	17-mai	05-mai	-11,5
2	07-juin	26-mai	-12,0
3	23-mai	16-mai	-6,5
4	29-mai	20-mai	-9,0
5	18-mai	14-mai	-4,0
6	04-juin	25-mai	-10,0
7	20-juin	07-juin	-13,0
8	17-mai	01-mai	-15,5
9	05-mai	26-avr	-9,0
10	04-juin	25-mai	-10,0
11	22-mai	04-mai	-18,0
12	25-mai	14-mai	-10,5
13	22-mai	27-avr	-25,0
14	27-mai	17-mai	-10,0
15	13-mai	11-mai	-2,0
16	20-mai	15-mai	-5,0

Distribution des écarts:

statistique	jours
10 ^e	-16,8
25 ^e	-12,3
50 ^e	-10,0
75 ^e	-8,4
90 ^e	-4,5
min	-25,0
max	-2,0

Note : Les dates de départ des glaces correspondent à 175°C-jours de réchauffement

5.8 Interpolation des changements estimés en 2035

De concert avec les intervenants de Rio Tinto Alcan et les spécialistes d'Ouranos, il a été décidé d'appliquer les changements climatiques à un horizon moins éloigné que la période 2041-2070. Cette période future prédit les changements dans 40 ans (période future centrée sur 2055), ce qui constitue une projection trop pessimiste par rapport à la vie utile des ouvrages de protection des berges. Il est plus réaliste de considérer un horizon plus rapproché dans le temps. L'année intermédiaire ayant lieu dans 20 ans, 2035, a été sélectionnée.

Tel que mentionné précédemment, il est important dans l'étude des changements climatiques d'utiliser deux périodes de référence suffisamment éloignées dans le temps pour bien distinguer le signal de changement du bruit de fond associé à la variabilité des données climatiques et de l'incertitude liée au processus de modélisation. Une fois les deltas calculés entre ces deux périodes de référence, il est possible d'interpoler les résultats à une date intermédiaire.

Le tableau 5.9 fournit les résultats d'interpolation en 2035 des statistiques des deltas obtenus entre les périodes de référence passée et future. L'année médiane des deux périodes de référence est utilisée, soit 1980 pour la période 1961-2000, et 2055 pour les périodes 2046-2065 ou 2041-2070. La figure 5.10 illustre ces résultats graphiquement.

Tableau 5.9: Interpolation des deltas de changements climatiques en 2035

Centile	Deltas en jours					
	Prise des glaces			Départ des glaces		
	(1961-2000) 1980	(2041-2070) 2055	2035	(1961-2000) 1980	(2041-2070) 2055	2035
10 ^e	0	9	6	0	-10	-8
25 ^e	0	10	7	0	-10	-7
50 ^e - Médiane	0	13	10	0	-10	-7
75 ^e	0	16	11	0	-9	-7
90 ^e	0	19	14	0	-9	-7
Min	0	6	4	0	-25	-18
Max	0	21	15	0	-2	-1

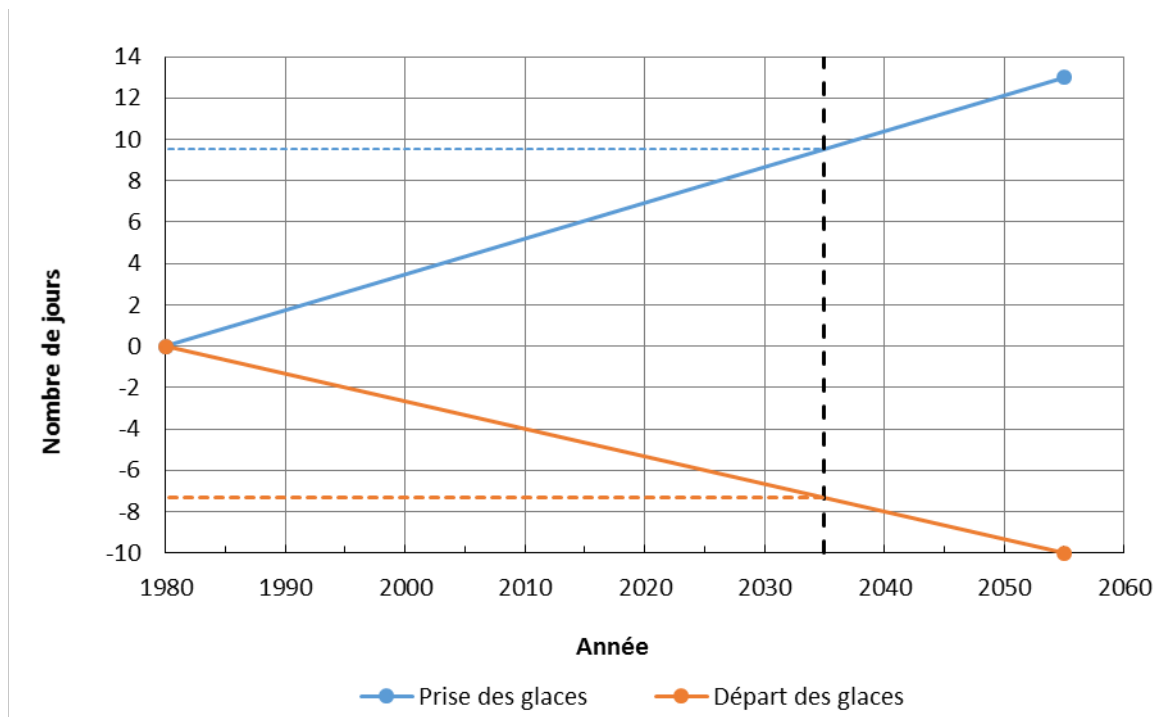


Figure 5.10: Prolongement futur de la période d'eau libre retenue dans l'analyse

En 2035, selon les statistiques interpolées de la médiane, la prise des glaces serait retardée en moyenne de 10 jours, et le départ des glaces devancé de 7 jours. Par rapport aux conditions actuelles, la période d'eau libre serait donc allongée d'environ 17 jours. Il s'agit ici de valeurs médianes qui correspondent au scénario d'occurrence le plus probable.

À partir des données statistiques des observations et de celles des changements climatiques, une grande variété de scénarios peut être élaborée. Par exemple, sur la base des températures de l'air mesurées à la station de Roberval, il a été établi que la date de prise des glaces pouvait survenir entre les 28 novembre et 28 décembre, avec une date moyenne du 10 décembre (section 5.5.1). Les projections de changements climatiques ont démontré que le changement probable à anticiper en 2035 serait de 10 jours, avec une variabilité de 4 à 15 jours. Ainsi, un scénario très pessimiste consisterait à combiner la date la plus tardive des observations (28 décembre) à la médiane des deltas (10 jours), pour une prise des glaces le 7 janvier.

Dans un premier temps, le scénario le plus probable sera utilisé. Les périodes d'eau libre en conditions actuelles (1992-2014) seront ajustées pour construire les séries temporelles futures en avançant de 7 jours le départ des glaces et en retardant de 10 jours la prise des glaces.

Au vu des résultats, des tests de sensibilité pourront être effectués en ajustant les périodes d'eau libre pour tenir compte de la variabilité des observations et des simulations climatiques.

6 MODÈLES DE TERRAIN

La mise au point d'un modèle numérique de terrain implique la recherche du meilleur compromis entre la précision de la représentation des fonds et les temps de calculs des simulations. Plus le maillage est fin, plus les temps de calculs sont longs. De plus, les phénomènes hydrodynamiques ne présentent pas tous la même sensibilité à la représentation des fonds. Dans certains cas, l'utilisation d'un maillage grossier peut donner lieu à des résultats pratiquement identiques à ceux obtenus avec un maillage fin.

Dans l'étude de l'érosion des berges du lac Saint-Jean, la modélisation à l'aide de MIKE 21 visait deux principaux objectifs : 1) la modélisation de la variation des niveaux d'eau causée par les vents et 2) la génération des vagues par le vent. Comme les modèles numériques requis pour répondre à ces objectifs n'utilisaient pas les mêmes paramètres et les mêmes durées de simulation, deux modèles de terrain ont été mis au point. Les données bathymétriques à la base de ces modèles sont les mêmes, mais les maillages sont différents.

Les modèles de terrain ont été construits dans le pré-processeur de MIKE, qui permet de représenter la topographie et la bathymétrie à l'aide d'un maillage à éléments triangulaires compatibles avec la formulation FM (Flexible Mesh) de MIKE 21. L'utilisation d'un maillage flexible permet d'optimiser le temps de calcul en augmentant la résolution du maillage dans les zones côtières d'intérêt, tout en maintenant un maillage plus grossier dans les portions plus profondes du lac.

6.1 Données de base utilisées

Les lignes de rivage du lac et des îles, de même que les principales données bathymétriques utilisées dans le modèle numérique, ont été obtenues auprès du Service Hydrographique du Canada (SHC). Les données bathymétriques ont été fournies sous format de fichier maillé aux 20 mètres :

- *2D_20m_02-09-2014.txt*;
- *32A_20m_02-09-2014.txt*.

Ce type de fichier fournit l'élévation des fonds selon un espacement minimal de 20 m à partir des données bathymétriques les plus récentes disponibles au SHC. Ainsi, les données brutes de haute résolution sont filtrées pour être espacées de 20 m et les données plus espacées sont conservées telles quelles. Cette source de données offre l'avantage de couvrir l'ensemble du lac avec seulement deux fichiers de données. La date des relevés et leur provenance ne peuvent toutefois être connues⁸.

⁸ Le SHC a été contacté pour connaître de manière plus précise les dates de sondage des données bathymétriques. Cette demande nécessitant le traitement d'une soixantaine de fichiers de levés n'a finalement pas été suivie d'une requête formelle.

De façon générale, les relevés du SHC couvrent des profondeurs allant jusqu'au zéro des cartes, qui est de +100,4 m par rapport au niveau moyen des mers (NMM) au lac Saint-Jean. La figure 6.1 illustre la couverture et les élévations en NMM (ou géodésique) des données brutes provenant du SHC.

Les données bathymétriques du SHC ont été complétées par les relevés effectués lors d'une campagne de mesure réalisée à l'automne 2014 :

- Relevés topographiques, du 22 septembre au 31 octobre 2014 : firme Girard-Tremblay-Gilbert;
- Relevés bathymétriques, du 22 septembre au 24 octobre 2014 : Groupe Conseil Nutshimit-Nippour (GCNN) et WSP;
- Relevés LIDAR, du 29 septembre au 24 octobre 2014 : Groupe GénieArp.

Les données topographiques et bathymétriques couvrent le pourtour du lac sous forme de transects espacés aux 25 m ou aux 250 m, selon le secteur (figure 6.2). Ensemble, elles permettent de connaître les élévations du terrain comprises entre 97,5 m et 102,5 m.

Les données LIDAR, qui couvrent les élévations comprises entre 100,3 m et 106,0 m, n'ont pas été incluses dans les modèles de terrain de MIKE 21 car une représentation aussi détaillée des hauts de plage n'était pas requise à ce stade. Elles ont toutefois été utilisées dans les modèles bidimensionnels présentés dans les volumes 2 et 3 du rapport.

Les données du SHC et de la campagne de mesures 2014 ont été combinées dans le logiciel de pré-traitement Mike ZERO, en enlevant les données les plus anciennes dans les zones de chevauchement.

6.2 Modèle de terrain pour la simulation des niveaux d'eau

Le modèle de terrain utilisé pour la simulation des niveaux d'eau inclut les lignes de rivage et les données bathymétriques du SHC. Ce premier modèle a été élaboré avant la réception des données de la campagne de 2014, mais permet néanmoins de simuler les niveaux d'eau avec suffisamment de précision.

Afin d'optimiser les temps de calcul, des essais de sensibilité ont été effectués afin de déterminer le meilleur maillage possible. L'influence de la taille et du nombre de mailles sur la précision des résultats et les temps de simulation a été vérifiée en modélisant un épisode de tempête de 4 jours avec différents modèles de terrain. Le tableau 6.1 présente les caractéristiques des différents modèles de terrain testés.

Avec une réduction de 60% du temps de simulation, le modèle D (17 600 mailles) a permis d'obtenir des résultats très similaires au modèle A (45 500 mailles), dont les résultats sont jugés plus précis. Il a donc été retenu pour réaliser l'ensemble des simulations de variation du niveau d'eau liée au vent (voir chapitre 7). Le modèle de terrain D est illustré à la figure 6.3.

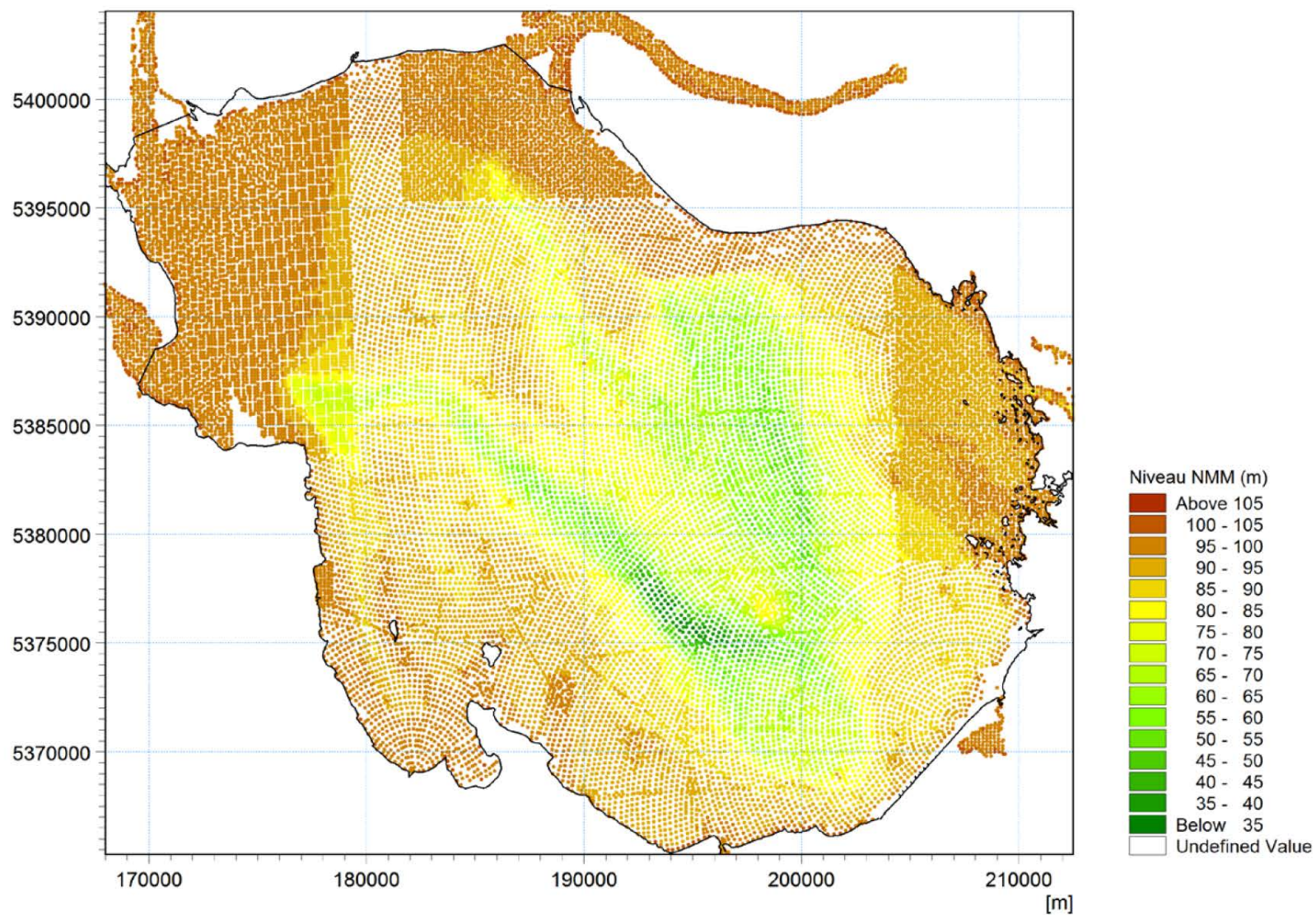


Figure 6.1: Couverture des données provenant du Service hydrographique du Canada



Figure 6.2: Couverture des données provenant des relevés topographiques et bathymétriques 2014

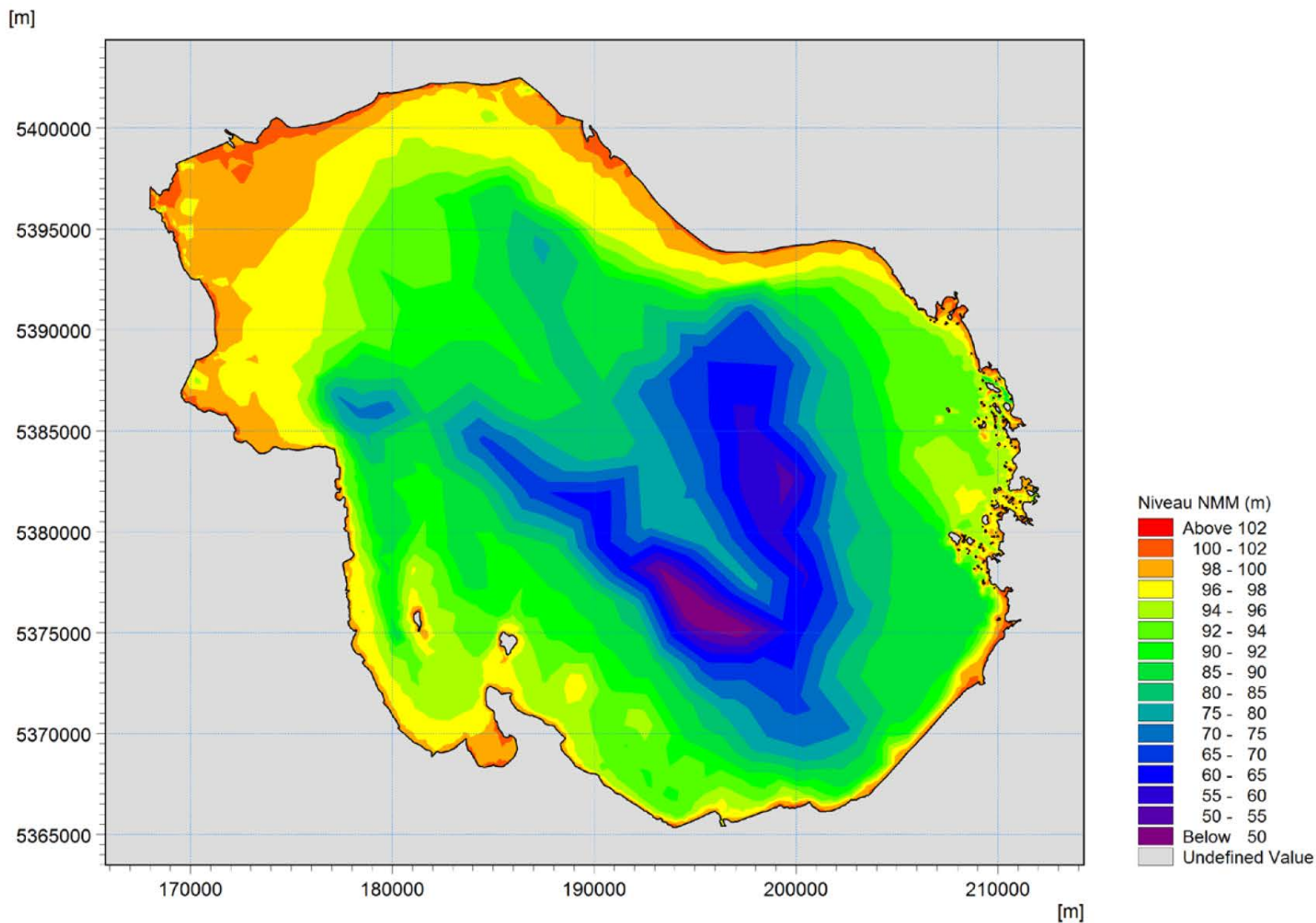


Figure 6.3: Modèle de terrain utilisé pour simuler les niveaux d'eau

Tableau 6.1: Analyse de sensibilité de la taille de maille maximale pour la simulation des niveaux d'eau

Modèle	Taille de maille maximale imposée (m ²)	Nombre de mailles (arrondi à la centaine)	Taille de maille minimale obtenue (m ²)	Temps de simulation (heures)
A	50 000	45 500	22	4,50
B	250 000	22 200	22	2,25
C	500 000	20 000	22	2,00
D	5 000 000	17 600	22	1,75

6.3 Modèle de terrain pour la simulation des vagues

L'objectif premier de la modélisation des vagues était de simuler le climat des vagues sur une longue période, une première fois pour le passé récent (1992-2014), puis selon différents scénarios du futur proche (2015-2037). Dans chaque cas, cela correspond à 23 périodes d'eau libre, ce qui équivaut à plus de 150 000 heures de simulation (environ 8 mois d'eau libre par année). En raison de cette longue période de simulation, plusieurs essais ont été effectués pour optimiser le maillage du modèle de terrain afin de minimiser les temps de calcul tout en maintenant un niveau de précision adéquat.

Le temps de simulation peut être réduit en réduisant le nombre de mailles et/ou en éliminant les petites mailles créées par les singularités locales des lignes de rivage et des îles. Les figures suivantes illustrent deux modèles au maillage différent.

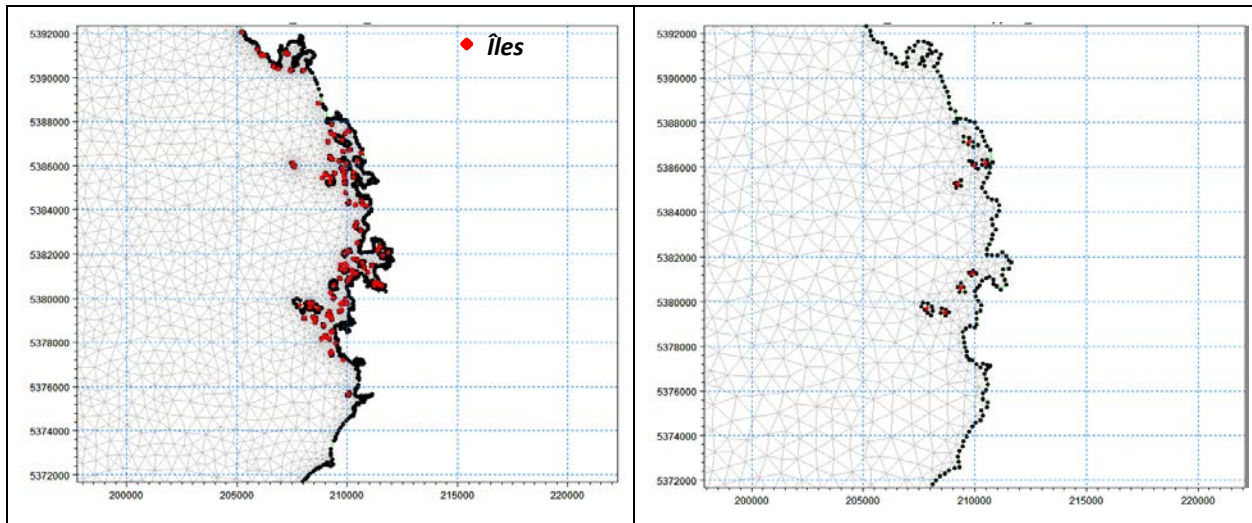


Figure 6.4: Maillages analysés - Modèle détaillé à gauche et modèle simplifié à droite

Le premier modèle, à gauche sur la figure 6.4, inclut la ligne de rivage détaillée et la totalité des îles du lac Saint-Jean, telles que reçues du SHC. Le nombre total d'éléments dans ce modèle est de 22 181. Le deuxième modèle, à droite de la figure 6.4, est constitué d'une ligne de rivage simplifiée et n'inclut que les plus grandes îles du lac Saint-Jean (dix îles ont été retenues). Le nombre total d'éléments dans ce modèle est de 4 747.

Ces deux modèles ont été utilisés pour simuler la génération de vagues à l'aide de MIKE 21 SW lors d'une tempête d'une durée de 18 heures avec un vent d'ouest-nord-ouest de 40 km/h et un niveau de 101,54 m.

Les hauteurs de vagues significatives ont été extraites aux points suivants afin de comparer les résultats des deux modèles de terrain :

- Vis-à-vis de Saint-Gédéon Sud, St-Henri-de-Taillon Nord et Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, à des profondeurs de 5 et 10 m;
- À l'emplacement des stations de la campagne de mesure des vagues (stations 1 et 2, voir chapitre 8), à des profondeurs de 15,5 m et 9,8 m.

La position des points d'analyse est illustrée à la figure 6.5 et le tableau 6.2 résume les résultats obtenus.

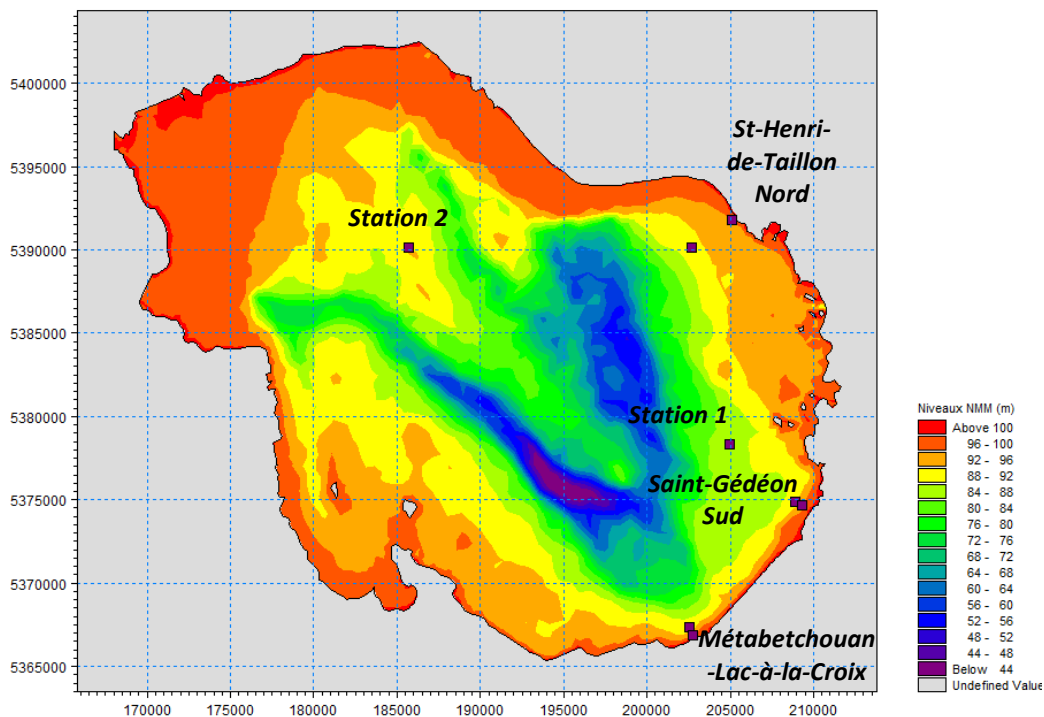


Figure 6.5: Position des points d'analyse des modèles bathymétriques détaillé et simplifié

Les résultats présentés au tableau 6.2 montrent que le modèle simplifié produit des résultats très similaires à ceux du modèle détaillé à des profondeurs supérieures à environ 10 m. Pour les profondeurs de 5 m, la réfraction des vagues joue un rôle plus important et la simplification du maillage sous-estime la hauteur des vagues.

En termes de temps de simulation, le modèle détaillé nécessite 74 minutes pour simuler 18 heures de tempête, alors que le modèle simplifié requière 2,7 minutes. La simplification du maillage permet donc de réduire les temps de calculs de 96%. Transposé à la simulation complète des 23 périodes d’eau libre, le modèle simplifié requière tout de même environ 7 jours de simulation.

Compte tenu du gain important dans les temps de simulation, et du fait que le modèle d’érosion des berges utilise comme intrants des vagues simulées dans des profondeurs généralement supérieures à 5 m (voir chapitre 9), il a été décidé d’utiliser le modèle de terrain simplifié pour toutes les simulations de vagues. Ce dernier est illustré à la figure 6.6.

Tableau 6.2: Résultats comparatifs des deux modèles de terrain (Détaillé versus Simplifié)

Modèle de terrain	Hauteur significative maximale (m)							
	Station 1 à 9,8 m	Station 2 à 15,5 m	Saint-Gédéon Sud		Saint-Henri-de-Taillon Nord		Métabetchouan-Lac-à-la-Croix	
			à 10 m	à 5 m	à 10 m	à 5 m	à 10 m	à 5 m
Détaillé	1,87	1,17	1,97	1,90	1,48	1,34	1,79	1,76
Simplifié	1,89	1,19	1,98	1,69	1,50	1,24	1,79	1,43
Différence	+ 0,019	+ 0,016	+ 0,013	- 0,21	+ 0,022	- 0,11	- 0,008	- 0,33

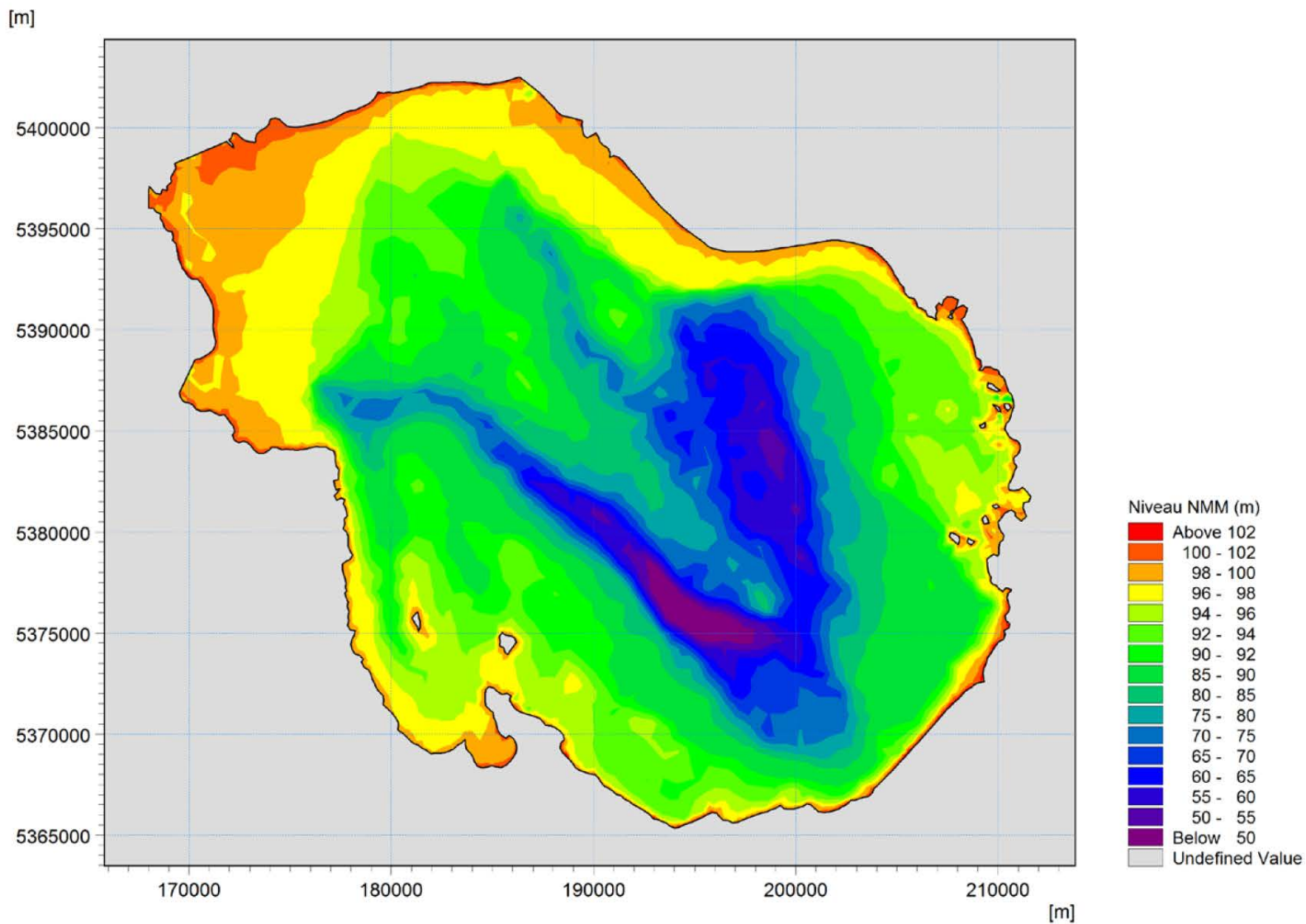


Figure 6.6: Modèle de terrain utilisé pour simuler les vagues

7 VARIATIONS DE NIVEAU LIÉES AUX VENTS

Le niveau d'eau de référence du lac Saint-Jean est actuellement mesuré dans le secteur ouest du lac, à la station de Roberval. Deux autres stations de mesure des niveaux d'eau sont installées dans la portion est du lac, les stations de Saint-Gédéon et de St-Henri-de-Taillon. Rio Tinto Alcan dispose pour ces stations de longues séries temporelles du niveau horaire et du niveau journalier. La localisation des trois stations de mesure du niveau d'eau est illustrée à la figure 7.1. Leurs coordonnées de positionnement sont les suivantes :

- Roberval : 72°13'02,72''O, 48°32'11,89N'' (177 986,56 m, 5 378 985,80 m Nad83 |MTM7);
- St-Henri-de-Taillon : 71°51'01,27''O, 48°39'26.29'' (205 327,27 m, 5 391 858,48 m Nad83 |MTM7);
- Saint-Gédéon: 71°47'01,19''O, 48°32'36,62'' (210 027,08 m, 5 379 120,87 m Nad83 |MTM7).



Figure 7.1: Localisation des stations de mesure du niveau d'eau dans le lac Saint-Jean

Le niveau de référence de Roberval ne peut évidemment tenir compte des variations locales du niveau d'eau qui peuvent survenir sur le pourtour du lac sous l'effet des surcotes ou décotes provoquées par l'effet de cisaillement du vent sur la surface du lac. Cet effet, qui peut être important lors d'épisodes de tempête, peut entraîner des différences significatives de niveau aux différentes extrémités du lac.

L'analyse des surcotes et décotes du lac a été complétée en plusieurs étapes :

1. Analyse statistique des surcotes et décotes du lac sur la base des niveaux d'eau horaires enregistrés aux trois stations de mesure du lac Saint-Jean;
2. Sélection d'épisodes de tempêtes menant à des différences marquées de niveaux d'eau entre les trois jauges du lac Saint-Jean;
3. Modélisation numérique des épisodes de tempêtes identifiés à l'étape 2 à l'aide du module hydrodynamique de MIKE 21 FM;
4. Calibrage du modèle numérique à l'aide des mesures de niveaux horaires disponibles aux trois stations du lac;
5. Utilisation du modèle calibré pour évaluer les surcotes et décotes maximales et l'impact de l'abaissement du niveau d'eau de 16,5 pi à 15,5 pi;
6. Modélisation d'une tempête synthétique de 40 km/h en provenance de huit directions différentes couvrant la rose des vents pour évaluer les surcotes/décotes au pourtour du lac, identifier la station de mesure la plus représentative du niveau moyen du lac, et mettre au point une nouvelle équation pour le calcul du niveau moyen du lac.

7.1 Analyse des niveaux d'eau horaires

Les niveaux d'eau enregistrés aux quatre heures, puis sur une base horaire, aux trois stations de mesure du lac Saint-Jean ont été fournis par Rio Tinto Alcan entre 1981 et 2014. La période de référence de l'étude d'érosion étant 1992-2014, seules ces années ont été retenues pour analyse. Pour chaque année, les niveaux d'eau en période hivernale ont été exclus, la surface du lac étant alors protégée des vents par le couvert de glace.

Les données de niveau ont été analysées et nettoyées pour éliminer celles présentant des écarts de niveau peu réalistes entre Roberval et Saint-Gédéon, et/ou Roberval et St-Henri-de-Taillon. Par exemple, les surcotes ou décotes non cohérentes avec les vents (direction et/ou vitesse) en vigueur ont été retirées de l'analyse. Un plus grand nombre de données ont été éliminées à St-Henri-de-Taillon car le puits de cette jauge n'est pas assez profond pour permettre des lectures en dessous de 98,67 m, ce qui donne lieu à des mesures incohérentes au printemps, lorsque le niveau du réservoir est bas. D'après les intervenants de Rio Tinto Alcan, il n'est pas rare que les jauges présentent des problèmes de fonctionnement, notamment en période de tempête lorsque les puits de jauge ont tendance à s'ensabler. Au total, 739 données ont été éliminées à Saint-Gédéon et 1 582 données ont été éliminées à St-Henri-de-Taillon, sur un ensemble de 121 128 données.

Les figures 7.2 et 7.3 présentent, en pourcentage et en nombre, la fréquence par classes de surcotes et décotes obtenues aux stations de Saint-Gédéon et de Saint-Henri-de-Taillon. Les écarts de niveaux sont de ± 10 cm dans 97,6% des cas à Saint-Gédéon et dans 97,9 % des cas à Saint-Henri-de-Taillon.

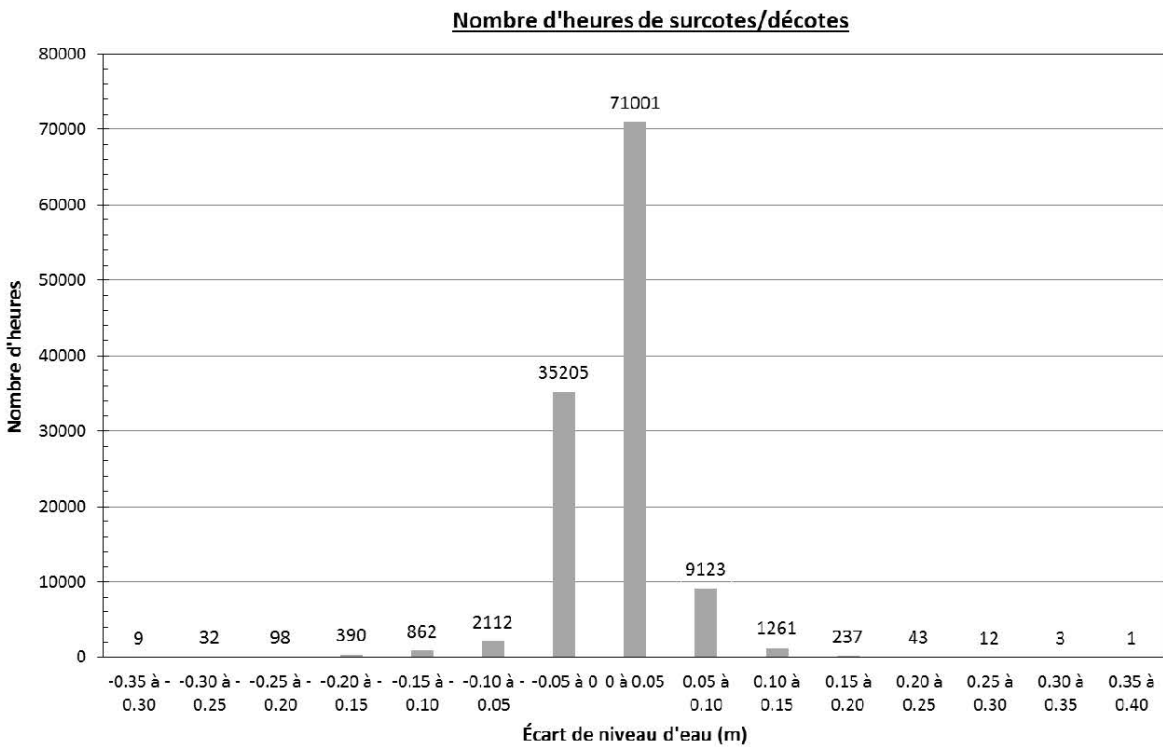
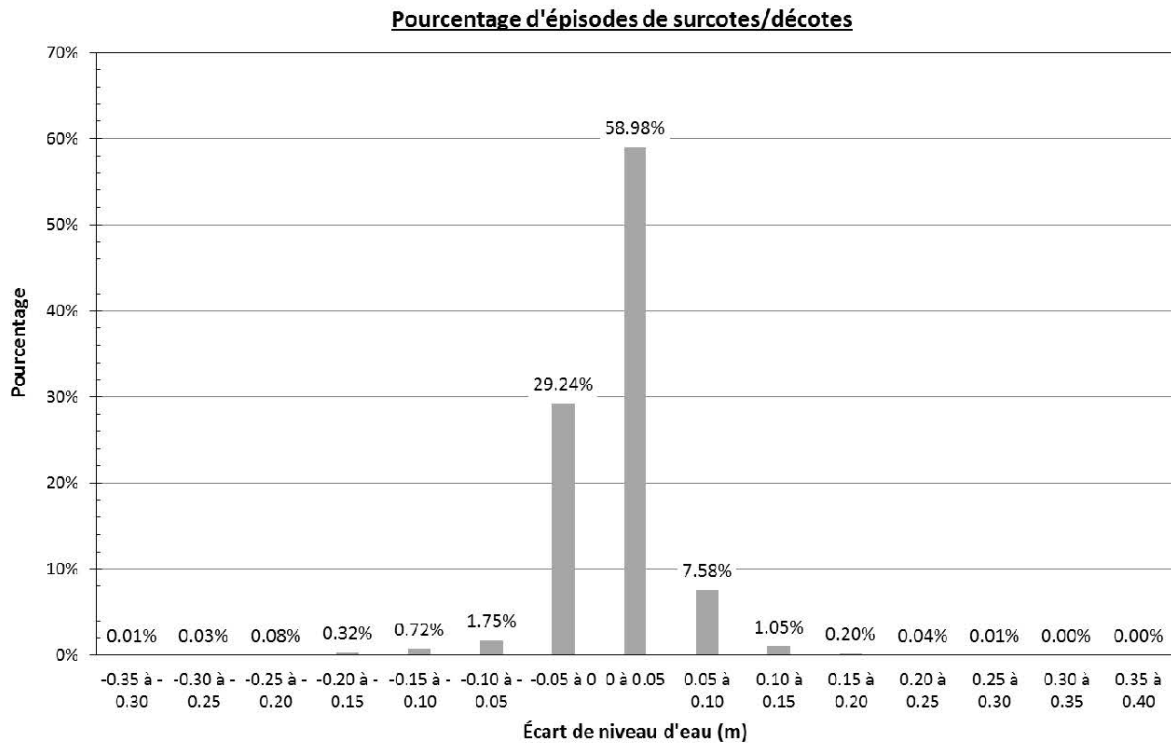


Figure 7.2: Distribution des écarts de niveaux entre Saint-Gédéon et Roberval de 1992 à 2014

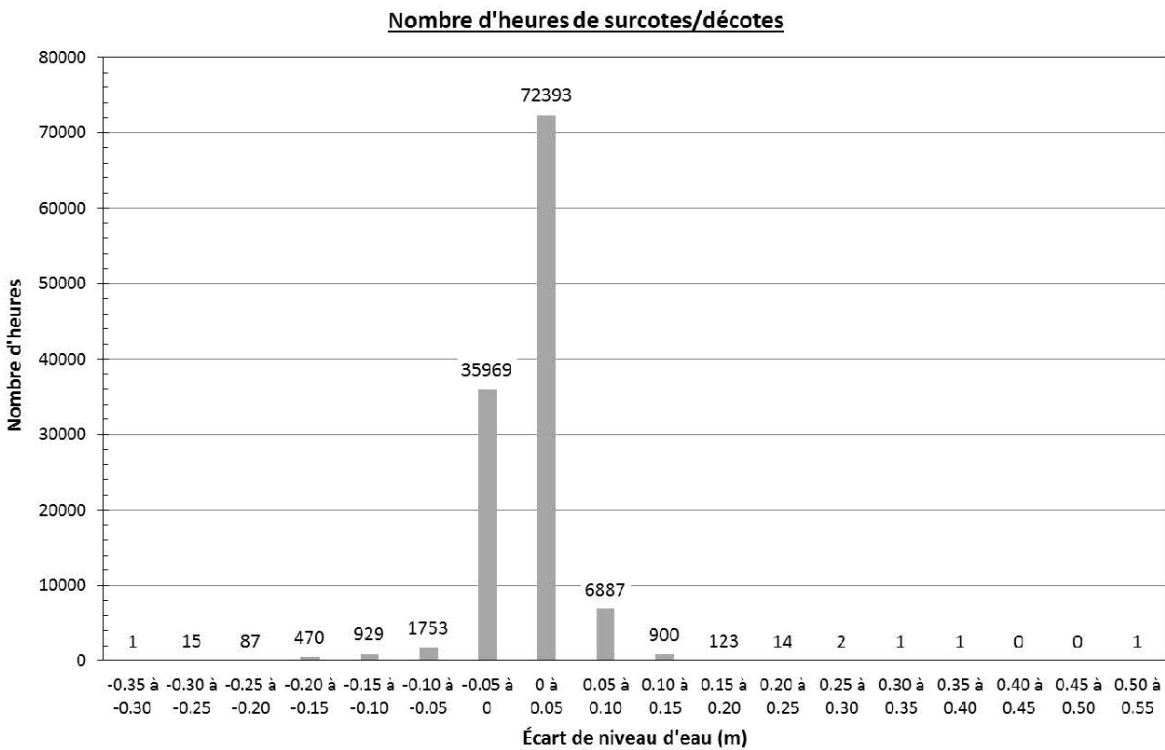
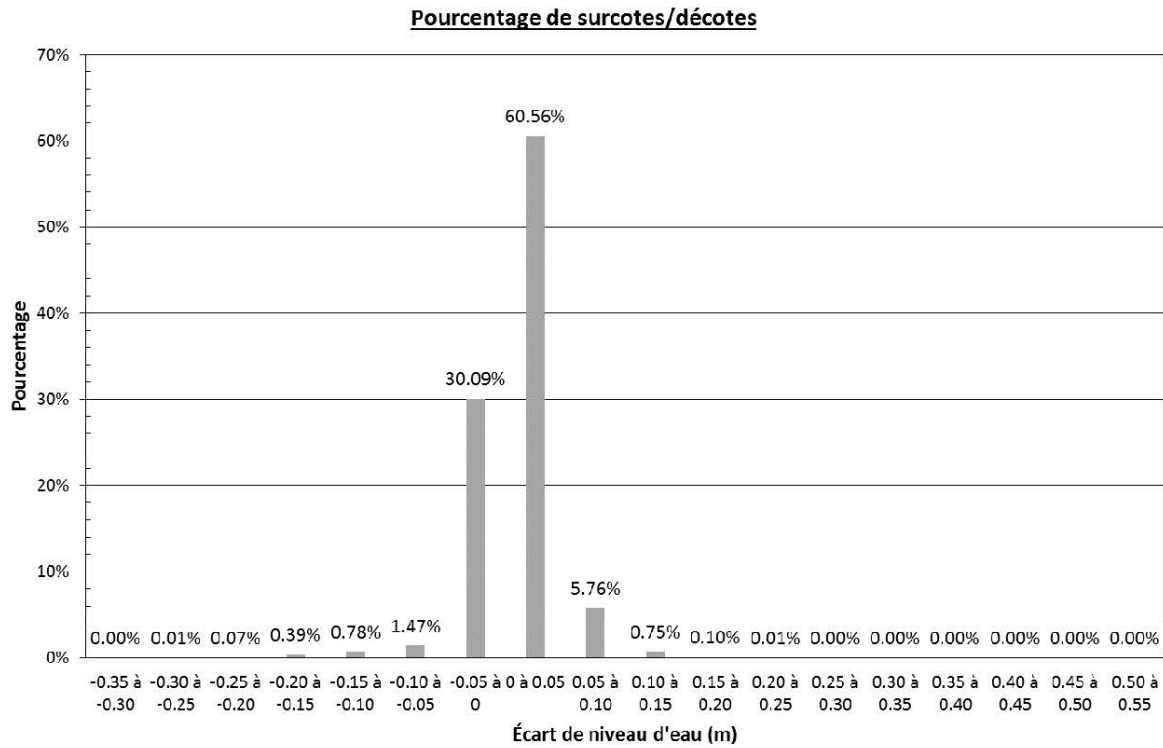


Figure 7.3: Distribution des écarts de niveaux entre St-Henri-de-Taillon et Roberval de 1992 à 2014

L'analyse présentée ci-haut a été réalisée pour faire ressortir les tendances générales et non les extrêmes, et il convient de s'attarder davantage aux valeurs moyennes qu'aux cas exceptionnels. De plus, l'analyse est basée sur la mesure de niveaux à trois emplacements seulement, et ne reflète pas forcément les surcotes observées partout autour du lac ou dans les embouchures des rivières.

L'évolution en fonction du temps des écarts de niveau entre les stations de Saint-Gédéon et St-Henri-de-Taillon par rapport à Roberval a également été examinée pour déterminer si la fréquence des épisodes de surcotes montrait une tendance à la hausse ou non ces dernières années. Tel qu'illustré à la figure 7.4, il n'y a rien dans les données pour indiquer que c'est bien le cas.

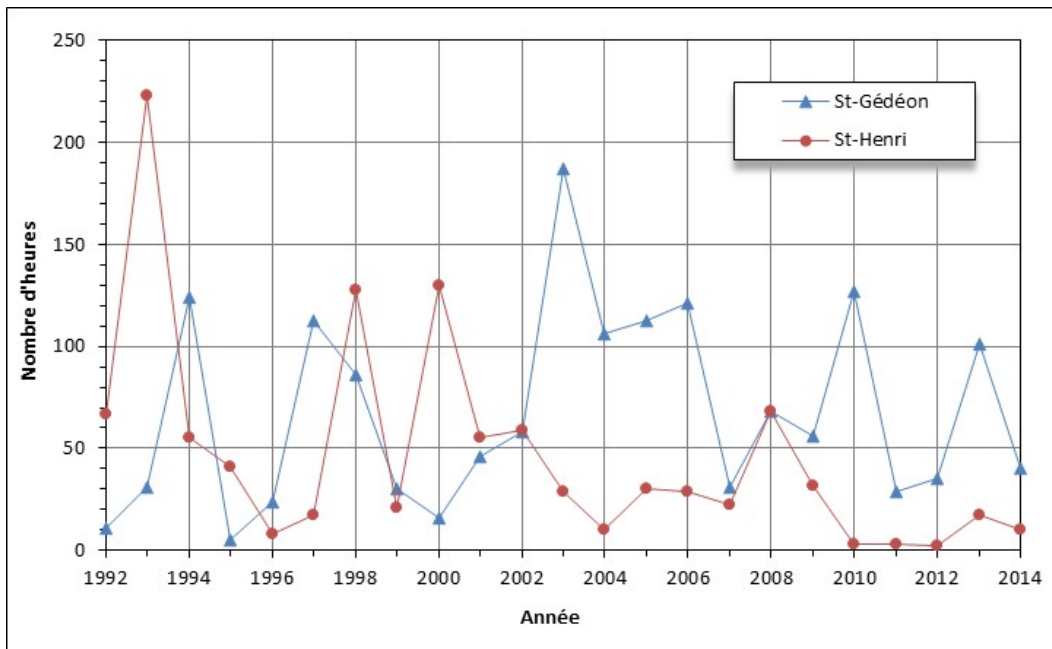


Figure 7.4: Nombre d'heures de surcotes supérieures à 10 cm

7.2 Modélisation de la variation du niveau liée aux vents

L'analyse des niveaux d'eau enregistrés aux trois stations de mesure du lac Saint-Jean permet de connaître les variations de niveau du lac aux trois stations en question. Elle ne permet toutefois pas d'évaluer quelles sont les surcotes et décotes en d'autres endroits du lac. Pour ce faire, un modèle numérique a été développé, calibré puis opéré selon différents scénarios de tempête.

7.2.1 Outil de modélisation

La simulation de la variation du niveau d'eau causée par le vent a été réalisée à l'aide du module hydrodynamique de MIKE 21, développé et commercialisé par la firme danoise *DHI Water & Environment*. Ce modèle est conçu pour simuler les écoulements à surface libre en milieux marins, côtiers et estuariens.

Il repose sur une formulation bidimensionnelle des équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement.

Avec un forçage externe imposé aux frontières du modèle sous la forme d'un niveau d'eau initial de même que sur l'ensemble de la surface libre (champs de vent et de pression atmosphérique), le modèle numérique prédit à chaque maille de calcul du domaine modélisé le niveau d'eau et la vitesse d'écoulement intégrée sur la verticale.

Pour le lac Saint-Jean, les champs de pression atmosphérique n'ont pas été simulés, la zone modélisée étant trop petite pour présenter des variations importantes de ce paramètre.

La bathymétrie numérique du domaine modélisé est décrite à la section 6.3.

7.2.2 Épisodes de tempête

Les épisodes de tempête significatifs des dix dernières années ont été passés en revue dans le cadre de l'étude réalisée par la firme CRI (réf. [6], volume 4 du rapport d'étude). En considérant leurs caractéristiques (durée, stabilité, direction, vitesse) et les écarts de niveau correspondants, quatre de ces tempêtes ont été retenues pour le calibrage du modèle :

- Tempête 1 : 23 au 25 novembre 2013, direction dominante entre le nord-ouest et l'ouest-nord-ouest (300 degrés), surcote maximale de 22 cm;
- Tempête 2 : 17 au 20 novembre 2013, direction passant d'un secteur compris entre l'est-sud-est et le sud-est (120 degrés) au nord-nord-ouest (337,5 degrés), surcote maximale de 18 cm;
- Tempête 3 : 9 au 12 août 2013, direction dominante de l'ouest (270 degrés), surcote maximale de 17 cm;
- Tempête 4 : 5 au 7 novembre 2007, direction dominante de l'est-sud-est (112,5 degrés), décote maximale de -17cm.

Le fait que trois des quatre tempêtes aient été choisies en 2013 ne reflète pas une tendance à la hausse récente des épisodes de surcotes (voir section 7.1). Les tempêtes de cette année ont simplement été passées en revue en premier. Le secteur ouest est davantage représenté que les autres car les tempêtes de ce secteur sont plus fréquentes.

Avec des écarts de 15 à 20 cm entre Roberval et Saint-Gédéon, ou Roberval et St-Henri-de-Taillon, les épisodes de surcotes et décotes décrits ci-hauts figurent parmi les 1-2% épisodes les plus rares en termes de fréquence (figures 7.2 et 7.3). Bien que peu fréquents, ils jouent toutefois un rôle important dans l'érosion des berges du lac.

7.2.3 Calibrage du modèle numérique

Pour la simulation de l'érosion des berges, la bonne représentation des vagues est primordiale. Le choix final du facteur de recalage et de la station de données des vents a donc essentiellement été basé sur l'exercice de validation des vagues, abordé au chapitre suivant. La comparaison des niveaux mesurés et modélisés présentait néanmoins une opportunité intéressante de procéder à un choix préliminaire.

Outre les données de vent, les principaux paramètres de modélisation qui peuvent être ajustés dans MIKE 21 HD pour faire varier les résultats sont les suivants:

- Coefficient de frottement des vents;
- Rugosité des fonds.

Tel que mentionné au chapitre 4, les vents dans la région du lac Saint-Jean sont connus grâce à trois stations météorologiques : Roberval, Normandin et Mistook. L'analyse de la firme CRI conclut que la station de Normandin est moins représentative du régime des vents sur le lac. Des deux autres stations, Mistook ressort comme étant la plus fiable. Au final, le rapport recommandait l'utilisation des données de Mistook avec un facteur de recalage de l'ordre de 1,05 à 1,1, sous réserve d'une validation à l'aide de mesures de vagues.

Pour calibrer le modèle numérique, l'épisode de tempête 1 identifié à la section précédente a d'abord été simulé avec les vents enregistrés à la station de Mistook et un facteur de recalage de 1,1. Des tests ont ensuite été faits en variant le coefficient de frottement des vents, la rugosité des fonds, et le facteur de recalage des vents.

Coefficient de frottement des vents

Les premiers tests de calibrage se sont attardés au choix du coefficient de frottement des vents, C_d . Ce coefficient est inclus dans le calcul du cisaillement induit par le vent sur la surface de l'eau. Plus les vents sont forts, plus la surface de l'eau est houleuse, et plus le soulèvement du niveau d'eau par le vent devient important. Dans MIKE 21 HD, ce coefficient peut avoir une valeur constante, ou varier linéairement entre deux valeurs limites, au-delà desquelles il demeure constant. Les valeurs par défaut dans MIKE 21 HD, établies pour des conditions rencontrées en haute mer, sont les suivantes :

- $C_d = 0,001255$ pour les vitesses de vent inférieures à 7 m/s (25 km/h);
- $C_d = 0,002425$ pour les vitesses de vent supérieures à 25 m/s (90 km/h);
- $0,001255 < C_d < 0,002425$ pour les vitesses de vent comprises entre 7 et 25 m/s.

Dans un premier temps, ces valeurs ont été utilisées pour simuler l'épisode de tempête 1 cité à la section 7.2.2. Tel qu'illustré à la figure 7.5, ces premiers résultats ne concordent pas très bien avec les niveaux mesurés à la station de Saint-Gédéon. À noter que l'exercice de calibrage a également été réalisé en parallèle pour la station de St-Henri-de-Taillon. Pour le choix des paramètres de modélisation, seuls les

résultats obtenus à Saint-Gédéon sont présentés. Les résultats pour la station de St-Henri-de-Taillon sont présentés dans la section traitant des résultats finaux.

Pour tenir compte du fait que le secteur étudié est un lac, des tests ont ensuite été réalisés avec des valeurs plus représentatives d'un environnement lacustre.

Les valeurs suivantes ont été trouvées dans la littérature :

- Lac Ontario (réf. [9]) : $0,000918 < C_d < 0,002699$ pour des vents compris entre 4 et 17 m/s (14 à 61 km/h);
- Lac Léman (réf. [10]) : $0,001748 < C_d < 0,002688$ pour des vents compris entre 7 et 17 m/s (25 à 61 km/h).

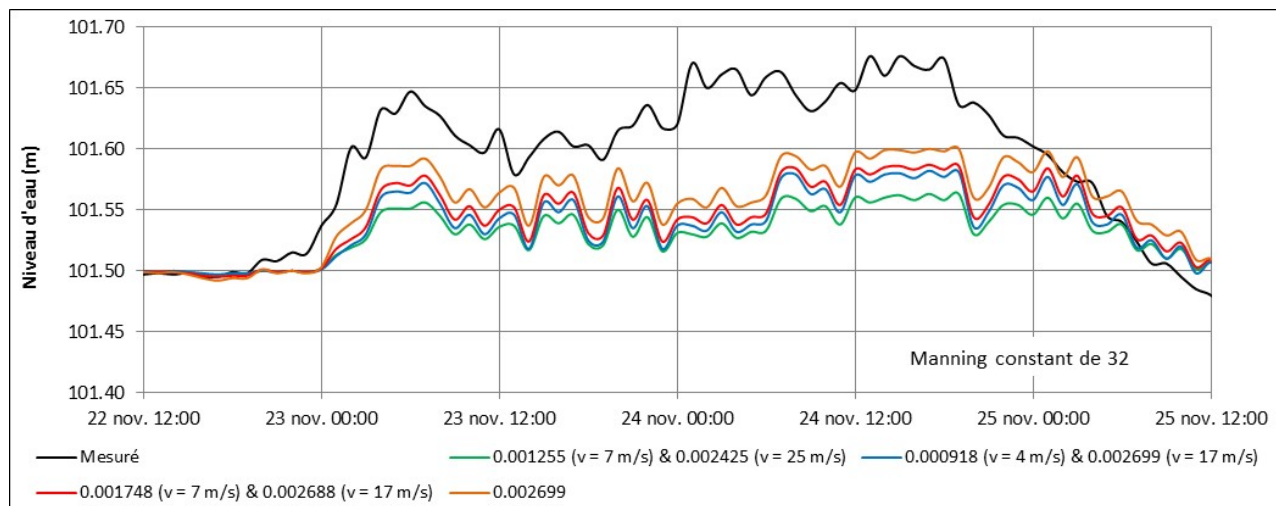


Figure 7.5: Calibrage de MIKE 21 HD – Variation du coefficient de frottement des vents

Ces essais ont permis une certaine amélioration des résultats, sans toutefois permettre de reproduire de façon satisfaisante les niveaux mesurés. Un dernier essai a été tenté avec une valeur constante correspondant au maximum trouvé dans la littérature (0,002699), sans toutefois mener à une amélioration marquée des résultats.

La variation de ce paramètre a ensuite été interrompue pour tester les autres paramètres de modélisation de MIKE 21 HD.

Rugosité des fonds

Le paramètre utilisé dans MIKE 21 HD pour caractériser la rugosité des fonds est un nombre de Manning M , dont la valeur par défaut est 32 (ou $n = 1/M = 0,031$). Ce nombre de Manning est plutôt représentatif de fonds en gravier, et il a été modifié pour tenir compte des fonds sableux du lac. Les données granulométriques trouvées dans l'étude d'impacts du PSBSJ indiquent un diamètre moyen des sables de

l'ordre de 0,5 mm (réf. [5]), ce qui se traduit par un Manning de $M = 45$ ($n = 0,022$) (réf. [11]). Tel qu'illustré à la figure 7.6, la comparaison des résultats obtenus pour ces deux rugosités de fonds donne des résultats très similaires. Les niveaux d'eau simulés dans le lac sont peu sensibles à ce paramètre, et la valeur représentative des sables ($M=45$) a été conservée pour la suite des tests.

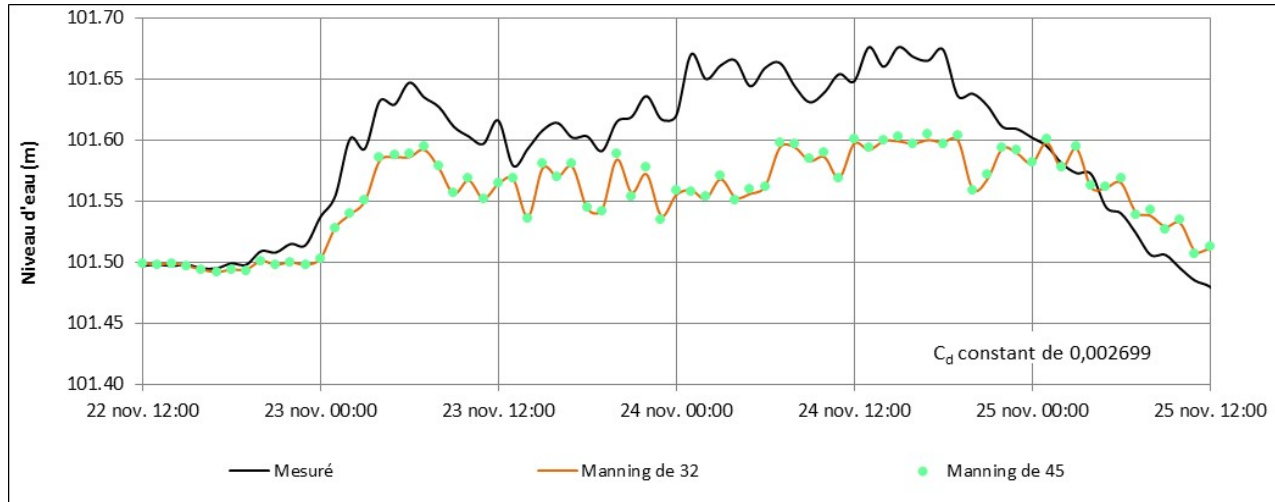


Figure 7.6: Calibrage du modèle MIKE 21 HD – Variation de la rugosité des fonds

Facteur de recalage des vents

Des données de vent fiables et détaillées ne sont que très rarement disponibles au site immédiat d'un projet à l'étude. Il est donc généralement nécessaire de faire appel aux données de stations météorologiques situées à proximité. Pour tenir compte de la distance séparant la station météorologique du site, et des caractéristiques locales des deux endroits (topographie, altitude, rugosité des sols, etc.), il est pratique courante de transposer ou de "recaler" la vitesse mesurée à la station météorologique à une valeur factorisée aux abords du site à l'étude. On utilise pour ce faire un facteur de recalage, k , qui varie d'expérience entre 0,9 et 1,3 (réf. [6]). La figure 7.7 compare les résultats obtenus avec des facteurs de recalage de 1,0, 1,1 et 1,3, en maintenant des valeurs constantes pour les paramètres de Manning et de coefficient de frottement des vents.

L'augmentation du facteur de recalage jusqu'à une valeur de 1,3 permet de minimiser les écarts sans toutefois rejoindre parfaitement les valeurs mesurées. La comparaison des données de vent aux stations météorologiques de Roberval, Normandin et Mistook a montré que les vitesses fortes des vents du secteur ouest étaient relativement homogènes entre les trois stations. Il apparaît donc peu réaliste de devoir multiplier les données de vents de Mistook par un facteur multiplicatif élevé. Le calibrage du modèle a donc été poursuivi en testant d'autres ajustements du coefficient de frottement des vents.

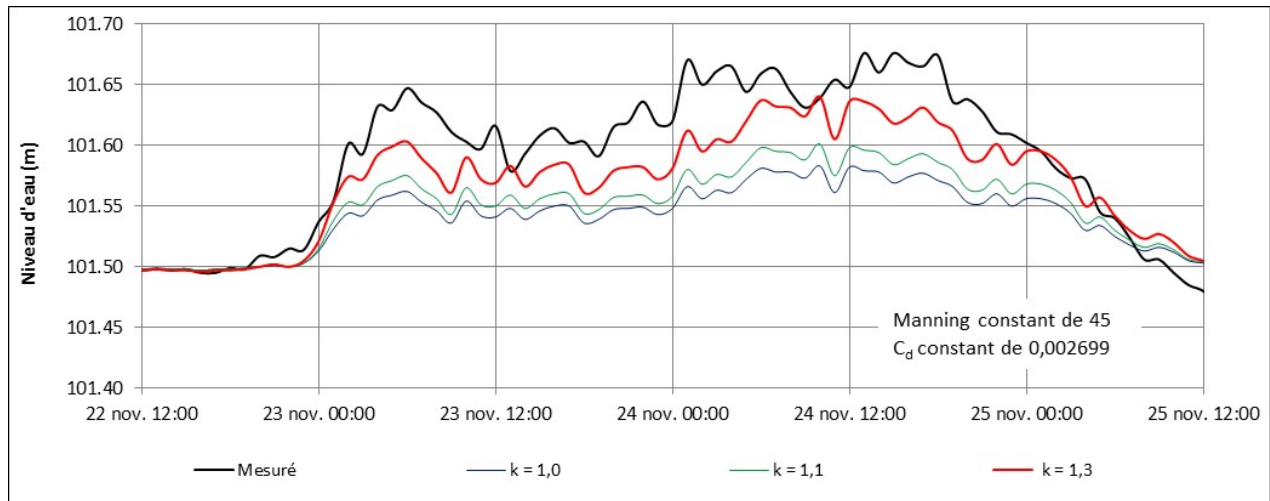


Figure 7.7: Calibrage du modèle MIKE 21 HD – Variation du facteur de recalage des vents (k)

Paramètres finaux

Sur la base des résultats obtenus précédemment, les derniers tests de calibrage ont été réalisés en revenant à une valeur plus réaliste du facteur de recalage ($k = 1,05$ ou $1,1$) et en augmentant le coefficient de frottement des vents. Des résultats satisfaisants ont finalement été obtenus en utilisant une variation linéaire de ce coefficient entre $0,002699$ et $0,004$ pour des vitesses de vents de 7 à 9 m/s, et un facteur de recalage de $1,05$. Cette combinaison permet d’avoir un facteur de recalage réaliste et de rehausser les pointes de niveau maximales. La figure 7.8 montre que les écarts entre les niveaux mesurés et simulés sont, de façon générale, inférieurs à 5 cm.

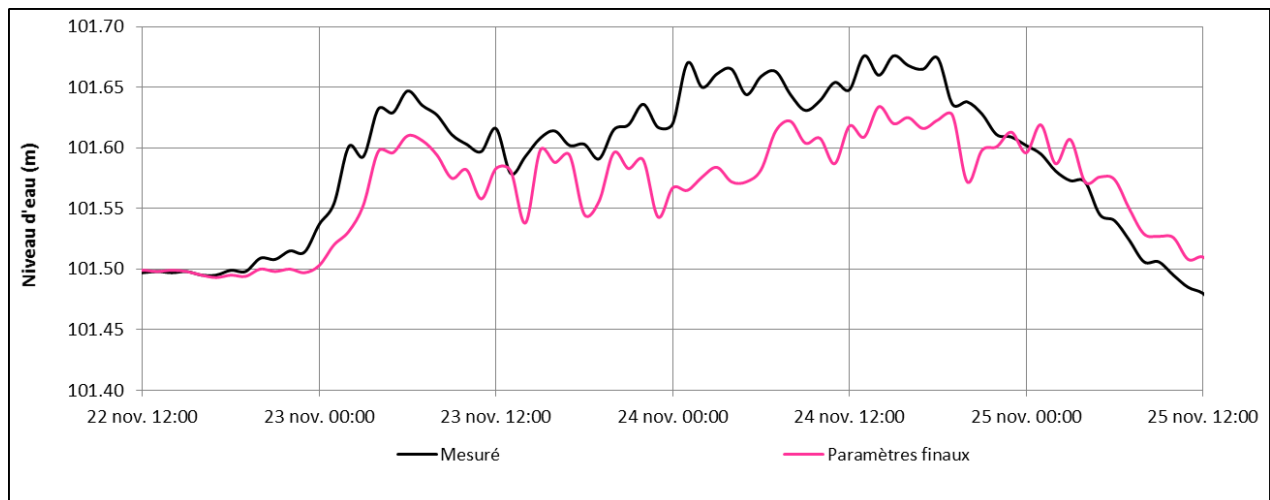


Figure 7.8: Calibrage du modèle MIKE 21 HD – Paramètres finaux

Les paramètres de modélisation finaux ont été conservés pour la simulation des trois autres tempêtes décrites à la section 7.2.2. Pour valider le choix final de la station de référence des vents, les simulations ont également été reprises avec les données de la station de Roberval. La station de Normandin n'a pas été vérifiée, sur la base des recommandations du rapport de l'analyse des vents (réf. [6]).

Les écarts de niveau mesurés entre la jauge de Roberval et les jauges de Saint-Gédéon et de St-Henri-de-Taillon sont comparés aux résultats du modèle numérique générés avec les vents de Mistook et de Roberval aux figures 7.9 à 7.16.

Pour permettre une meilleure compréhension des écarts ponctuels parfois observés entre les mesures et les résultats de modélisation, ces figures présentent également les caractéristiques des vents (vitesses et directions) mesurés aux trois stations météorologiques du site.

Les résultats illustrés aux figures 7.10, 7.12, 7.14 et 7.16 montrent que l'utilisation des vents de la station de Mistook permet une meilleure représentation de la variation des niveaux d'eau du lac associée aux vents. Dans l'ensemble, le modèle numérique permet une bonne simulation des écarts de niveau d'eau entre les trois jauges du lac.

7.3 Surcotes et décotes maximales

Les écarts de niveau présentés aux figures de la section précédente sont ceux obtenus aux stations de Saint-Gédéon et St-Henri-de-Taillon par rapport au niveau de Roberval. Ils ne représentent pas nécessairement les écarts maximums ayant lieu sur le lac. Pour connaître les surcotes/décotes maximales au pourtour du lac, le modèle numérique a été mis à profit.

7.3.1 Épisodes de tempêtes historiques

Dans un premier temps, les résultats de modélisation obtenus pour les quatre épisodes de tempête utilisés pour le calibrage du modèle avec les vents de Mistook ont été traités de manière à produire une carte synthèse des écarts maximums calculés par rapport au niveau mesuré à Roberval. Puisqu'il s'agit d'épisodes réels de tempête, la direction et l'intensité des vents varient avec le temps, et la position et l'intensité des variations de niveau aussi. Les écarts de niveau présentés aux figures 7.17 à 7.20 sont les maximums obtenus en chaque point du lac, sans tenir compte du moment auquel ils surviennent. Les directions moyennes des tempêtes sont indiquées par des flèches.

De façon générale, les surcotes maximales sont obtenues à l'extrémité opposée du lac d'où provient le vent. Pour les trois tempêtes en provenance du secteur ouest (figures 7.17 à 7.19), les surcotes maximales sont ainsi obtenues dans les secteurs de Saint-Gédéon Sud et de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, et atteignent des valeurs comprises entre 15 et 20 cm. Pour la tempête de l'est-sud-est (figure 7.20), les surcotes maximales sont d'environ 35 cm. Cette tempête comporte des pointes de vent du même ordre que les autres tempêtes modélisées (40 km/h), mais sa direction est constante pendant une longue durée et coïncide avec l'axe du plus long fetch du lac. Les surcotes maximales sont obtenues à l'extrémité nord-ouest du lac, ce qui n'est pas capturé par les trois stations de mesure du niveau, qui sont relativement éloignées de cet endroit.

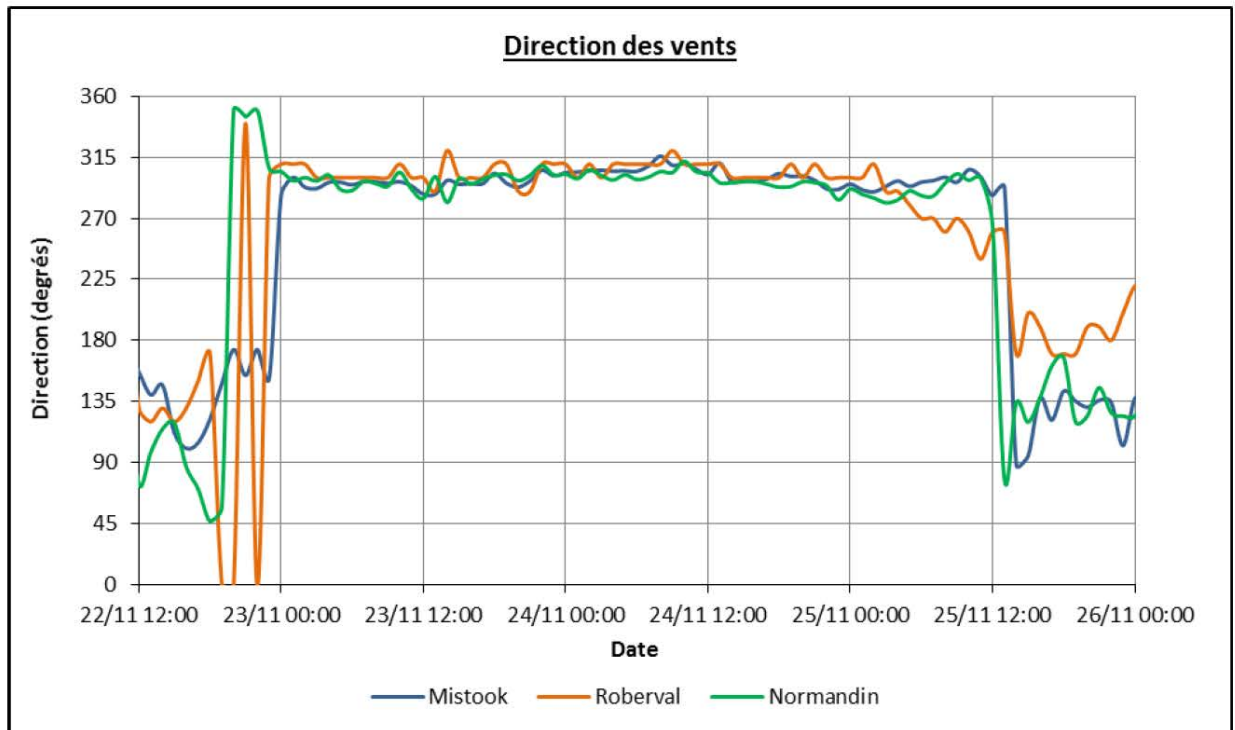
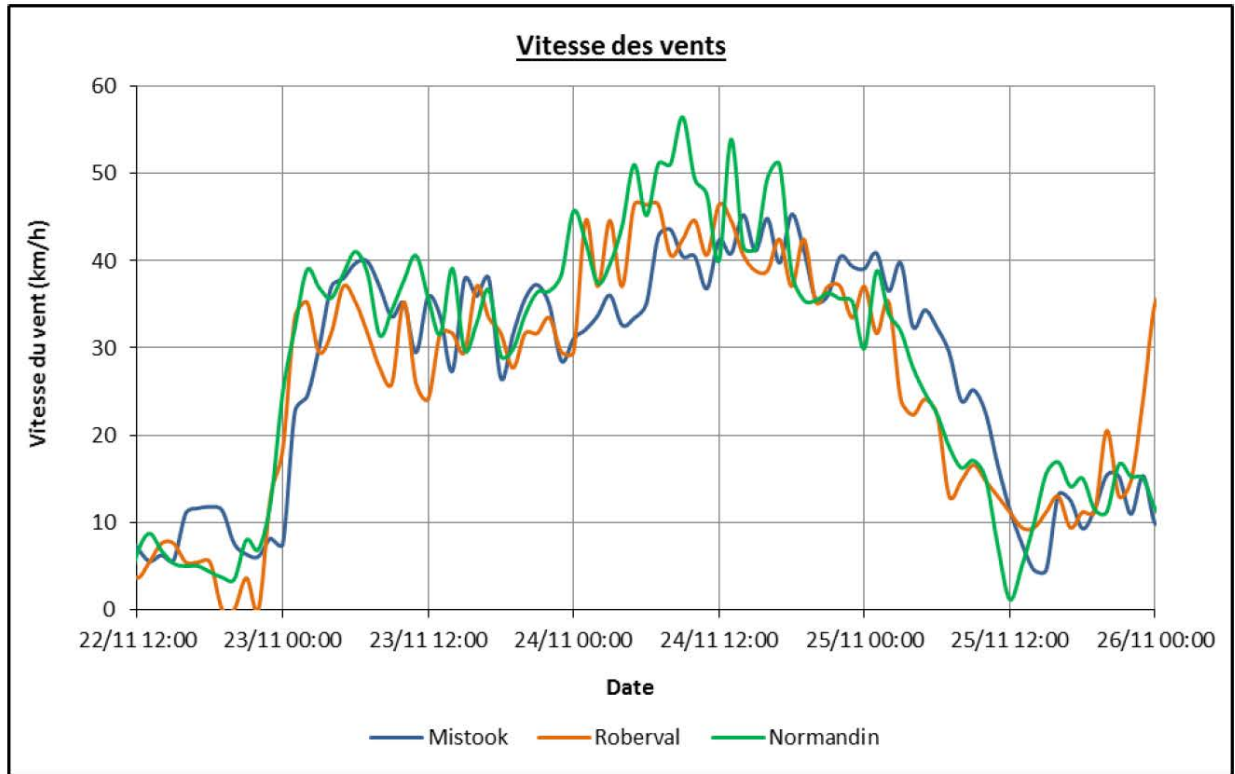


Figure 7.9: Vents enregistrés lors de la tempête du 23 au 26 novembre 2013

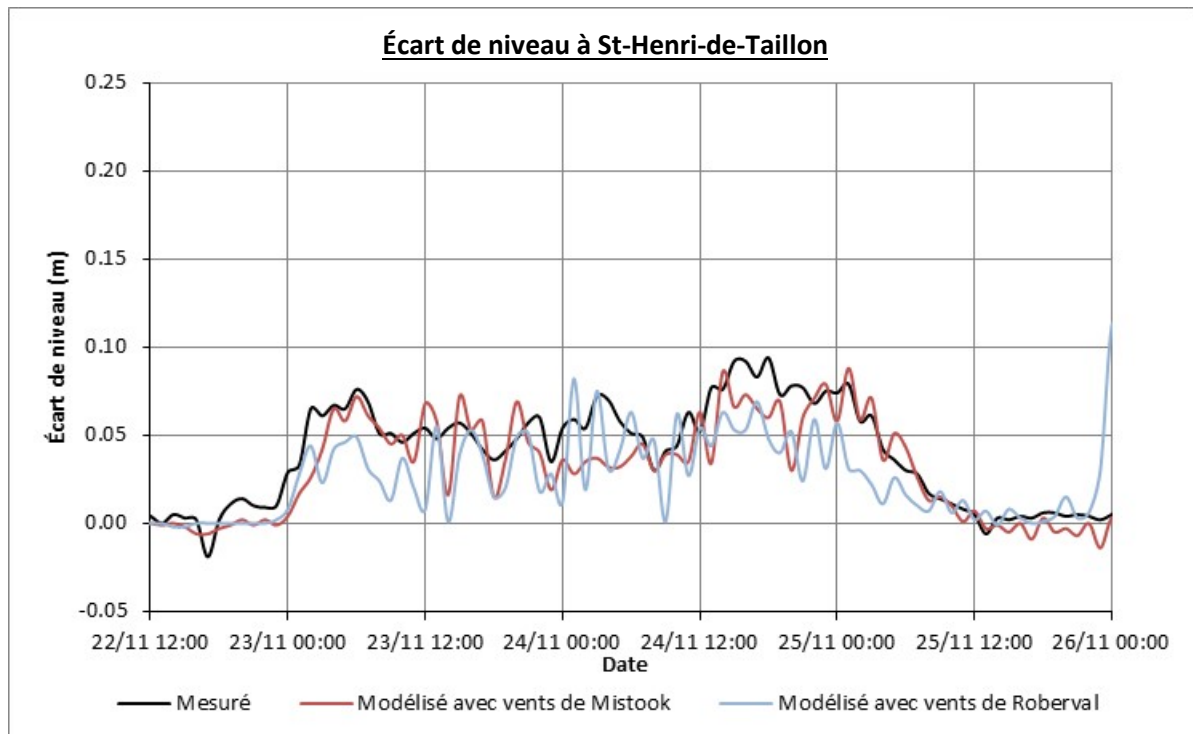
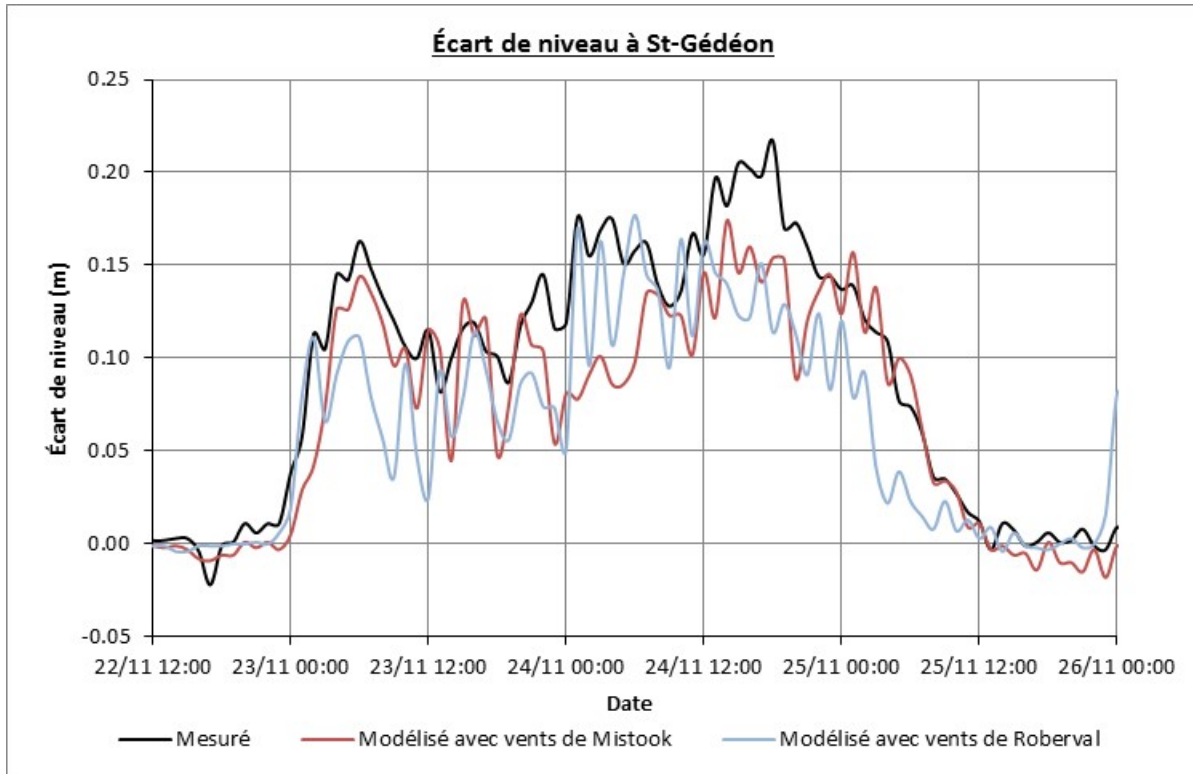


Figure 7.10: Écarts de niveau mesurés et modélisés du 23 au 26 novembre 2013

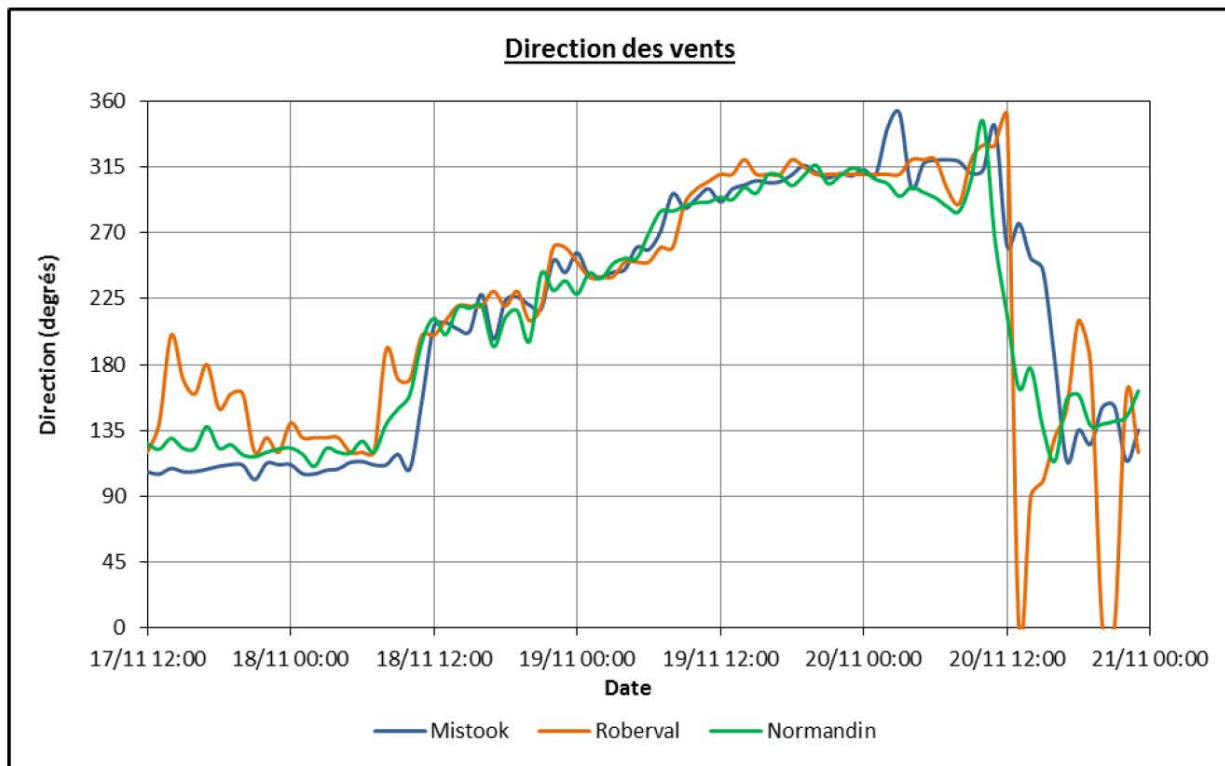
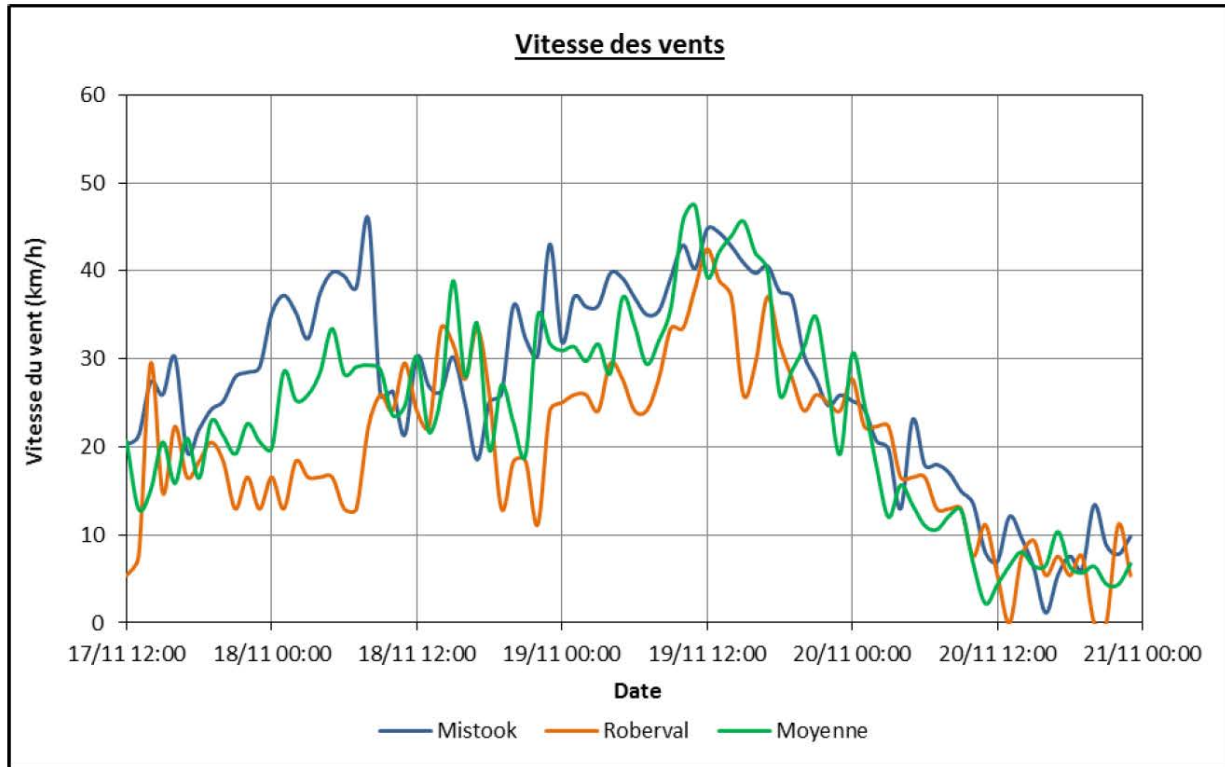


Figure 7.11: Vents enregistrés lors de la tempête du 17 au 20 novembre 2013

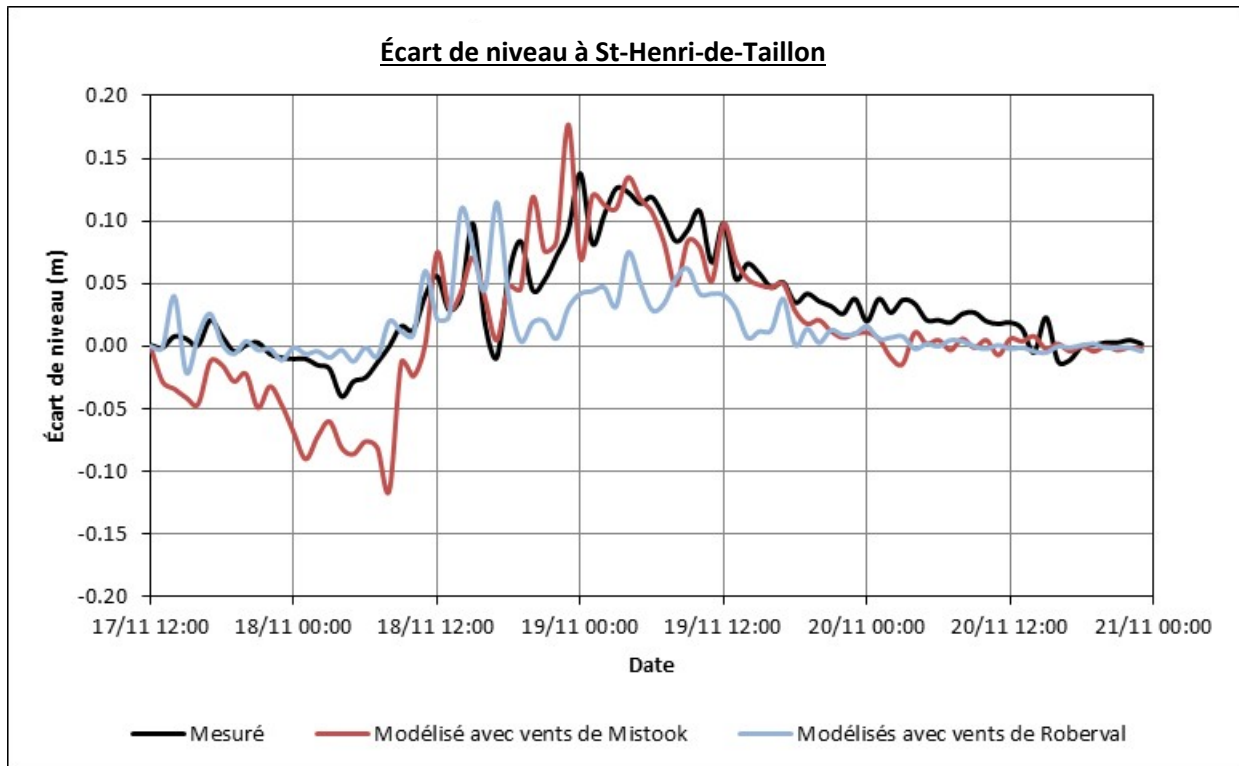
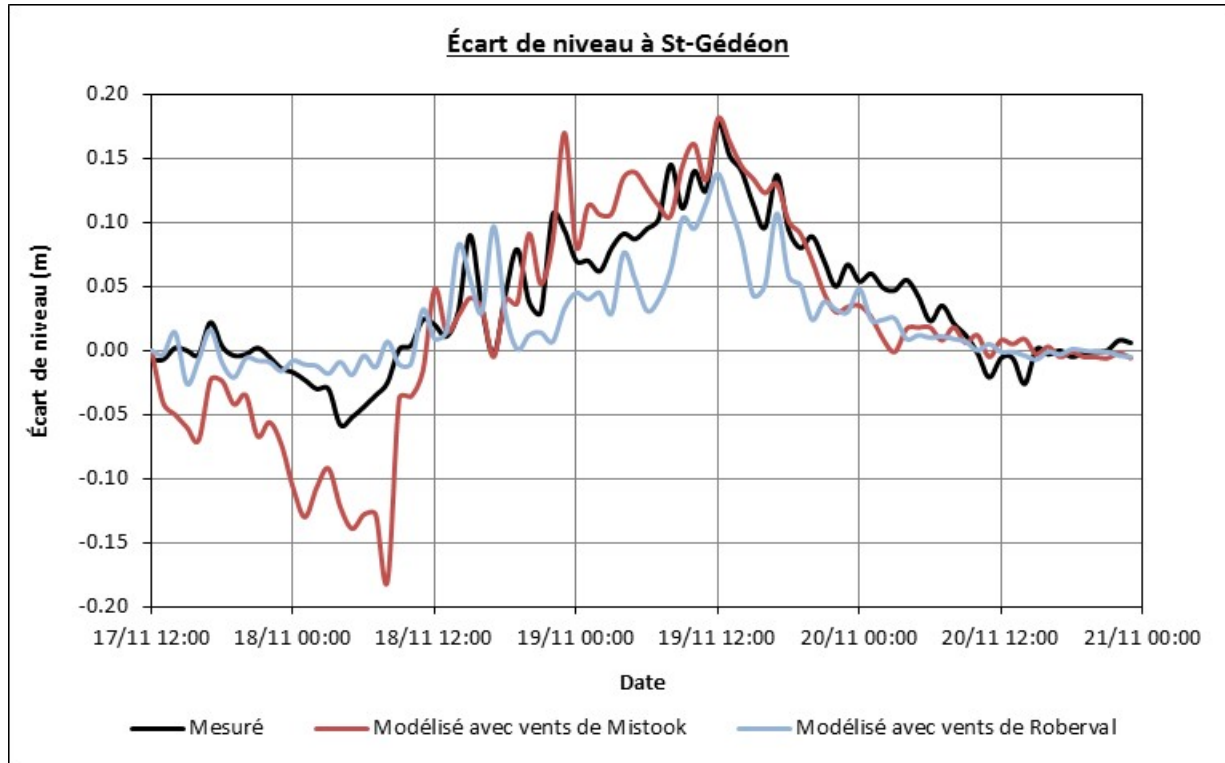


Figure 7.12 : Écarts de niveau mesurés et modélisés du 17 au 21 novembre 2013

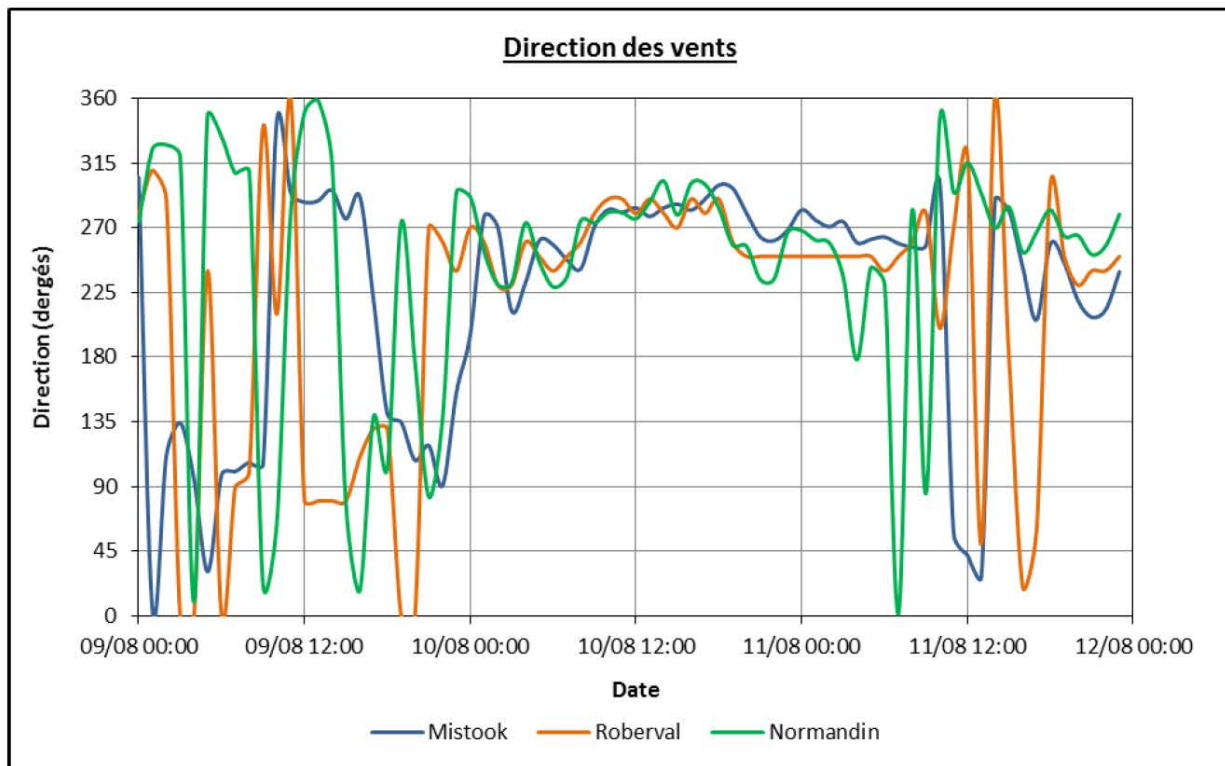
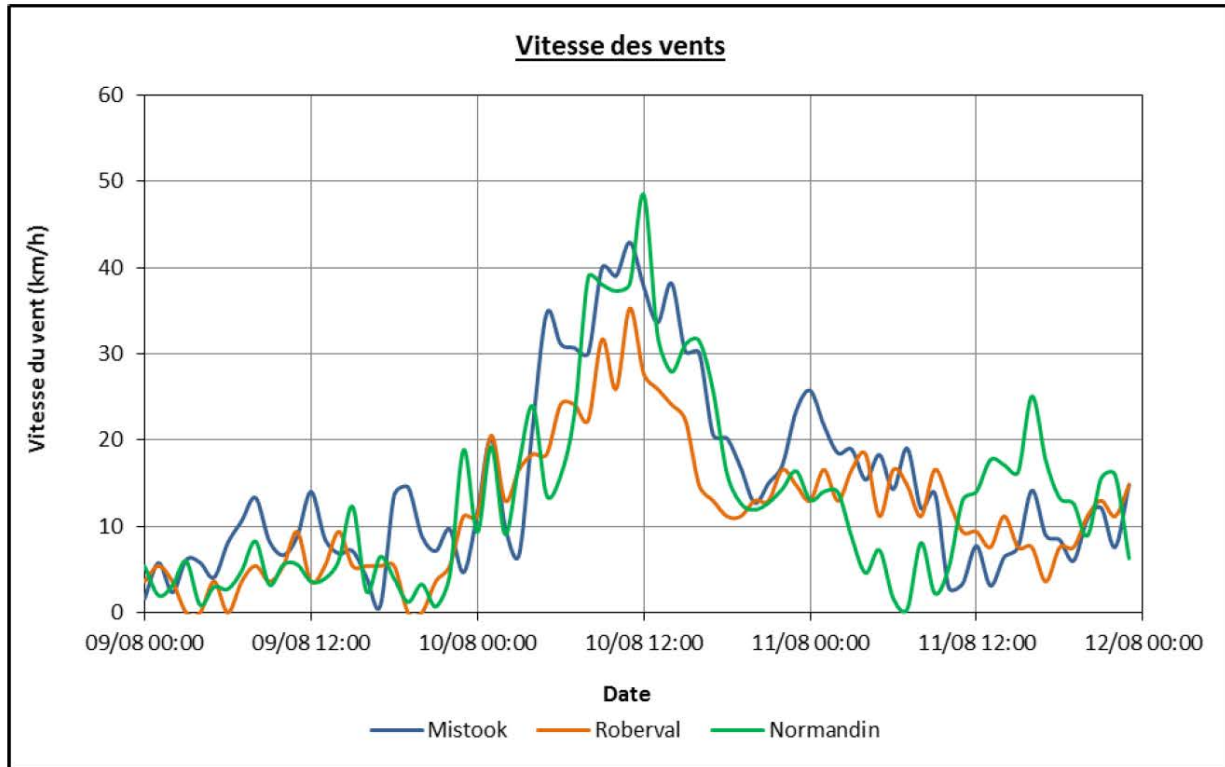


Figure 7.13: Vents enregistrés lors de la tempête du 9 au 12 août 2013

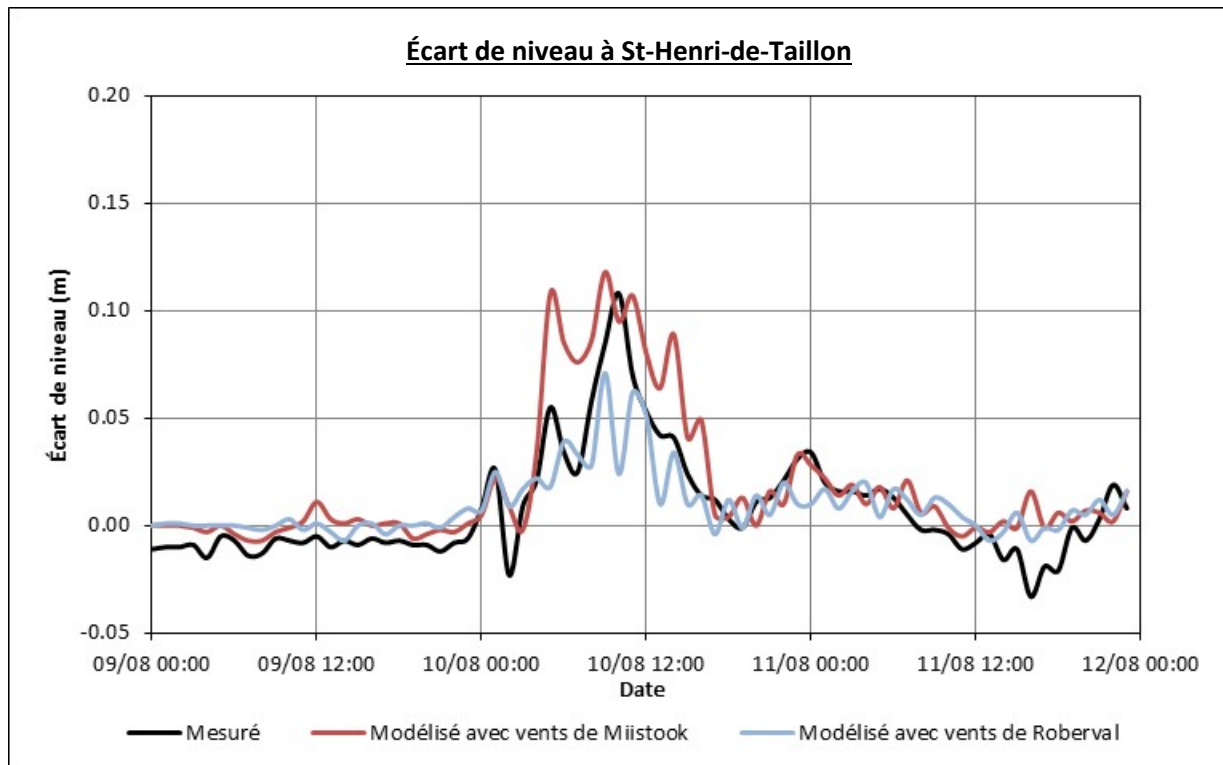
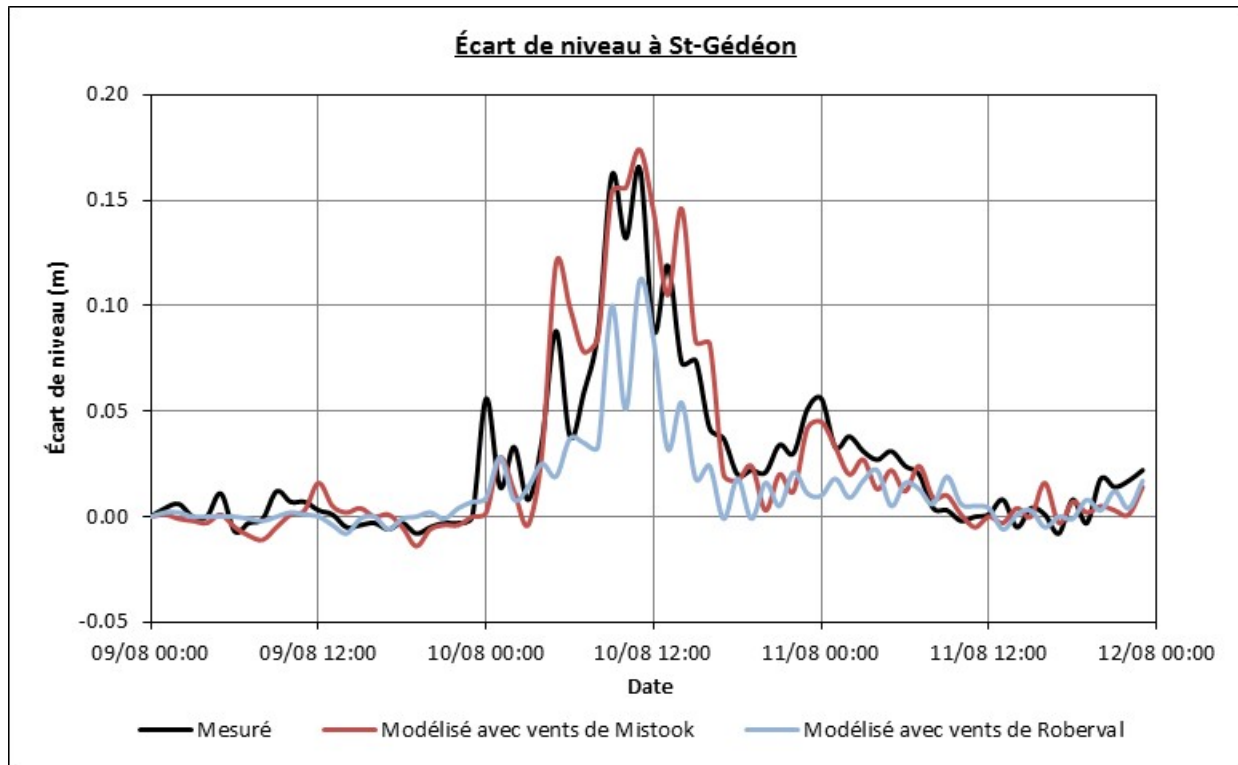


Figure 7.14: Écarts de niveau mesurés et modélisés du 9 au 12 août 2013

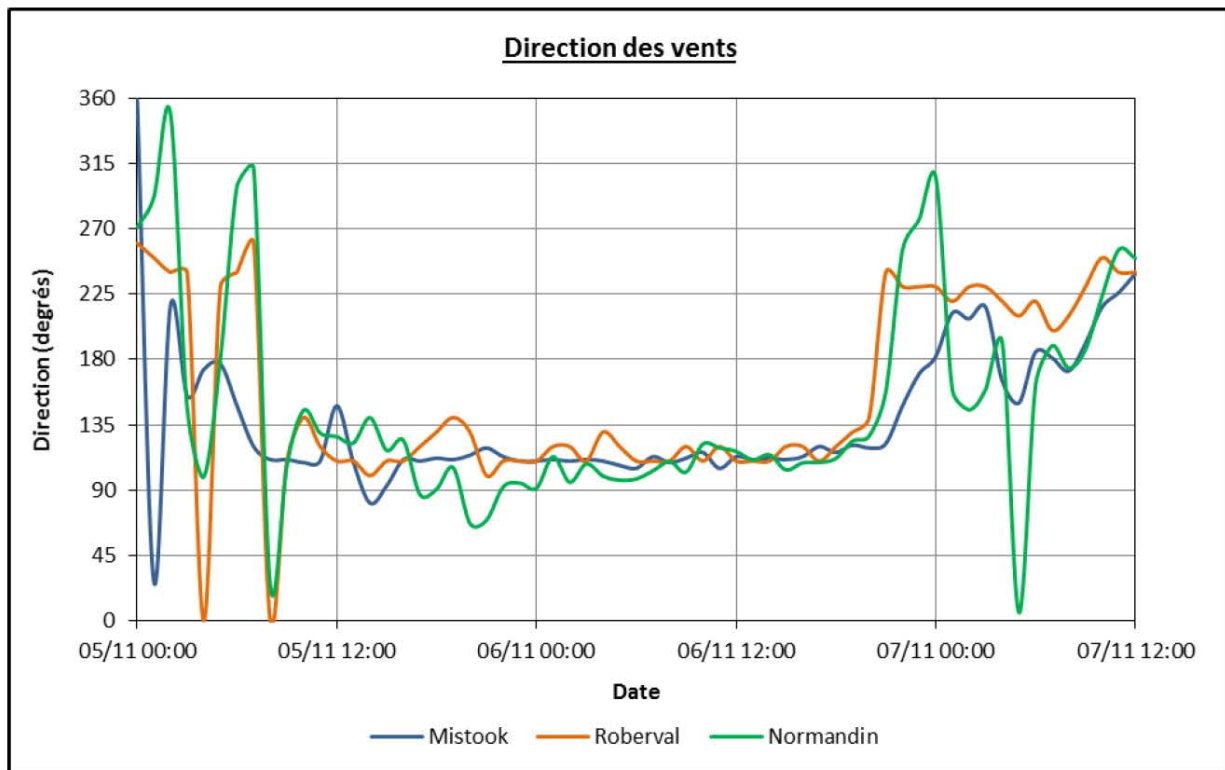
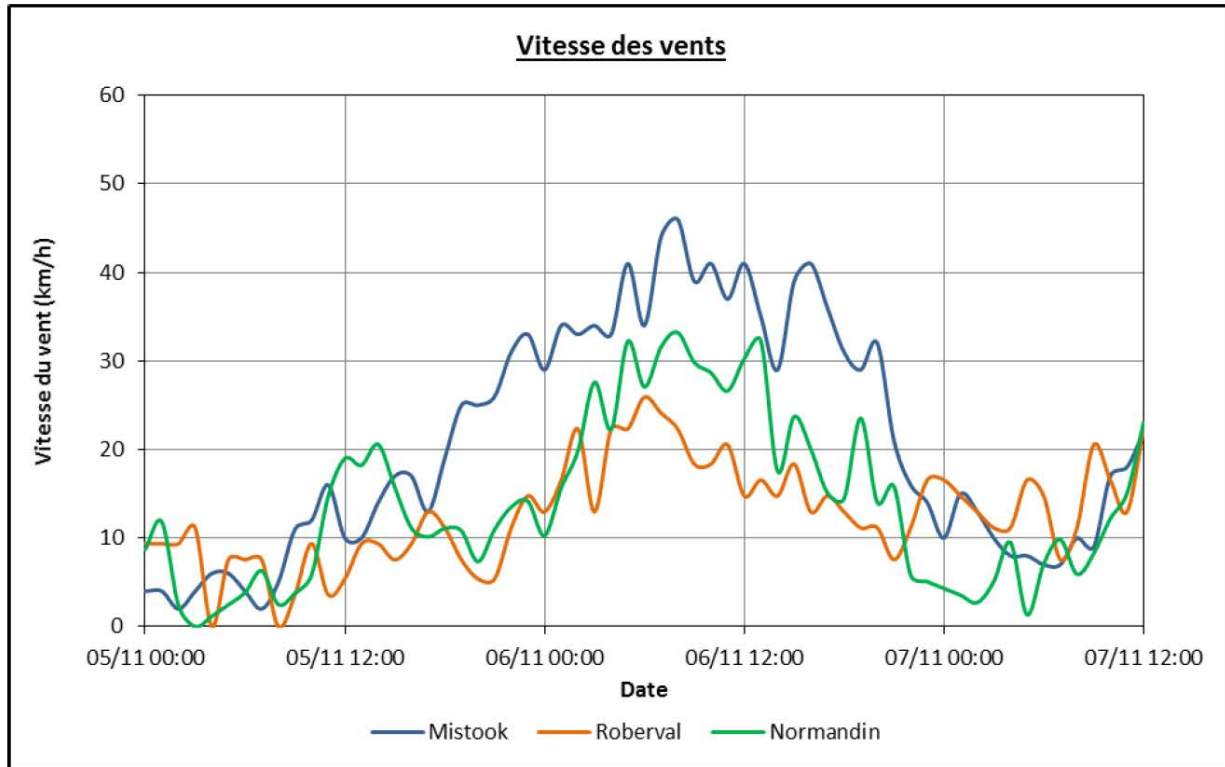


Figure 7.15: Vents enregistrés lors de la tempête du 5 au 7 novembre 2007

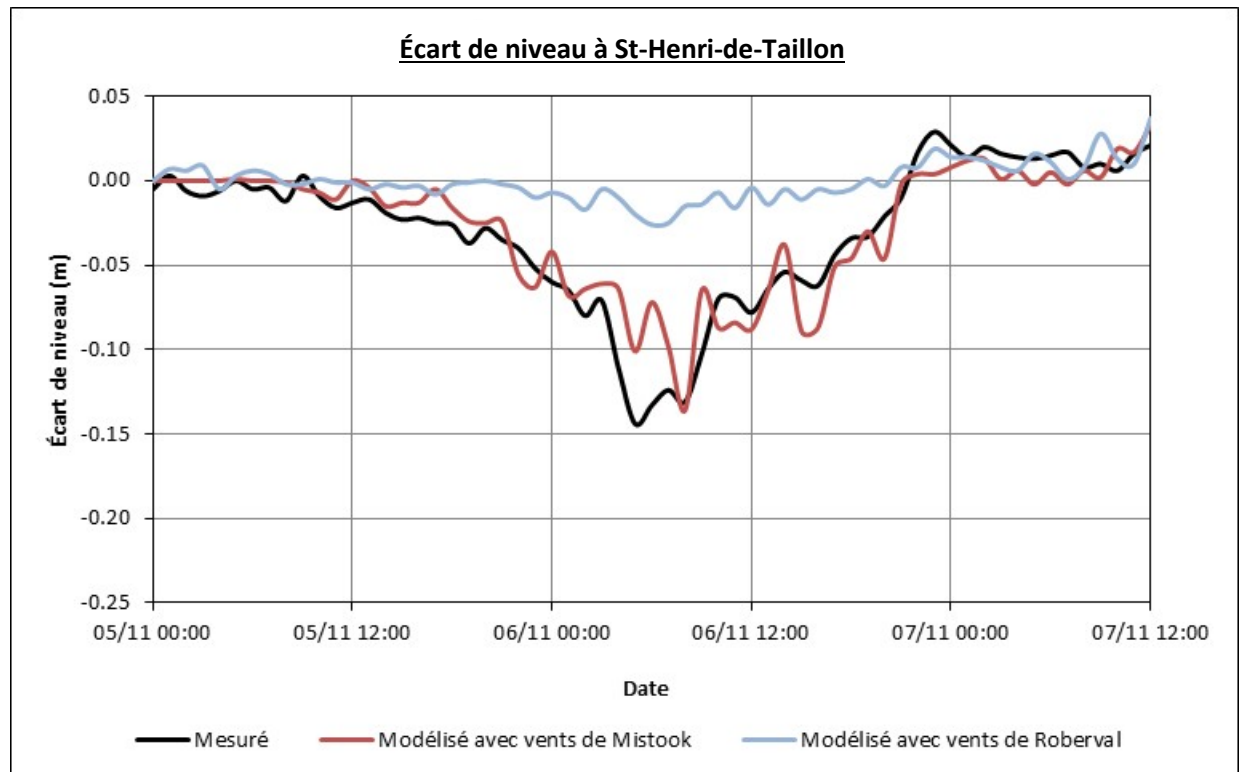
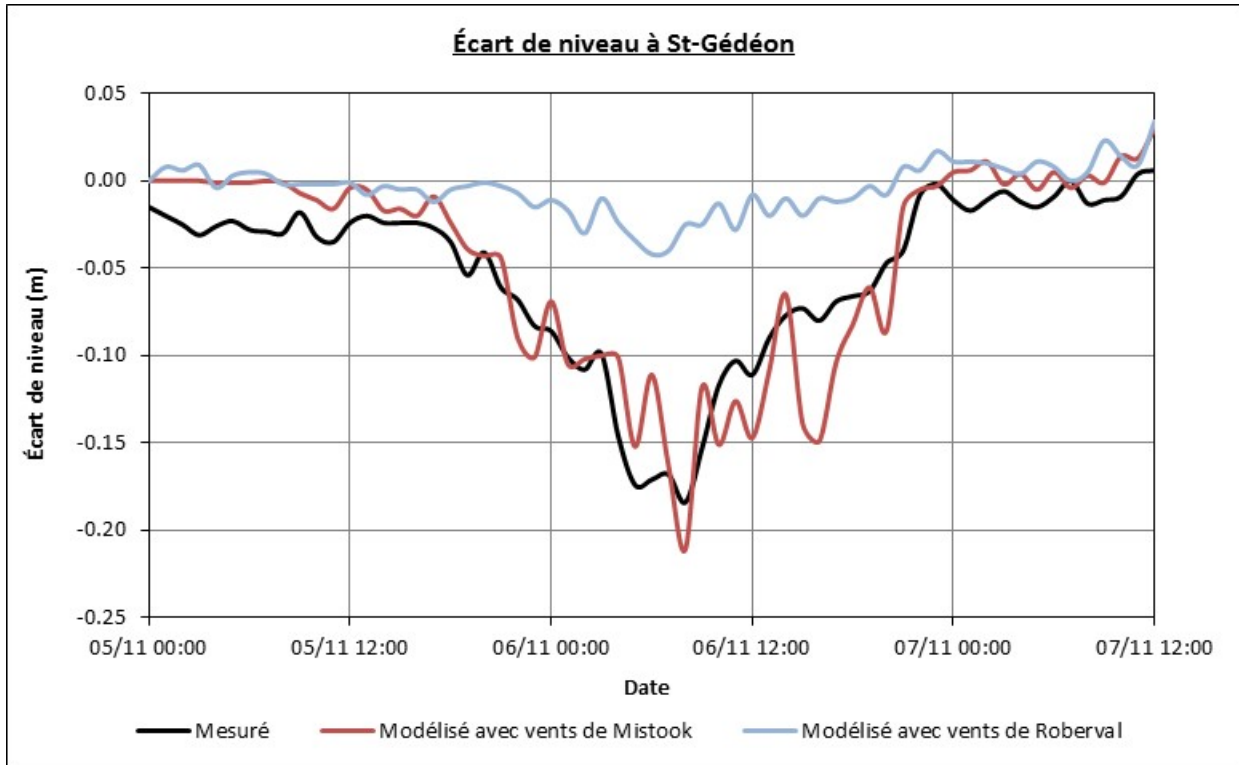


Figure 7.16: Écarts de niveau mesurés et modélisés 5 au 7 novembre 2007

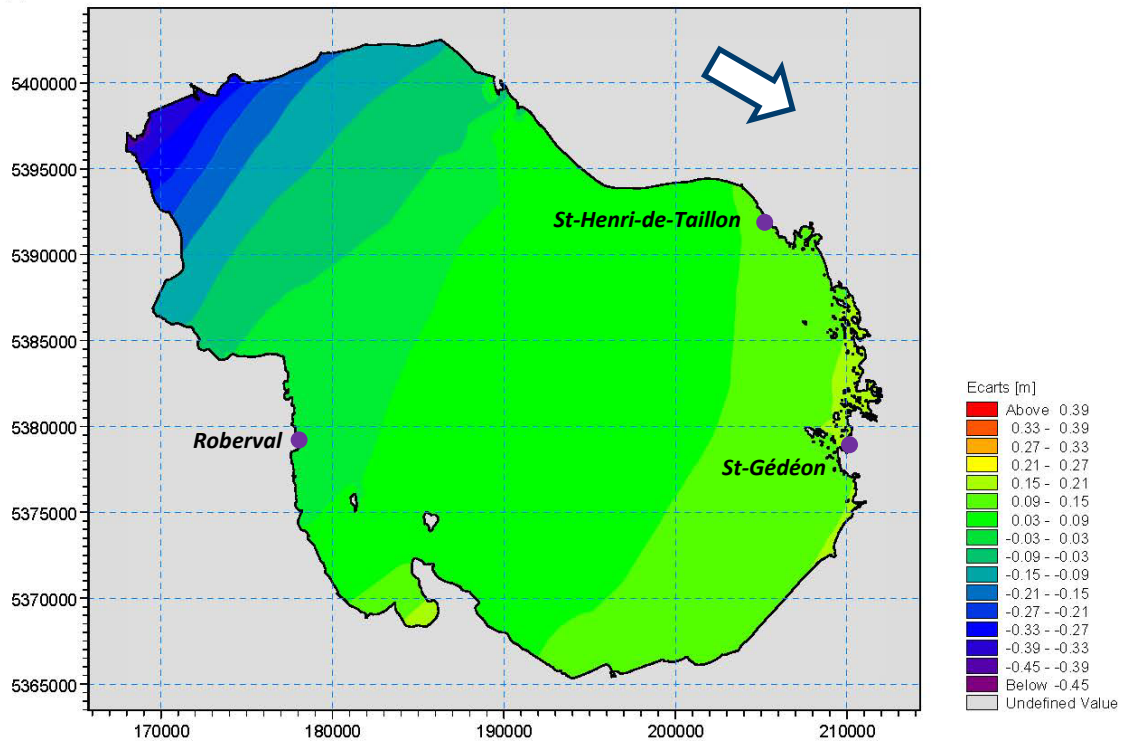


Figure 7.17: Écart de niveau maximums pour la tempête du 23 au 26 novembre 2013

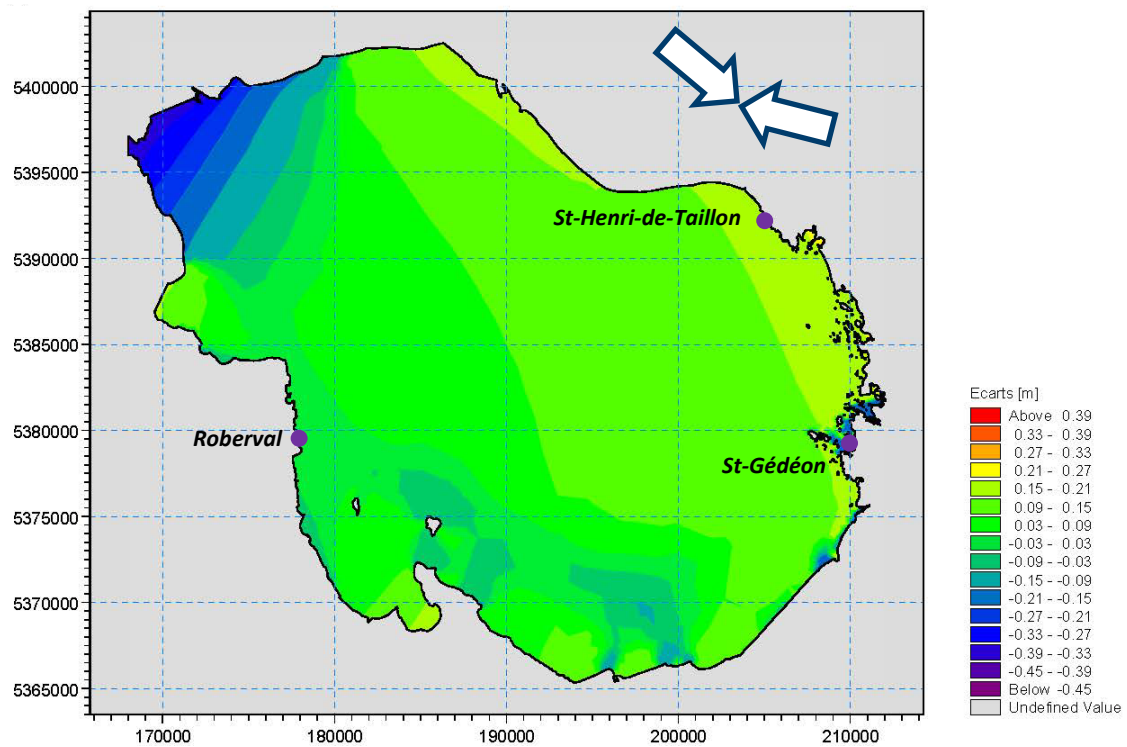


Figure 7.18: Écart de niveau maximums pour la tempête du 17 au 20 novembre 2013

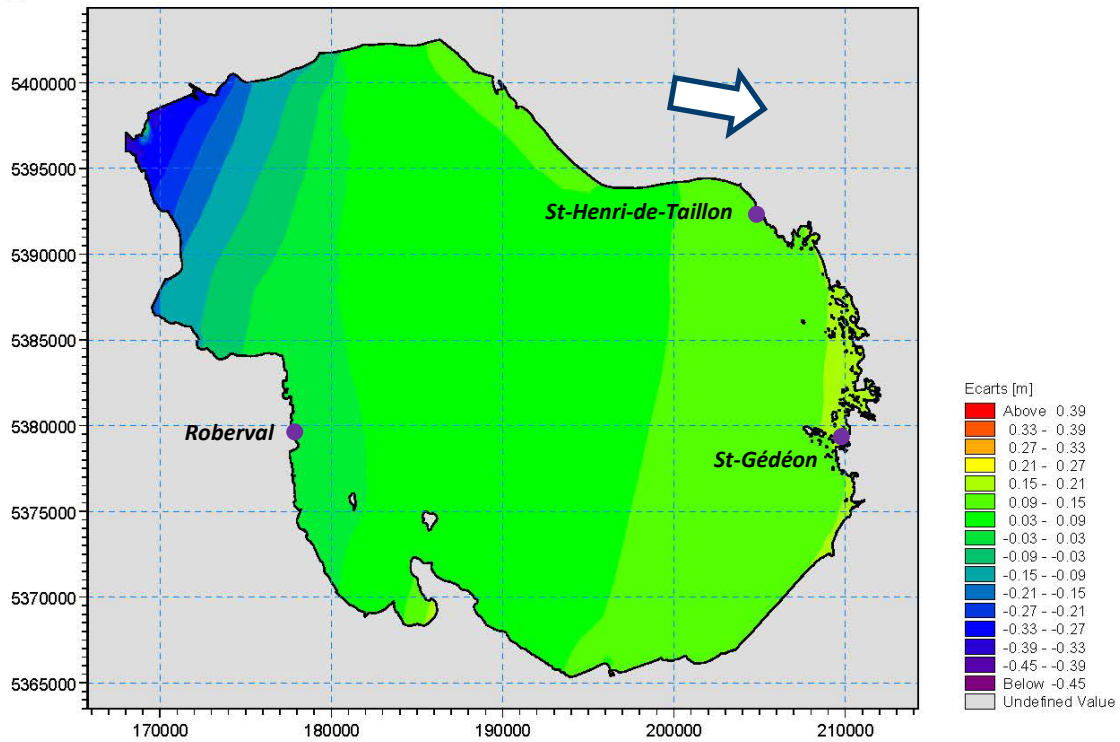


Figure 7.19: Écart de niveau maximums pour la tempête du 9 au 11 août 2013

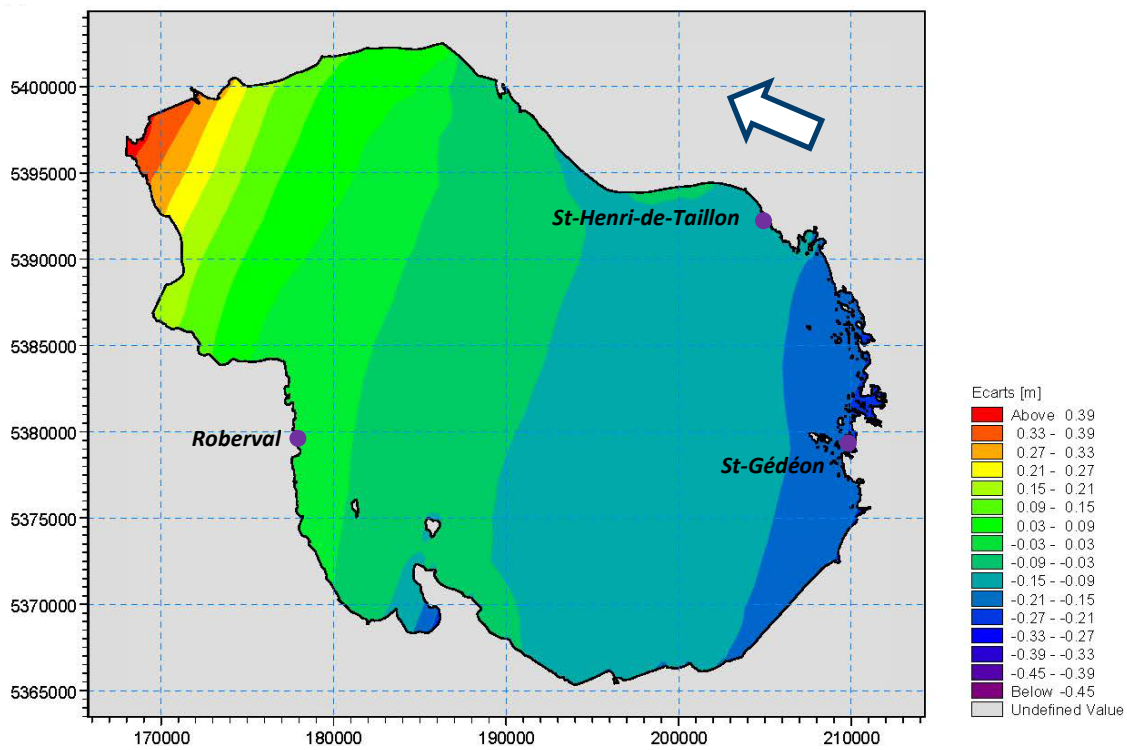


Figure 7.20: Écart de niveau maximums pour la tempête 5 au 7 novembre 2007

7.3.2 Tempête synthétique

Pour offrir une analyse plus générale des surcotes et décotes maximales du lac en fonction des directions du vent, une tempête constante de 40 km/h a été simulée selon huit directions différentes de vent. Cette vitesse de vent produit des écarts de niveau de l'ordre de 10 à 15 cm entre les jauges et elle est jugée représentative d'un épisode de vents forts, mais non exceptionnel (voir distribution des écarts, figures 7.2 et 7.3).

L'utilisation d'une tempête synthétique plutôt qu'une tempête réelle permet une lecture plus directe des résultats, les paramètres constants de durée et d'intensité permettant de vérifier l'influence de la direction des vents sur les surcotes et de généraliser les résultats sur l'ensemble du lac.

Pour chaque direction de vent, la durée de simulation a été fixée de manière à obtenir un état permanent. Un niveau initial de 16,5 pi (101,54 m) a été utilisé pour toutes les simulations. Les écarts de niveau par rapport au niveau de référence de Roberval sont présentés en images aux figures 7.21 à 7.28 et résumés sous forme graphique à la figure 7.29.

Pour chaque direction de vent simulée, il est possible de comparer les écarts de niveau obtenus aux jauges de St-Henri-de-Taillon et de Saint-Gédéon, de même que les surcotes et décotes maximales modélisées autour du lac. La localisation de ces points est généralement aux deux extrémités du lac situées dans l'axe du vent (voir figures 7.21 à 7.28).

Il est intéressant de constater à la figure 7.29 que les surcotes maximales survenant autour du lac ne sont généralement pas bien captées par les jauges, à l'exception des tempêtes en provenance des secteurs sud-ouest (SO) et ouest (O), ce qui est cohérent avec la position des stations de mesures.

D'après la figure 7.29, les surcotes les plus faibles sont obtenues pour les tempêtes du secteur nord (NO, N et NE) et les plus fortes par secteur SE (E, SE, S). Parmi celles-ci, c'est la tempête en provenance du sud-est qui produit la plus grande surcote du lac. Ainsi, pour cette direction, le niveau de référence du lac à Roberval est de 101,54 m, le niveau moyen des trois jauges est de 101,46 m, et le niveau à la pointe nord-ouest du lac à environ 101,79 m. Il est à noter que cette analyse tient uniquement compte du soulèvement du niveau d'eau dû aux vents et n'inclut pas l'effet des vagues (*runup*).

7.3.3 Analyse de sensibilité au niveau moyen du lac

Pour tester la sensibilité des surcotes/décotes au niveau moyen du lac, la simulation de la tempête du 17 au 21 novembre 2013, qui avait un niveau initial de 16,5 pi, a été reprise en abaissant le niveau initial à 15,5 pi. Les résultats de cette simulation sont présentés à la figure 7.30.

Comparativement aux résultats de la figure 7.18, obtenus avec des paramètres identiques à l'exception d'un niveau initial de 16,5 pi, les écarts maximums de la figure 7.30 sont à toute fin pratique identiques. Une comparaison des niveaux d'eau en divers points du lac n'a révélé que des écarts négligeables, de l'ordre de quelques millimètres, entre les deux simulations.

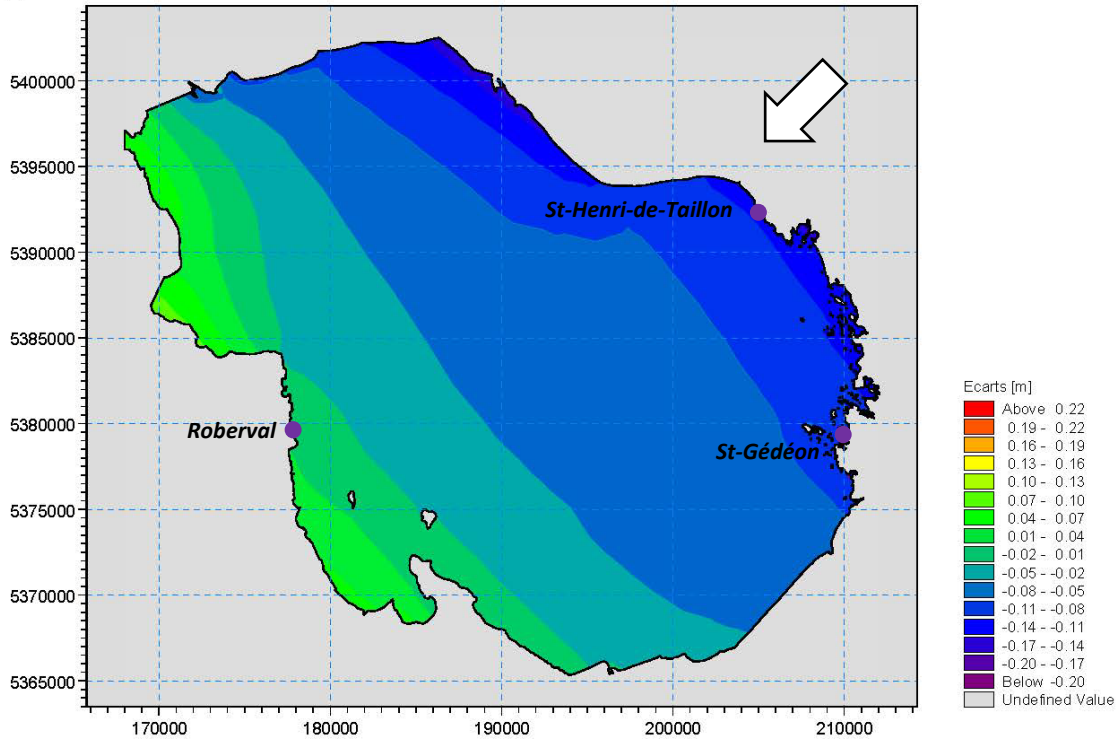


Figure 7.21: Écart de niveaux par rapport à la station de Roberval – Vents de 40 km/h du nord-est

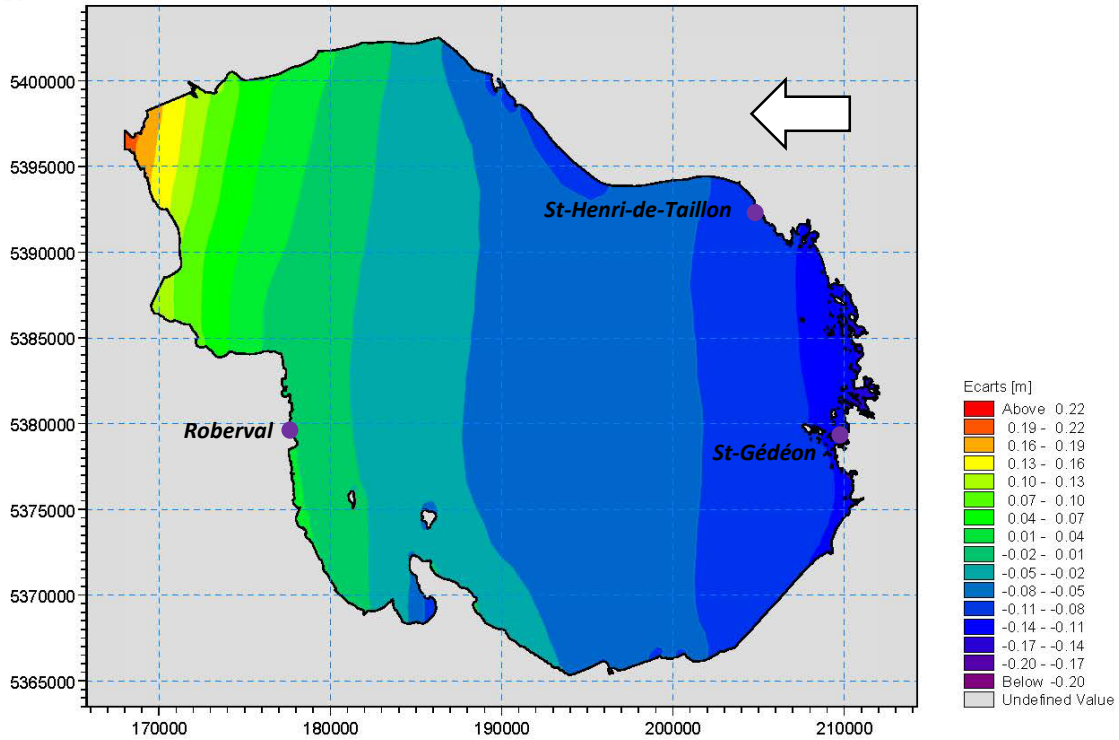


Figure 7.22: Écart de niveaux par rapport à la station de Roberval – Vents de 40 km/h de l'est

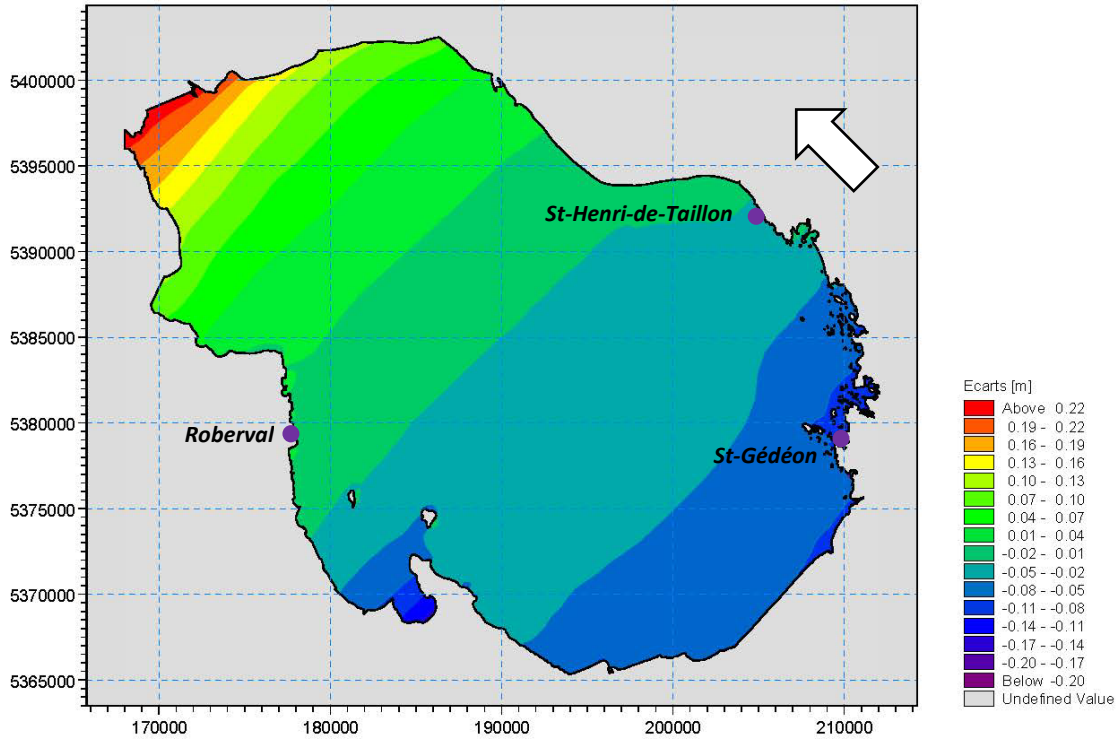


Figure 7.23: Écart de niveaux par rapport à la station de Roberval – Vents de 40 km/h du sud-est

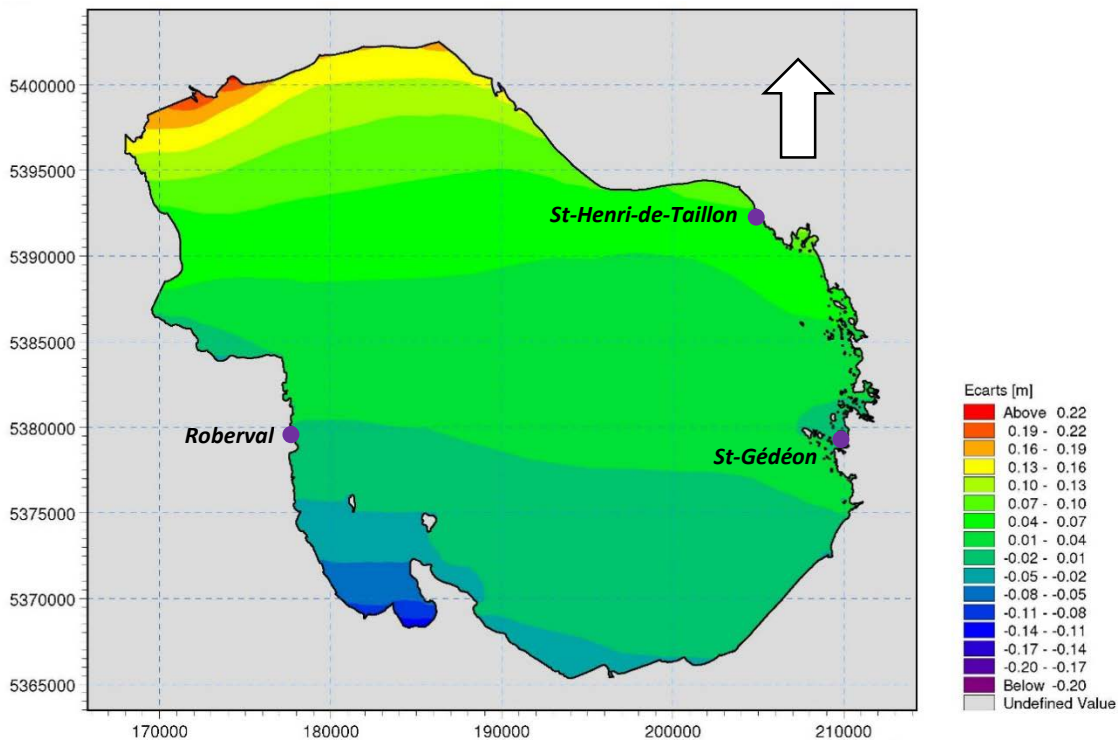


Figure 7.24: Écart de niveaux par rapport à la station de Roberval – Vents de 40 km/h du sud

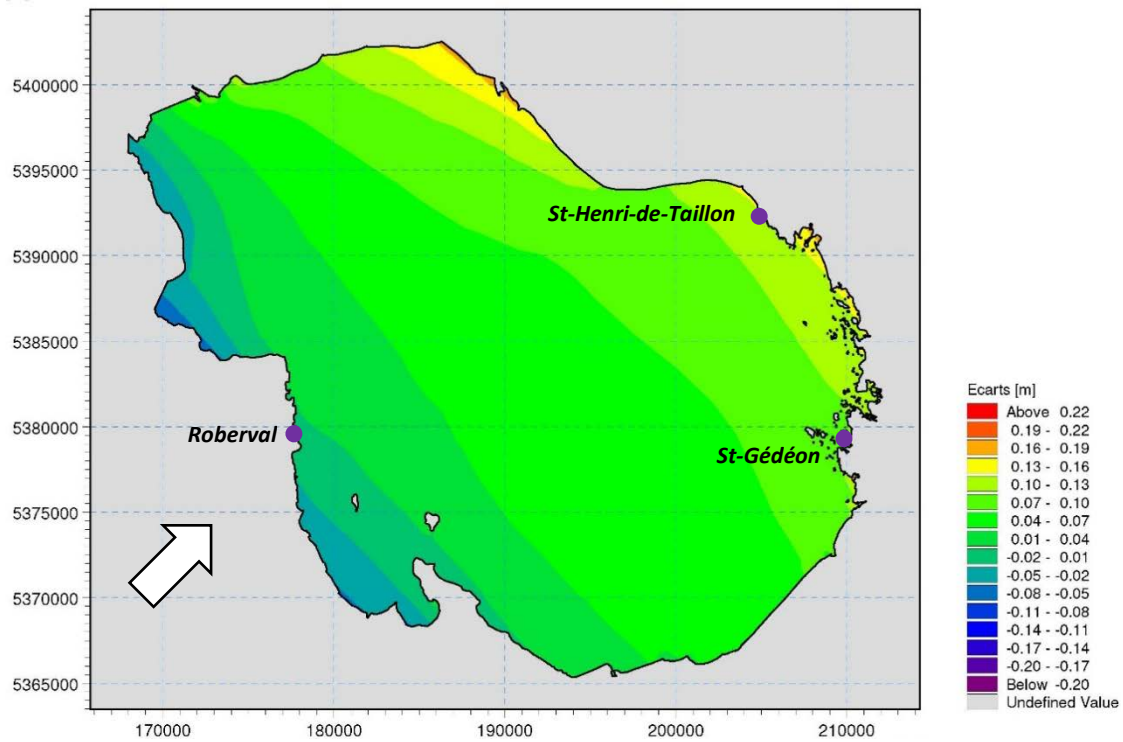


Figure 7.25: Écarts de niveaux par rapport à la station de Roberval – Vents de 40 km/h du sud-ouest

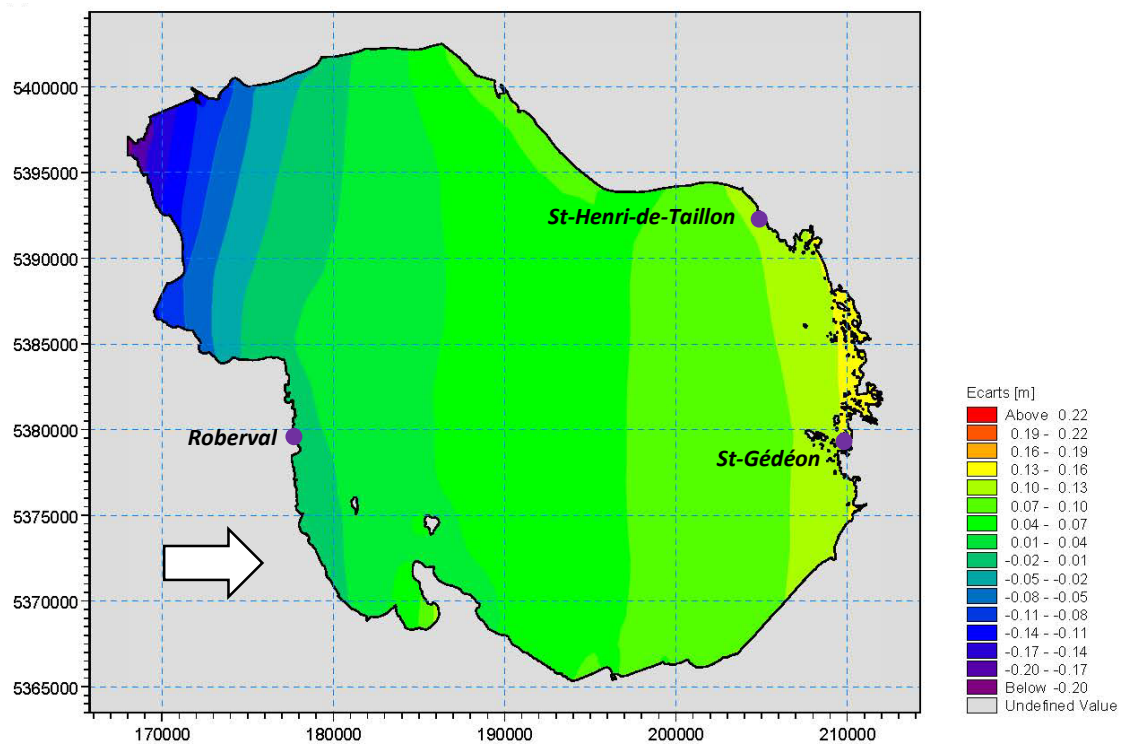


Figure 7.26: Écarts de niveaux par rapport à la station de Roberval – Vents de 40 km/h de l'ouest

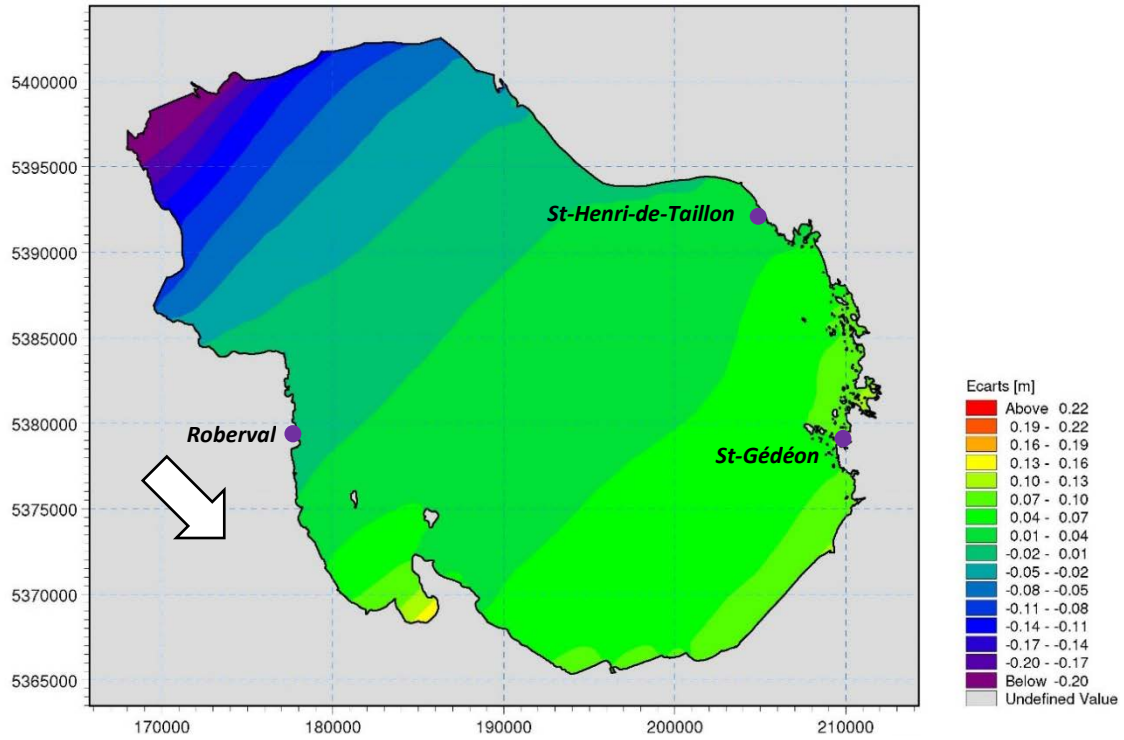


Figure 7.27: Écart de niveaux par rapport à la station de Roberval – Vents de 40 km/h du nord-ouest

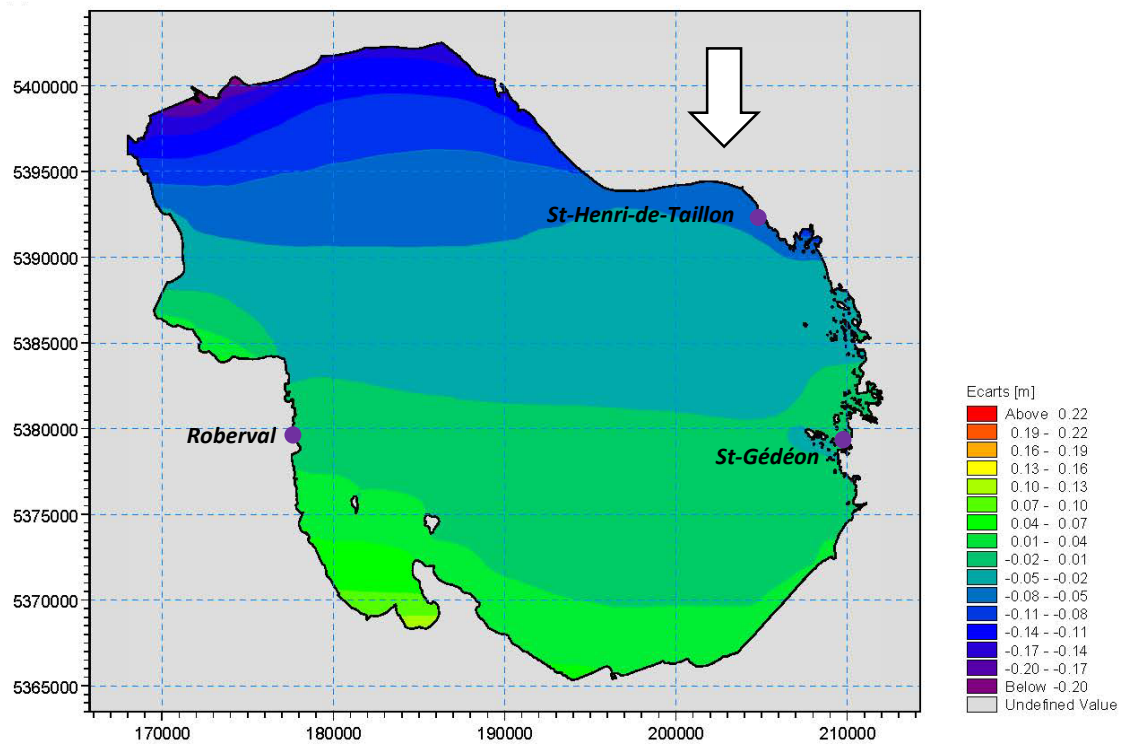


Figure 7.28: Écart de niveaux par rapport à la station de Roberval – Vents de 40 km/h du nord

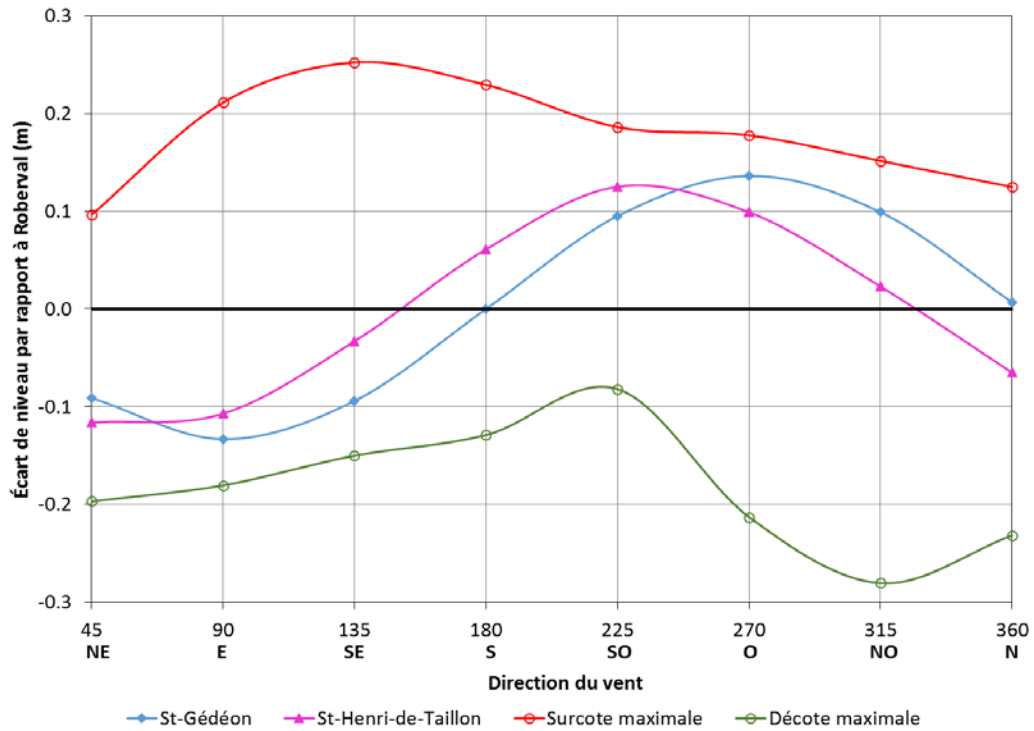


Figure 7.29: Surcotes et décotes pour une tempête synthétique de 40 km/h

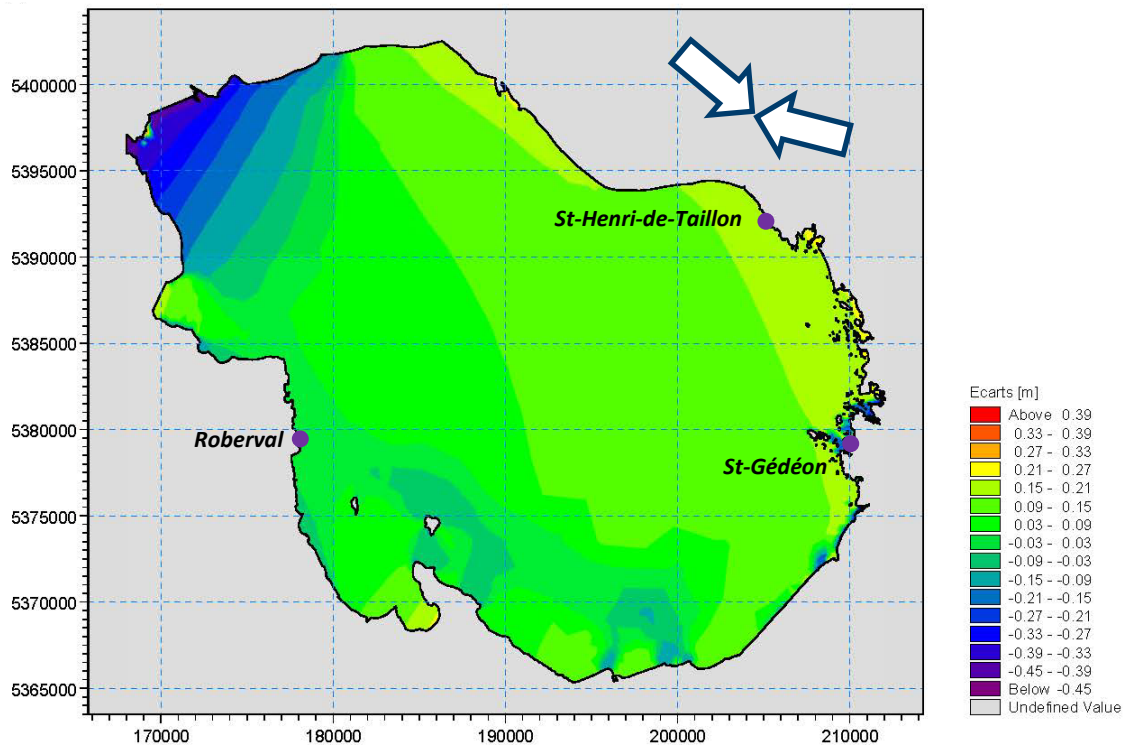


Figure 7.30: Écarts de niveau maximums (17 au 20 novembre 2013) - Niveau initial abaissé à 15,5 pi

7.4 Représentativité des jauges

Le niveau moyen du lac est actuellement calculé en appliquant une pondération égale aux mesures de niveau prises aux stations de Roberval, Saint-Gédéon et St-Henri-de-Taillon. Pour vérifier que cette moyenne reflète bel et bien le niveau moyen du lac, les résultats de tempêtes synthétiques de 40 km/h présentés à la section précédente ont été utilisés.

Les niveaux d'eau simulés aux trois stations de mesure sont présentés au tableau 7.1 pour les huit tempêtes synthétiques. Les écarts de niveau par rapport au niveau moyen réel du lac (101,54 m) sont également détaillés au tableau 7.1 et présentés graphiquement à la figure 7.31.

Tableau 7.1: Écarts de niveau par rapport au niveau moyen du lac

		Direction du vent								Moyenne ⁽¹⁾
		NE 45°	E 90°	SE 135°	S 180°	SO 225°	O 270°	NO 315°	N 360°	
Roberval	Niveau H _R	101.58	101.57	101.54	101.50	101.47	101.48	101.52	101.56	
	Écart (cm)	5.4	4.4	0.9	-3.2	-5.5	-4.5	-0.9	3.1	3.5
Saint-Gédéon	Niveau H _{St-G}	101.49	101.44	101.44	101.50	101.57	101.62	101.62	101.57	
	Écart (cm)	-3.7	-8.9	-8.5	-3.2	4.0	9.1	9.0	3.8	6.3
St-Henri-de-Taillon	Niveau H _{St-H}	101.47	101.47	101.51	101.56	101.60	101.58	101.54	101.50	
	Écart (cm)	-6.2	-6.3	-2.4	2.9	7.0	5.4	1.4	-3.4	4.4
Moyenne pondérée actuelle ⁽²⁾	Niveau	101.51	101.49	101.50	101.52	101.55	101.56	101.56	101.54	
	Écart (cm)	-1.5	-3.6	-3.4	-1.2	1.8	3.3	3.1	1.1	2.4
Moyenne pondérée proposée ⁽³⁾	Niveau	101.53	101.52	101.52	101.52	101.53	101.53	101.53	101.53	
	Écart (cm)	0.14	-0.45	-0.61	-0.47	0.12	-0.05	0.12	0.15	0.3

⁽¹⁾ Moyenne des valeurs absolues

⁽²⁾ $H_{\text{moy}} = 33,3\% \cdot H_R + 33,3\% \cdot H_{\text{St-G}} + 33,3\% \cdot H_{\text{St-H}}$

⁽³⁾ $H_{\text{moy}} = 54,85\% \cdot H_R + 45,15\% \cdot H_{\text{St-H}}$

D'après ces résultats, le calcul d'un niveau moyen du lac basé sur une pondération égale des niveaux mesurés aux trois stations reflète le niveau moyen réel du lac avec une précision moyenne de 2,4 cm (intervalle de -3,6 cm à +3,3 cm). Parmi les trois jauges de mesures, c'est la jauge de Roberval qui représente globalement le mieux le niveau moyen du lac, suivie par celle de St-Henri-de-Taillon et de Saint-Gédéon.

Sur la base de ces résultats, Rio Tinto Alcan a procédé à différents calculs afin de déterminer quelle pondération appliquer aux niveaux des trois jauges pour refléter le mieux possible le niveau moyen du lac. Les meilleurs résultats ont été obtenus en attribuant une pondération de 54,85% aux niveaux de Roberval,

0% aux niveaux de Saint-Gédéon, et 45,15% aux niveaux de St-Henri-de-Taillon⁹. Avec cette nouvelle pondération, la moyenne des écarts par rapport au niveau moyen du lac est réduite à 0,3 cm.

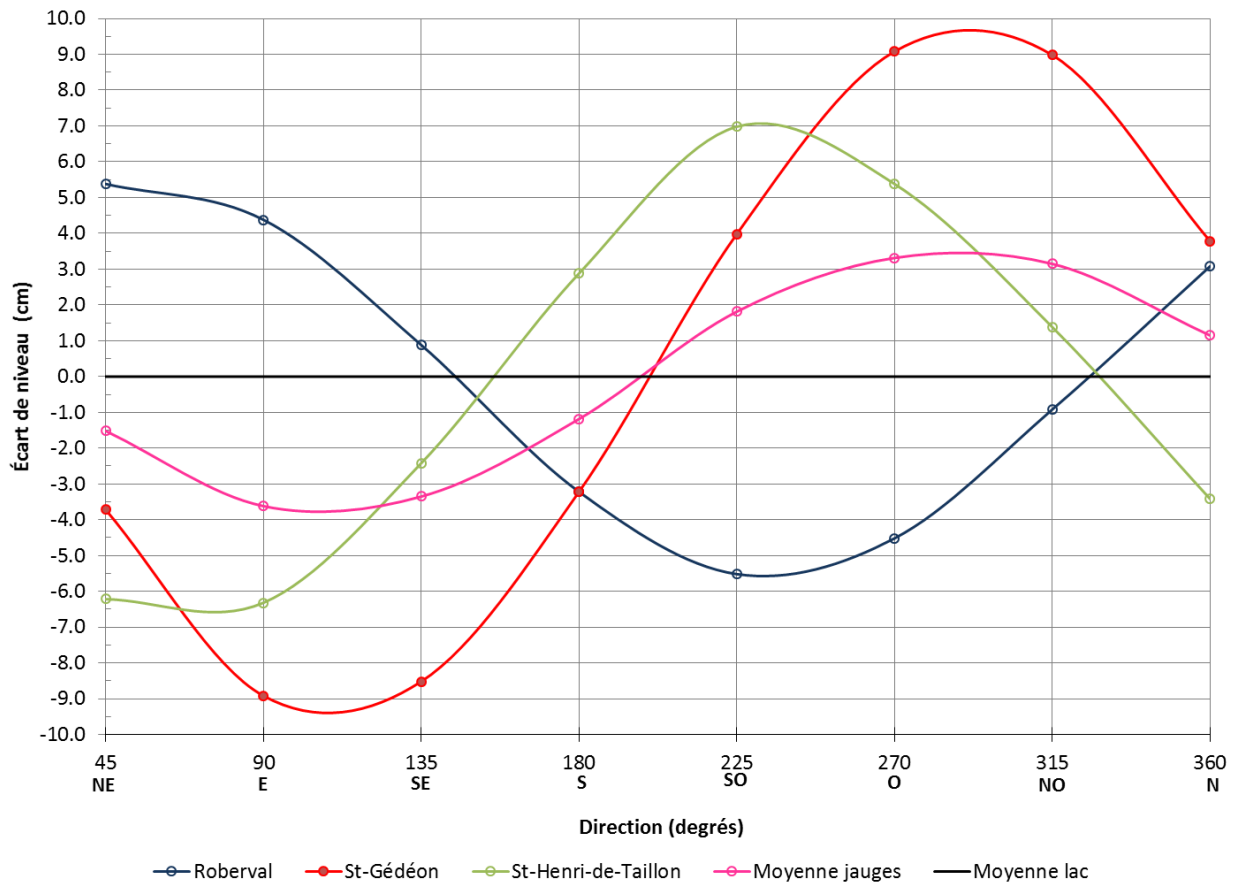


Figure 7.31: Écarts de niveaux d'eau par rapport au niveau moyen du lac (101,54 m)

⁹ Communication par courriel de M. Bruno Larouche le 31 août 2015.

8 CLIMAT DE VAGUES

L'érosion des berges du lac Saint-Jean est due en grande partie aux vagues générées par le vent sur l'étendue du lac. Pour modéliser cette érosion, il faut d'abord connaître le climat de vagues au large des secteurs affectés. Pour pouvoir tenir compte d'un nombre important de conditions pouvant mener à l'érosion, la modélisation des vagues est effectuée sur une longue période de temps. Cette approche permet d'intégrer plusieurs combinaisons de vagues et de niveaux d'eau.

Des mesures de vagues sur le terrain sont idéales pour caractériser le climat de vagues d'une étendue d'eau. D'un point de vue pratique, les instruments de mesures ne peuvent être déployés sur plusieurs années et leur nombre demeure limité. L'approche plutôt préconisée consiste à effectuer une campagne de mesures des vagues sur une période de quelques mois, idéalement lors des périodes de vents forts, puis de mettre en œuvre un modèle numérique de génération des vagues calibré sur ces mesures. Une fois calibré, le modèle numérique peut être utilisé pour simuler une multitude de scénarios.

Cette approche méthodologique a été utilisée dans le cadre de la présente étude.

8.1 Campagne de mesures des vagues

La réalisation de la campagne de mesures a été confiée en sous-traitance à la firme Environnement Illimité. Cette firme possède une grande expertise dans la collecte de données environnementales, et suit des règles strictes d'assurance et de contrôle qualité. Leurs procédures et instrumentation sont régies par des méthodes standards, reconnues internationalement.

L'approche méthodologique et les résultats de la campagne de mesures sont présentés en détails dans le rapport d'Environnement Illimité (réf. [12]) inclus dans le volume 4 du rapport d'étude. Les sections suivantes reprennent les grandes lignes de ce rapport.

8.1.1 Stations de mesures

Deux instruments de mesures ont été déployés à l'automne 2014 pour mesurer les vagues de surface sur le lac. La localisation de ces stations a été déterminée au préalable sur la base des deux critères suivants :

- Emplacement géographique permettant de mesurer des vagues générées par des vents de fetchs opposés;
- Profondeurs d'eau entre 10 et 20 m pour faciliter l'installation des instruments et minimiser l'influence des fonds sur les vagues.

La première station de mesures a ainsi été installée du côté est du lac, au large de Saint-Gédéon, pour capter les vagues générées par les vents d'ouest. La deuxième station a été déployée du côté opposé, au large de Pointe Bleue, afin de mesurer les vagues générées par les vents du secteur est (figure 8.1).

Les profondeurs et positions exactes des stations de mesures sont les suivantes :

- Station 1 : profondeur de 15,5 m, ($71^{\circ}51'8.03''\text{O}$, $48^{\circ}32'07.62''$), (209 949 m, 5 378 312 m);
- Station 2 : profondeur de 9,8 m, ($72^{\circ}06'57.96''\text{O}$, $48^{\circ}38'18.85''$), (185 707 m, 5 390 156 m).



Figure 8.1: Localisation des instruments de mesure des vagues

8.1.2 Instruments de mesures et échantillonnage

Les mesures de vagues de surface réalisées à l'automne 2014 ont été réalisées à l'aide de profilers acoustiques à effet Doppler AWAC développé par Nortek. Chaque AWAC était installé dans une station de mouillage ancrée sur le fond et munie des équipements suivants : boîtier externe avec bloc de batteries alcalines, sonde de pression, système acoustique de déclenchement à distance (largage de la bouée de récupération), système acoustique d'écho-localation, et système de récupération.

L'AWAC est en premier lieu un profileur de courant à effet Doppler qui mesure également les vagues directionnelles. Lors de la campagne, l'intervalle de mesure était fixé à 30 minutes et la durée des mesures pour les vagues était de 20 minutes, i.e. que toutes les 30 minutes, l'AWAC enregistrerait un profil de courant (moyenne sur 60 secondes), puis enregistrerait à une fréquence de 1 Hz (1 mesure par seconde) les vagues de surface pendant 20 minutes. Les senseurs de pression, de leur côté, ont été configurés pour enregistrer les vagues non-directionnelles à une fréquence de 1 Hz pendant 1 024 secondes toutes les 30 minutes (ensemble de 1 024 mesures).

8.1.3 Résultats de la campagne de mesures

Les données brutes enregistrées par les instruments de mesures ont été traitées par Environnement Illimité et transmises sous forme de séries temporelles des hauteurs caractéristiques (H_{m0}), périodes de pointe (T_p) et direction des vagues.

En analyse spectrale, la hauteur caractéristique H_{m0} correspond à $4(m_0)^{0.5}$, où m_0 représente le moment d'ordre zéro de la densité spectrale des vagues (aire du spectre). Elle est considérée équivalente à la hauteur significative (H_s), qui correspond à la valeur moyenne du tiers supérieur des hauteurs de vagues observées. La période de pointe (T_p) correspond au maximum de la densité spectrale. Ces deux paramètres sont fréquemment utilisés pour caractériser les vagues.

Par souci de cohérence avec les paramètres de modélisation de MIKE 21 SW, les variables H_s et T_p sont utilisées dans le rapport.

Plusieurs épisodes de vents forts ont eu lieu pendant la campagne de mesures. D'après les données de vent enregistrées à Mistook (figures 8.2 et 8.3), les épisodes les plus forts sont survenus après la mi-novembre, en provenance du secteur ouest.

Les figures 8.4 et 8.5 présentent les hauteurs significatives et les périodes de pointe mesurées aux deux stations pendant la campagne de mesure. Les niveaux du lac sont illustrés à la figure 8.6.

Pour l'ensemble des observations, la hauteur significative moyenne des vagues est de 0,49 m à la station 1, et de 0,46 m à la station 2. Lors des épisodes de tempêtes, des vagues plus importantes ont été mesurées. À la station 1, la hauteur significative maximale est de 1,47 m, observée le 18 novembre 2014 alors que des vents du sud-ouest soufflaient à près de 40 km/h. À la station 2, la hauteur significative maximale est de 1,83 m, observée le 12 novembre 2014 pour des vents de 30 km/h du sud-est.

8.2 Modèle MIKE 21 SW

L'objectif principal de la modélisation consistait à établir le régime des vagues local pour servir d'intrants aux différents sites visés par la modélisation des conditions érosives, présentée au chapitre 9.

La modélisation des vagues a été effectuée à l'aide du module MIKE 21 SW (Spectral Waves), qui intègre les développements les plus récents pour la simulation de la génération et de la transformation des vagues en eaux profondes et côtières. Le modèle repose sur l'équation de transport de l'action des vagues et permet de reproduire l'ensemble des phénomènes affectant la propagation des vagues océaniques et côtières : génération par le vent, réfraction, diffraction, déferlement, interaction avec les courants, etc. Le modèle utilise une formulation aux volumes finis basée sur un maillage non structuré (maillage flexible) qui facilite la variation de la résolution spatiale dans les différentes portions du modèle.

Le forçage du modèle repose uniquement sur les séries temporelles de vent à 10 m de la surface de l'eau. Les résultats sont fournis sous forme de cartes ou de séries temporelles de plusieurs variables au choix : hauteur significative, période, direction des vagues, énergie des vagues, etc.

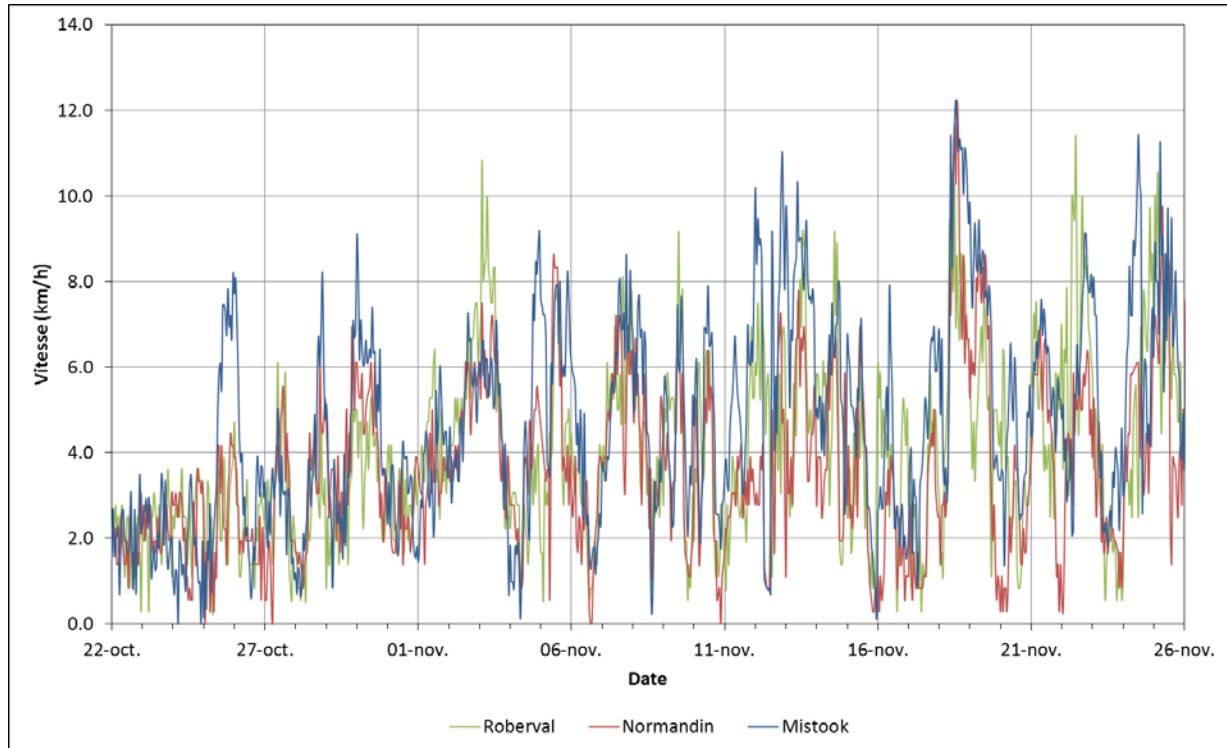


Figure 8.2: Vitesses des vents mesurées lors de la campagne d’automne 2014

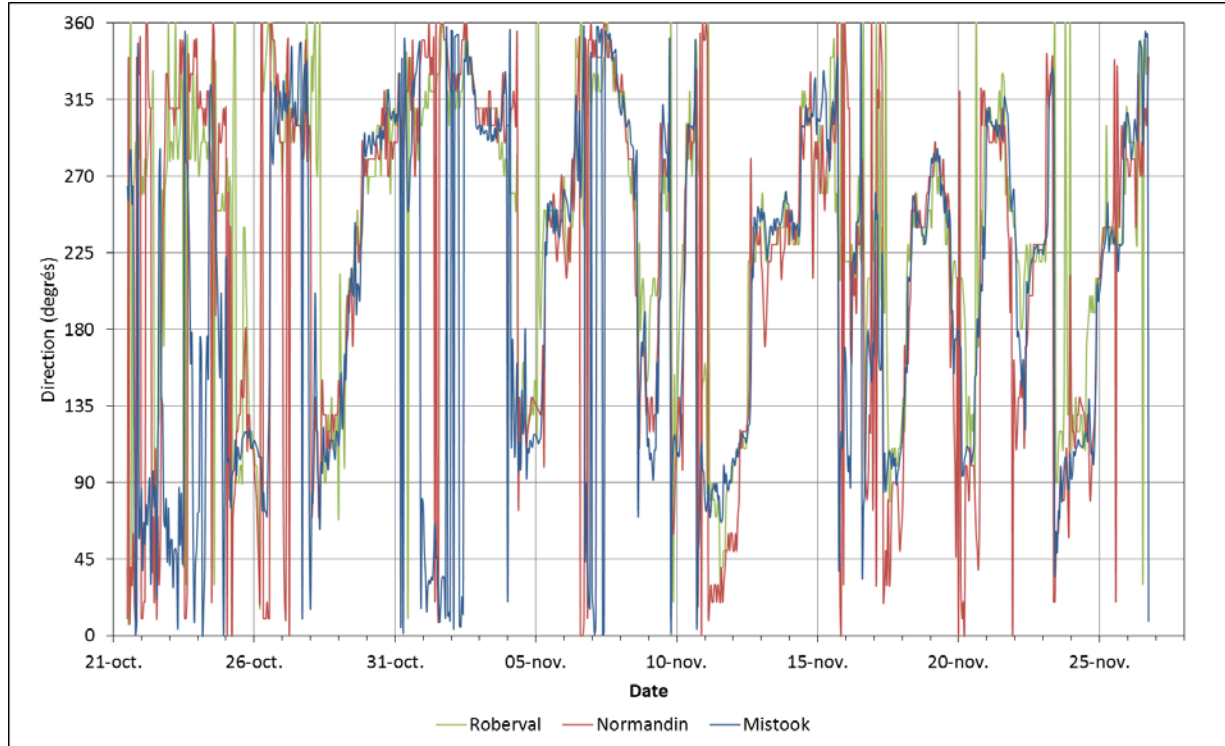


Figure 8.3: Directions des vents mesurées lors de la campagne d’automne 2014

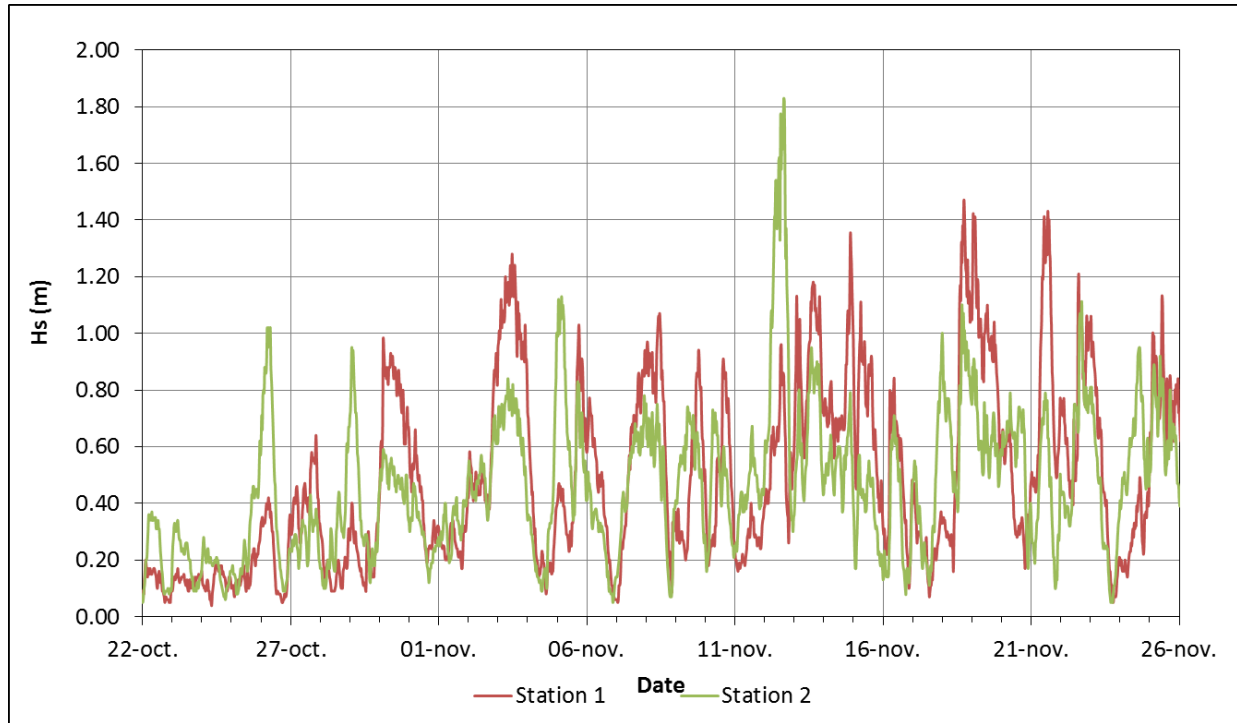


Figure 8.4: Hauteurs significatives (H_s) mesurées aux stations 1 et 2 lors de la campagne d'automne 2014

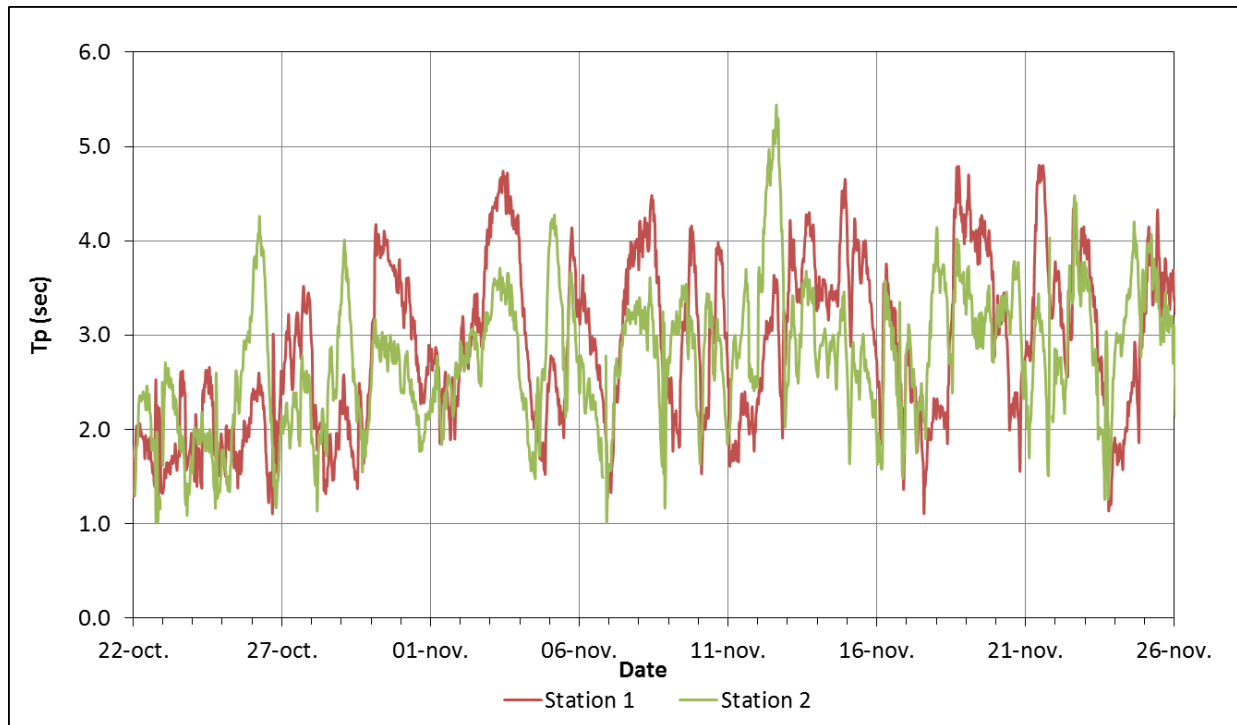


Figure 8.5: Périodes de pointe (T_p) mesurées aux stations 1 et 2 lors de la campagne d'automne 2014

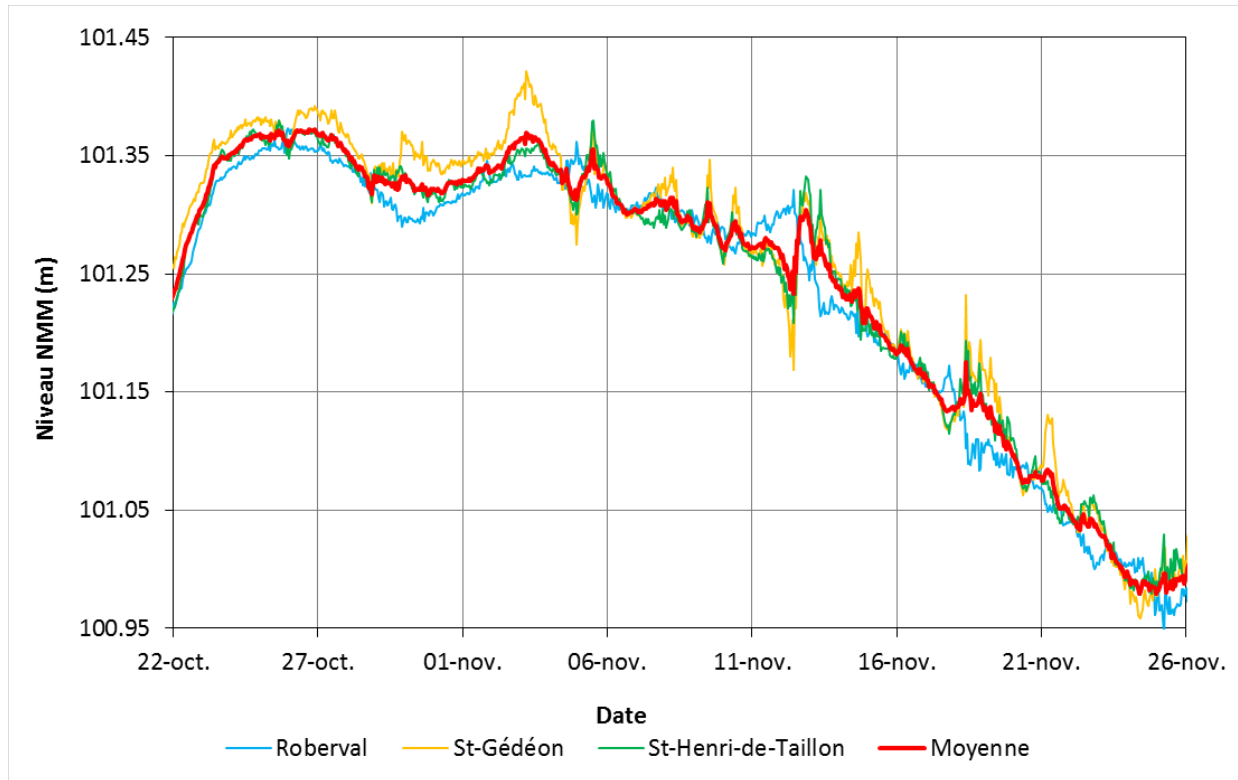


Figure 8.6: Niveaux d’eau mesurés aux jauges lors de la campagne d’automne 2014

8.3 Paramètres de modélisation et calibrage

8.3.1 Modèle de terrain

Le modèle de terrain utilisé pour la simulation de vagues est le modèle simplifié présenté à la figure 6.6 de la section 6.3.

8.3.2 Niveaux d’eau

L’évolution du niveau d’eau imposée au modèle correspond aux données historiques ou aux scénarios alternatifs fournis par Rio Tinto Alcan. La modélisation couvre uniquement les périodes d’eau libre, où l’action des vagues n’est pas affectée par les glaces.

8.3.3 Données de vent

Le choix de la station météorologique de référence à utiliser pour modéliser les vagues a été déterminé sur la base de l’exercice de calibrage du modèle de génération des vagues, abordé à la section suivante. Des tests ont été effectués en utilisant les données de Roberval, Mistook et la moyenne des trois stations météorologiques situées autour du lac (Roberval, Mistook et Normandin).

8.3.4 Formulations

Le module SW de MIKE 21 repose sur l'équation de conservation de l'action des vagues et peut être exploité selon deux modes différents :

- Formulation spectrale complète basée sur l'équation de l'action de vagues où le spectre directionnel et fréquentiel de l'action des vagues est la variable dépendante (modèle de troisième génération, réf. [13]);
- Formulation « directionnelle découplée » basée sur la paramétrisation de l'équation de l'action des vagues (modèle de deuxième génération, réf. [14]).

La formulation spectrale complète est utilisée lorsqu'une simulation inclut la génération, la décroissance et la transformation de vagues par le vent, tel que dans le cas de la présente étude. Cette formulation comporte des temps de calcul supérieurs à la formulation directionnelle découplée.

Les formulations spectrales décrites ci-haut peuvent être combinée à deux modes de formulation temporelle différents : quasi-stationnaire et instationnaire. La formulation quasi-stationnaire est utilisée lorsque les épisodes de vagues peuvent être traités comme des événements indépendants. Dans le cas présent, il est requis d'utiliser la formulation instationnaire afin de pouvoir simuler la continuité des épisodes de tempête.

8.3.5 Choix des paramètres de MIKE21 SW

Une première simulation portant sur les conditions de l'automne 2014 a permis de calibrer et de valider les résultats de modélisation d'après les mesures de vagues effectuées sur le terrain. Le calibrage a été réalisé en incluant, excluant ou modifiant les paramètres suivants du modèle SW :

- Diffraction;
- Déferlement;
- Frottement sur le fond;
- Formation de vagues à crête blanche (*white capping*);
- Discrétisation logarithmique de la fréquence¹⁰.

Le tableau 8.1 présente les paramètres des différents essais effectués, et leurs résultats sous forme de commentaires.

¹⁰ Le modèle SW permet également de sélectionner une discrétisation équidistante de la fréquence. Cependant ce type de discrétisation n'est pas recommandé.

Tableau 8.1: Paramètres testés lors du calibrage du modèle MIKE21 SW

Essai	Diffraction	Déferlement	Frottement sur le fond	Vagues à crête blanche	Discrétisation de la fréquence ⁽¹⁾	Commentaires
A	x	x	x	x	$f_0 = 0,14$ $n = 20$ $c = 1,1$	H_s est considérablement inférieur aux valeurs mesurées. T_p est légèrement inférieur aux valeurs mesurées.
B	x	x	x		$f_0 = 0,14$ $n = 20$ $c = 1,1$	H_s est comparable aux valeurs mesurées. Les petites périodes ne sont pas représentées.
C		x	x		$f_0 = 0,14$ $n = 20$ $c = 1,1$	Résultats similaire à l'essai B.
D			x		$f_0 = 0,14$ $n = 20$ $c = 1,1$	Résultats similaire à l'essai B.
E					$f_0 = 0,14$ $n = 20$ $c = 1,1$	Résultats similaire à l'essai B.
F	x	x	x		$f_0 = 0,14$ $n = 25$ $c = 1,1$	Résultats similaire à l'essai B. Petites périodes bien représentées.
G	x	x	x		$f_0 = 0,18$ $n = 25$ $c = 1,1$	Résultats similaire à l'essai F. Grandes périodes non représentées.

⁽¹⁾ Dans MIKE 21 SW, les classes de fréquence sont calculées ainsi : $f_n = f_0 c^n$, où f_0 est égal à la fréquence minimale, n est le nombre de classes et c est un facteur de fréquence dont la valeur recommandée est 1,1.

L'essai A, qui incluait tous les phénomènes de dissipation d'énergie des vagues, a montré que ce choix de paramètres donnait des hauteurs significatives inférieures aux mesures de vagues. L'exclusion du phénomène de formation des vagues à crête blanche a permis une nette amélioration des résultats (essai B). L'exclusion successive des phénomènes de diffraction (essai C), déferlement (essai D) et de frottement sur les fonds (essai E) n'a pas montré de changement significatif par rapport aux résultats de l'essai B.

Les deux derniers tests se sont attardés à la discrétisation logarithmique des fréquences du spectre des vagues. Les paramètres de l'essai F ont permis de représenter la gamme complète de périodes (ou fréquences) des vagues à modéliser. Ce sont donc les paramètres de cet essai qui ont été conservés pour la suite des simulations. Les valeurs par défaut proposés dans MIKE21 SW pour la définition des phénomènes de diffraction, déferlement et rugosité ont été conservées.

8.3.6 Choix de la station de vents

Une sélection préliminaire de la station de référence des vents a été faite dans l'étude des variations de niveaux présentée au chapitre 7. Lors du calibrage du modèle utilisé pour simuler les surcotes et décotes du lac, les données de vents enregistrées à la station météorologique de Mistook, ajustées avec un facteur de recalage de 1,05, s'étaient avérées optimales. Ce choix concordait également avec les recommandations de l'étude des vents, résumées au chapitre 4.

Dans un premier temps, la modélisation des vagues pour la période correspondant à la campagne de mesures de l'automne 2014 a donc été réalisée avec les données de vents enregistrées à la station de Mistook et un facteur de recalage de 1,05. La comparaison des valeurs mesurées et simulées aux deux stations de mesures, pour les hauteurs significatives, périodes de pointe et direction des vagues, montre dans l'ensemble de très bons résultats (figures 8.7 à 8.9).

La concordance des valeurs simulées et mesurées n'est pas parfaite et on observe à certains instants des écarts plus marqués. Ceux-ci sont plus visibles à la figure 8.7, qui comparent les hauteurs significatives des vagues. Aux deux stations de mesures, il n'y a pas de tendance systématique dans les écarts, i.e. qu'on remarque des différences tant à la baisse qu'à la hausse.

En examinant les caractéristiques des vents aux figures 8.2 et 8.3, il ressort que les différences les plus marquées sont obtenues lors d'épisodes de vents forts enregistrés à Mistook ou Roberval, qui ne sont pas captés par les autres stations. Il semblerait donc que certains systèmes météorologiques se produisent à très petite échelle, et qu'ils ne sont pas nécessairement ressentis au niveau du lac. Dans de tels cas, l'utilisation de données de vent issues d'une seule station, dont les vitesses sont plus fortes qu'ailleurs, entraînent sans étonnement la simulation de vagues trop hautes dans le modèle numérique.

L'utilisation de la moyenne des données en provenance des trois stations météorologiques autour du lac (Roberval, Mistook, Normandin) apparaît alors comme une option intéressante pour abaisser les hauteurs significatives de vagues trop hautes. Cette approche n'est toutefois pas pratique courante car elle n'est pas réaliste d'un point de vue physique. En effet, les données enregistrées aux trois stations météorologiques ne sont pas cohérentes dans le temps (décalage des directions et des vitesses) et ne produisent pas un champ de vents homogène.

En comparant attentivement les résultats obtenus aux figures 8.7 à 8.9, il ressort que les vents de Mistook permettent une meilleure représentation des caractéristiques des vagues, notamment au niveau des périodes (figures 8.8). Sur la base de ces résultats, et de ceux obtenus dans la modélisation de la variation des niveaux d'eau liée au vent (chapitre 7), il a été décidé d'utiliser les données de vent enregistrées à la station de Mistook, majorées d'un facteur de 1,05, dans toutes les simulations de vagues.

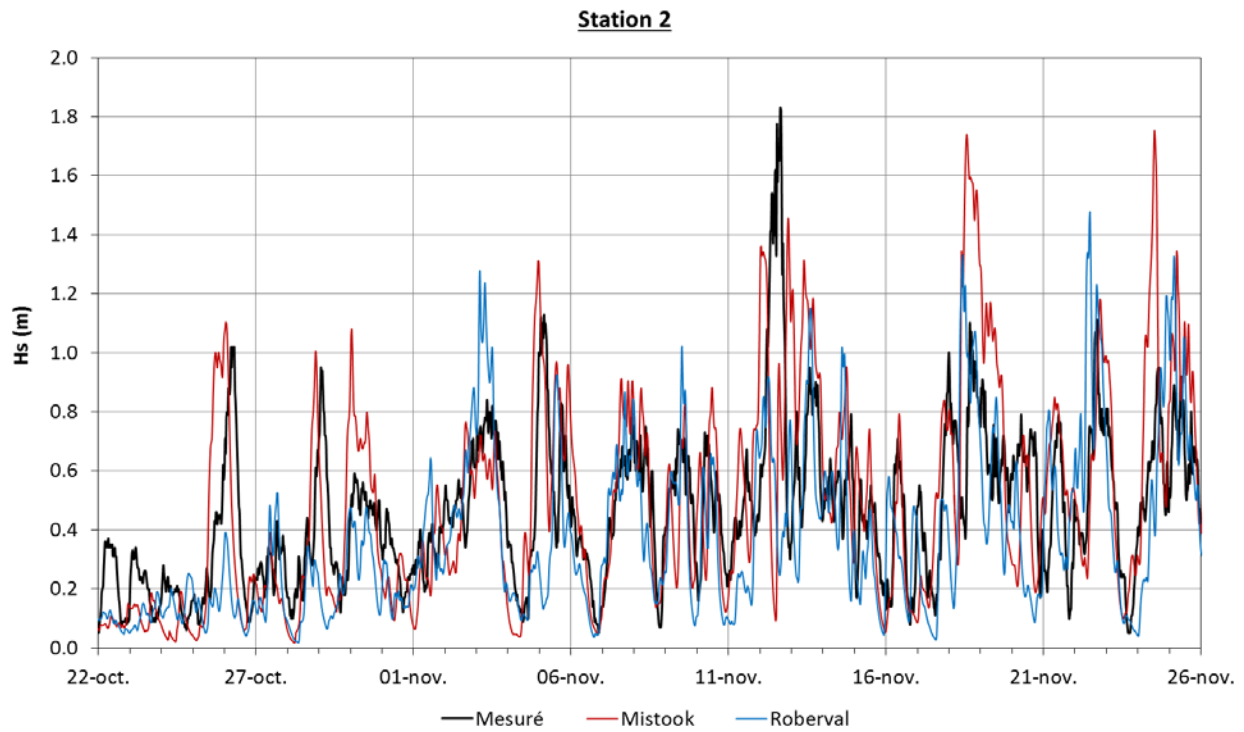
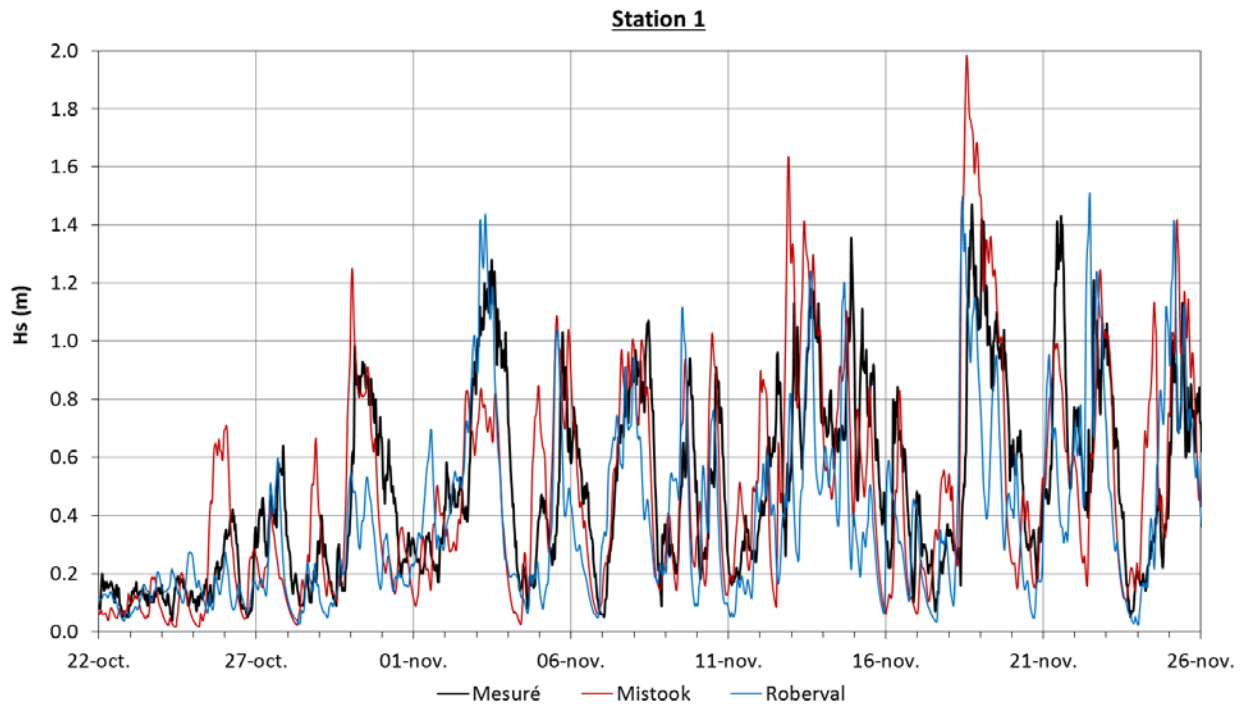


Figure 8.7: Calibrage du modèle – Comparaison des hauteurs significatives (H_s) mesurées et simulées

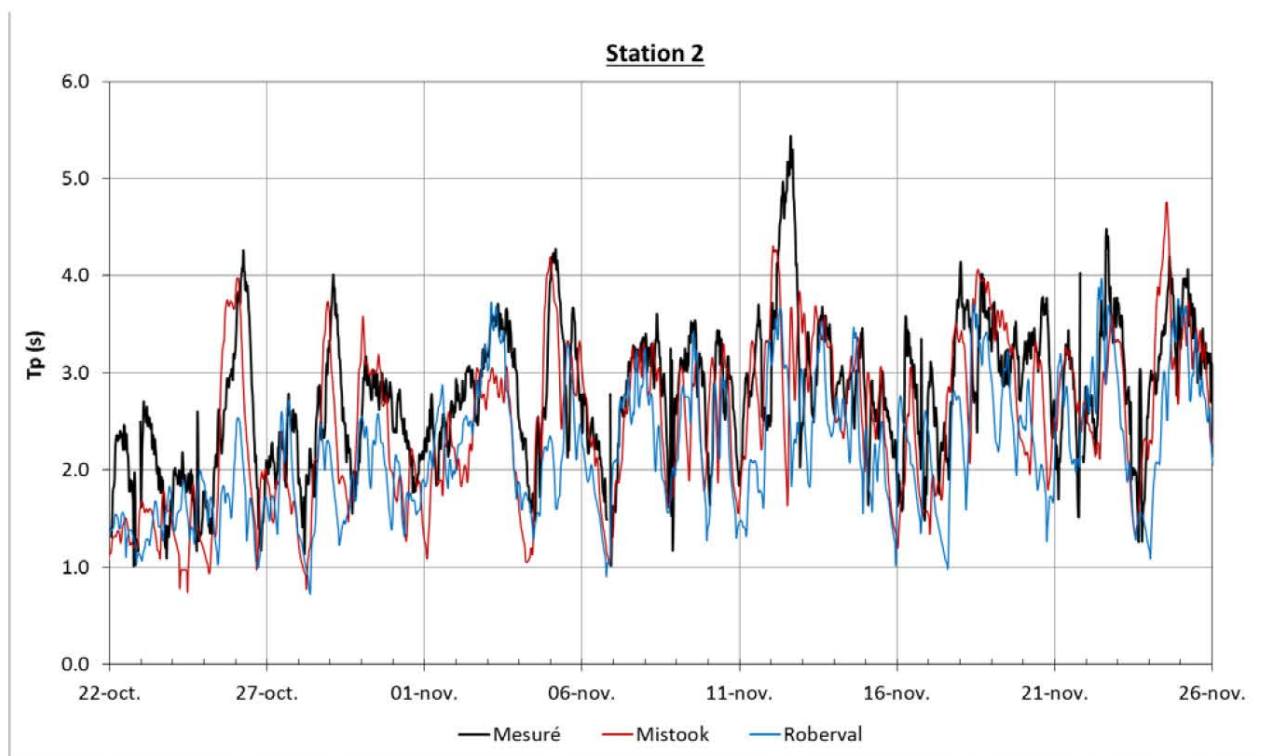
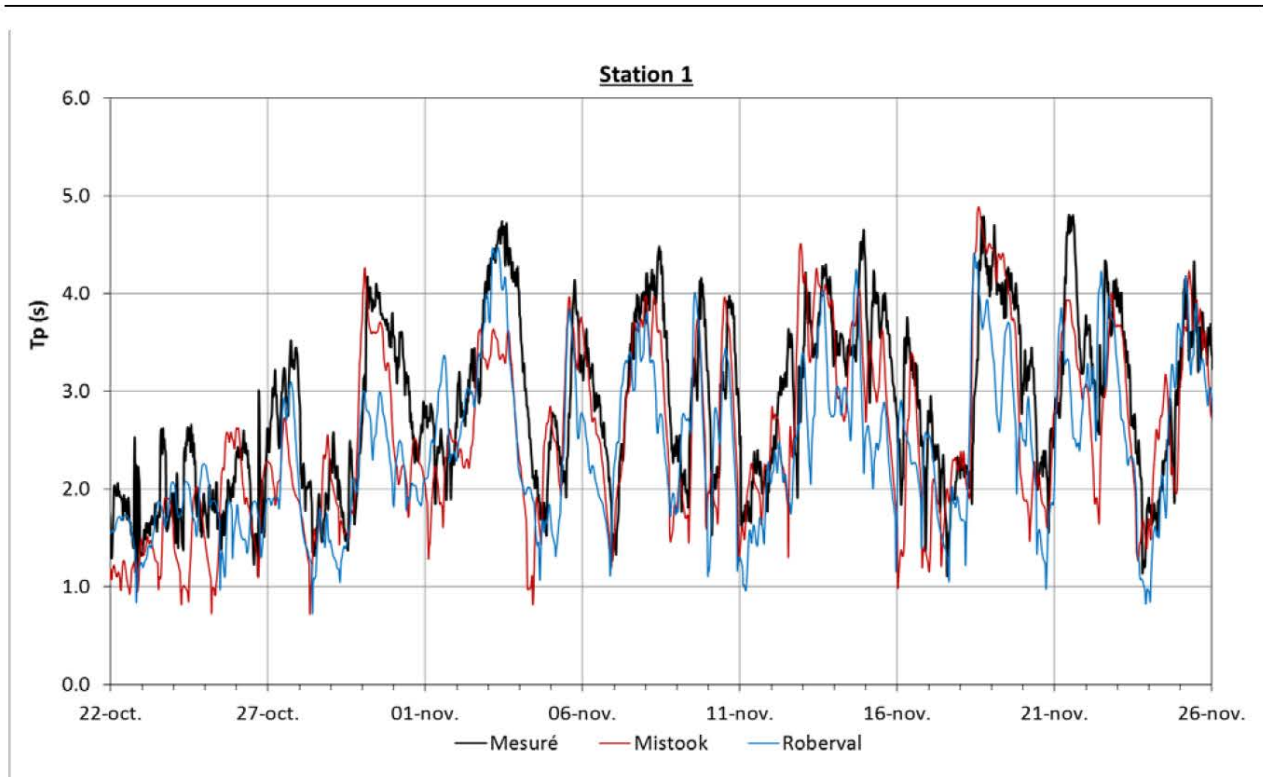


Figure 8.8: Calibrage du modèle – Comparaison des périodes de pointe (T_p) mesurées et simulées

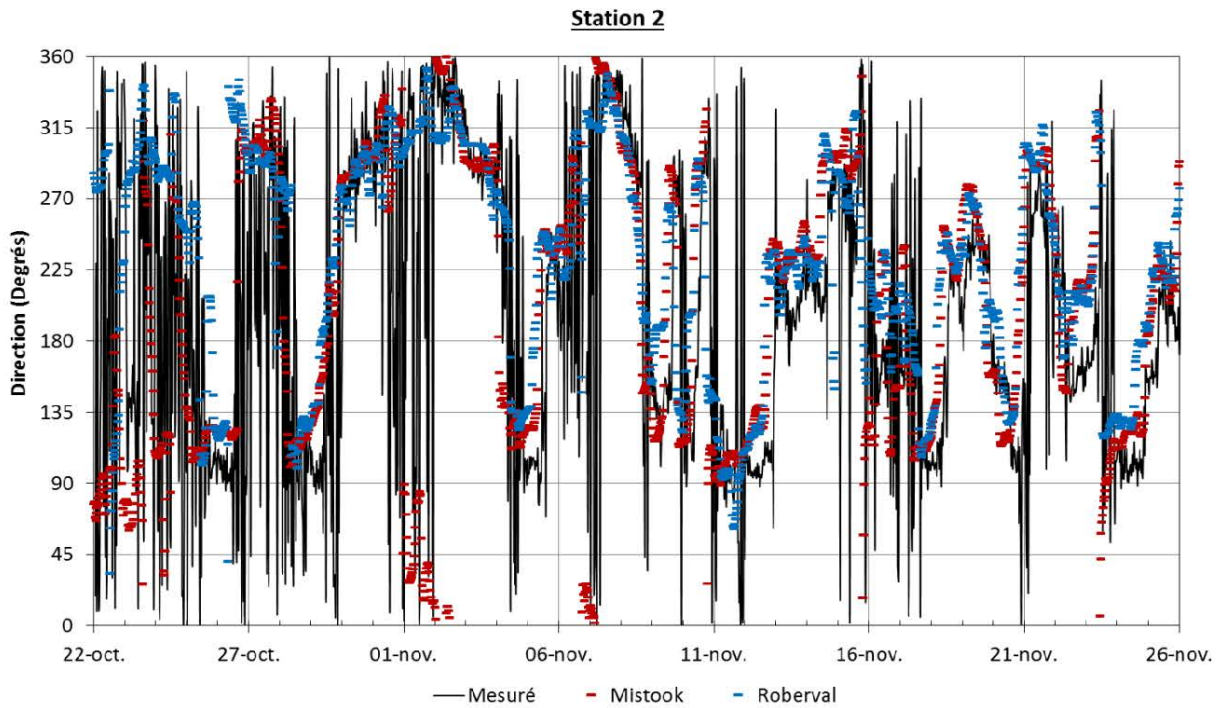
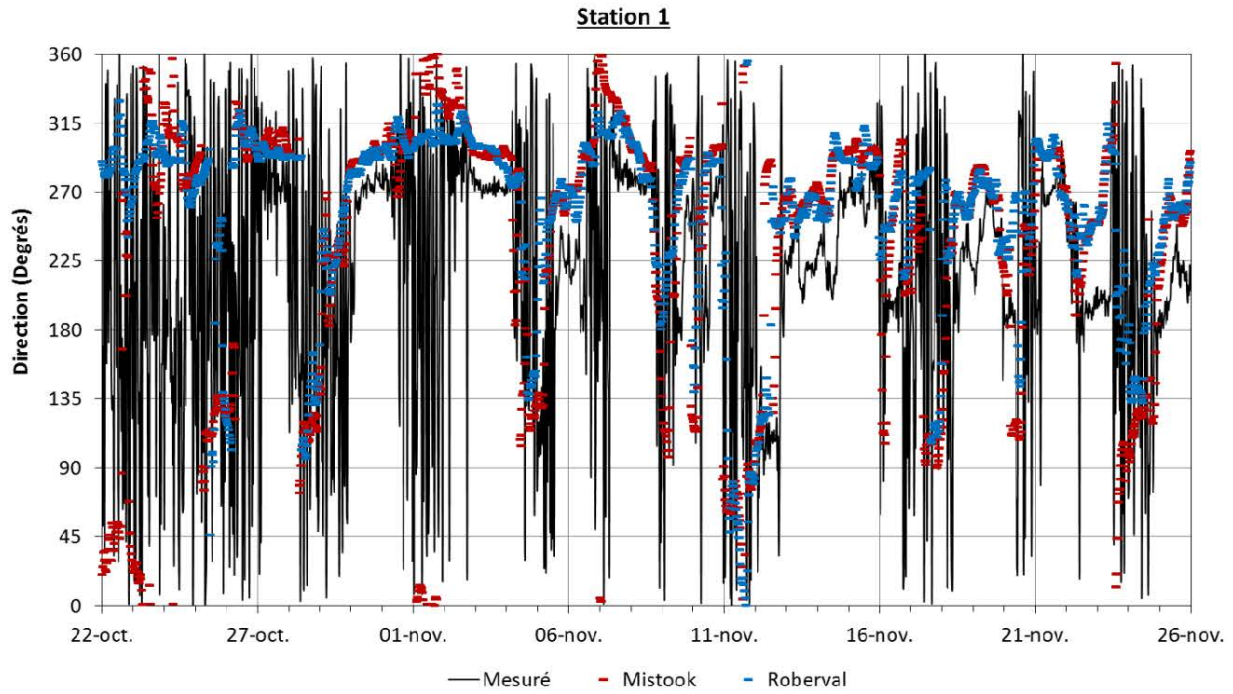


Figure 8.9: Calibrage du modèle – Comparaison des directions des vagues mesurées et simulées

8.4 Scénarios modélisés

Une fois le modèle MIKE21 SW calibré, il a été utilisé pour réaliser des simulations systématiques portant sur deux périodes de longue durée :

- Simulation des tempêtes passées, 1992-2014 (23 ans);
- Simulation des tempêtes futures, 2015-2037 (23 ans).

8.4.1 Période passée 1992-2014

Pour les simulations ayant trait à la période passée, les données suivantes ont été utilisées :

- Données de vent historique de Mistook avec facteur de recalage de 1,05;
- Périodes d'eau libre historiques, déterminées selon l'analyse des températures de l'air enregistrées à la station météorologique de Roberval (section 5.5);
- Niveaux d'eau moyens du lac mesurés sur une base journalière.

8.4.2 Période future 2015-2037

Pour les simulations futures, les données suivantes ont été utilisées :

- Données de vent historique de Mistook avec facteur de recalage de 1,05;
- Périodes d'eau libre historiques ajustées pour tenir compte des changements climatiques, soit un départ des glaces plus hâtif de 7 jours et une prise des glaces plus tardive de 10 jours (section 5.8);
- Niveaux d'eau moyens du lac sur une base journalière selon différents scénarios de gestion du niveau d'eau du lac Saint-Jean élaborés par Rio Tinto Alcan.

Au total, six scénarios de gestion du niveau d'eau ont été inclus dans la modélisation de l'érosion des berges à long terme. Ceux-ci ont été transmis sous forme de données numériques avec un graphique associé (figures 8.10 à 8.15). Chaque scénario est constitué d'une limite de niveaux maximums et d'une limite de niveaux minimums, faisant ressortir ses principales caractéristiques. Les variations saisonnières de ces limites sont résumées au tableau 8.2.

Finalement, pour faciliter la comparaison des scénarios entre eux, la figure 8.16 compare les courbes de niveaux maximums, médians et minimums.

Tableau 8.2: Scénarios de gestion du niveau d'eau du lac Saint-Jean (niveaux en pieds)

Nom	Printemps		Été		Septembre		Octobre à décembre		Hiver	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
A	16,5	2,0	16,0	14,0	16,5	12,0	16,5	12,0	16,5	2,0
B	16,5	2,0	16,0	14,0	15,5	13,0	15,5	12,0	15,5	2,0
C	15,5	2,0	15,5	14,0	15,5	14,0	15,5	12,0	15,5	2,0
D	16,5	2,0	15,5	14,0	15,5	14,0	15,5	12,0	15,0	2,0
E	14,0	2,0	14,0	13,0	14,0	13,0	14,0	12,0	14,0	2,0
F¹¹	17,5	2,0	15,5	14,0	15,5	14,0	15,5	12,0	15,5	2,0

Il est à noter que les niveaux d'eau dans la documentation et les données relatives au PSBLSJ utilisent souvent la référence historique, qui correspond au zéro de la règle d'étiage du quai de Roberval. Les niveaux en pieds du lac le plus fréquemment utilisés et leur équivalence en niveau géodésique (ou NMM) sont donnés au tableau 8.3.

Tableau 8.3: Niveaux historiques en pieds et équivalence en niveau géodésique (NMM)

Niveau en pieds (pi.)	Équivalence en NMM (m)
2,0	97,15
12,0	100,17
13,0	100,48
14,0	100,78
14,5	100,93
15,0	101,08
15,5	101,23
16,0	101,39
16,5	101,54
17,5	101,84
30,0	105,63

Note : Niveau (pi.) = (Niveau (m)/0,3048)-316,635

¹¹ Le scénario F2, qui inclut un niveau maximum d'exploitation de 16,0 pieds en été, a été étudié dans l'étude d'impacts du PSBLSJ (réf. [17]) mais n'a pas fait l'objet de modélisation. Cet écart de niveau en période estivale (16 pieds versus 15,5 pieds), qui présente très peu d'épisodes de tempêtes, n'a pas été jugé significatif dans l'évaluation de l'érosion des berges.

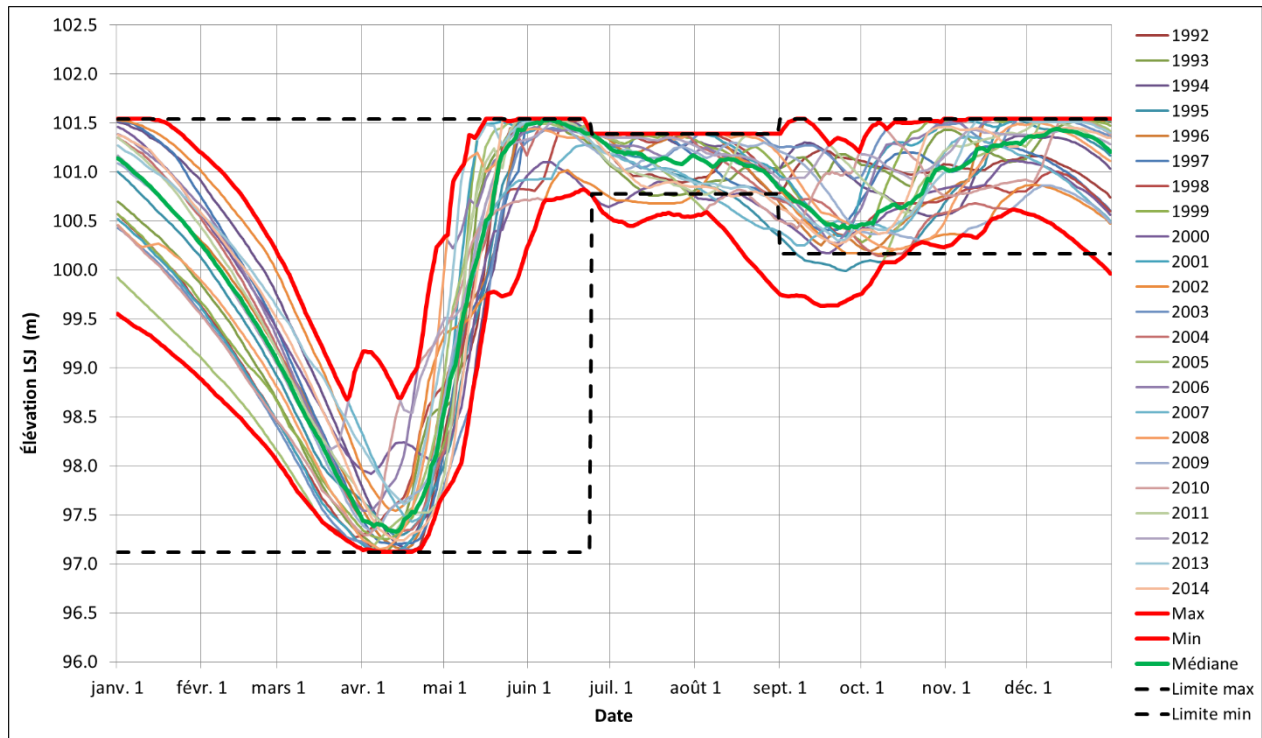


Figure 8.10: Scénario A

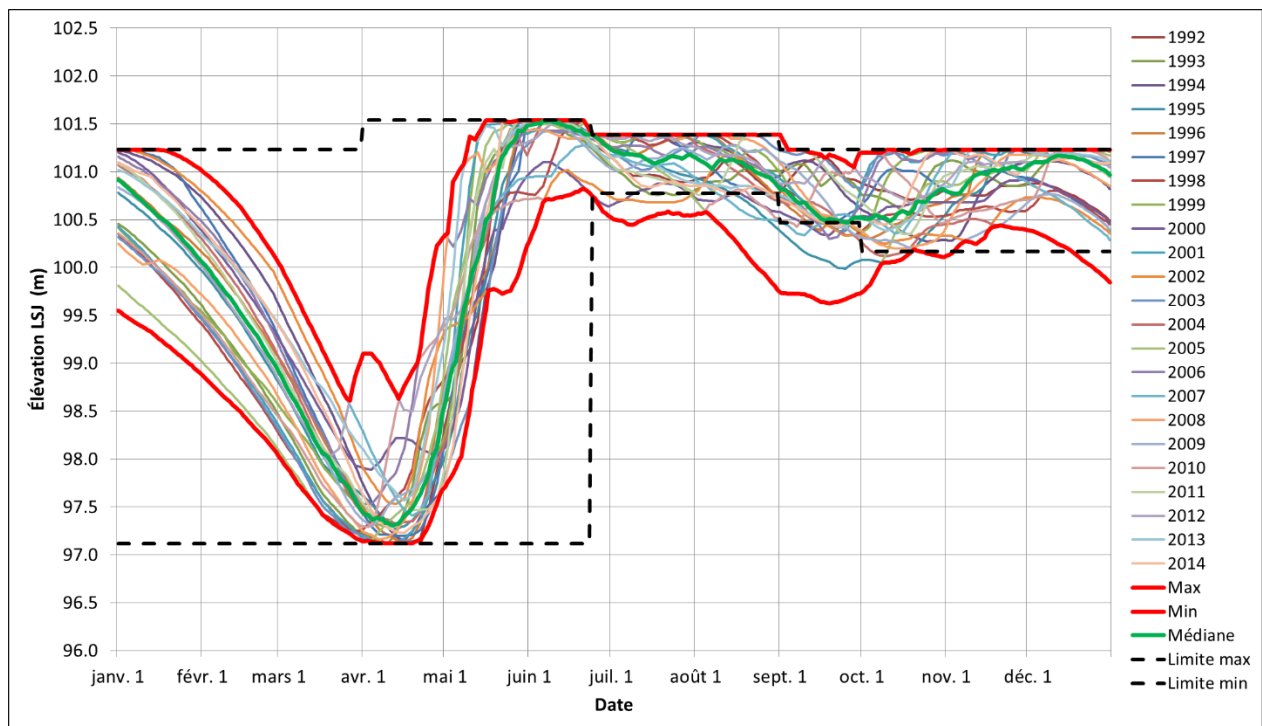


Figure 8.11: Scénario B

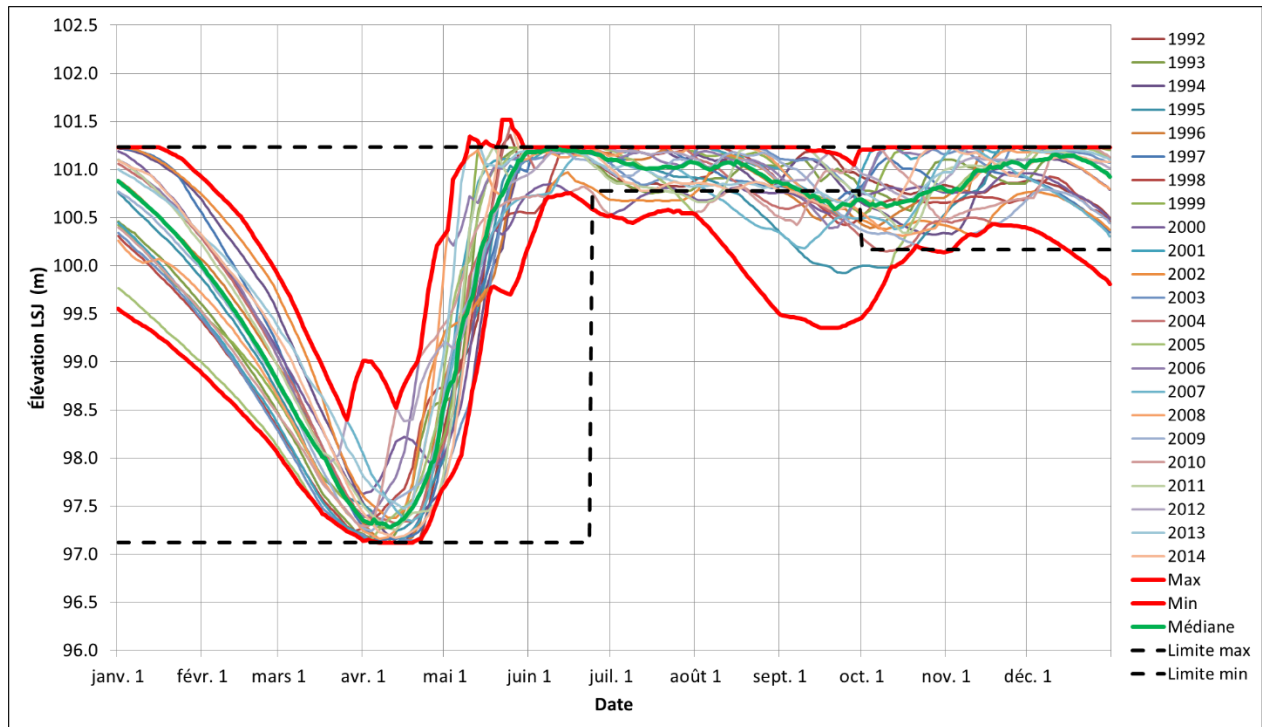


Figure 8.12: Scénario C

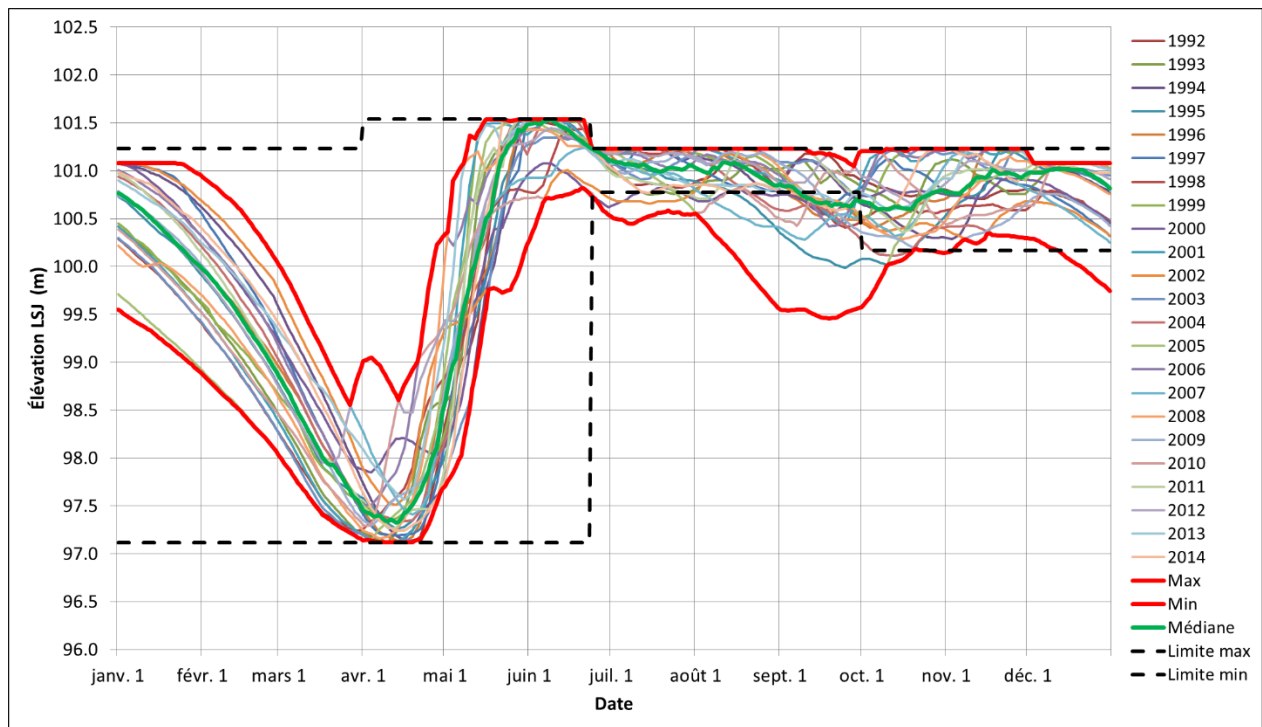


Figure 8.13: Scénario D

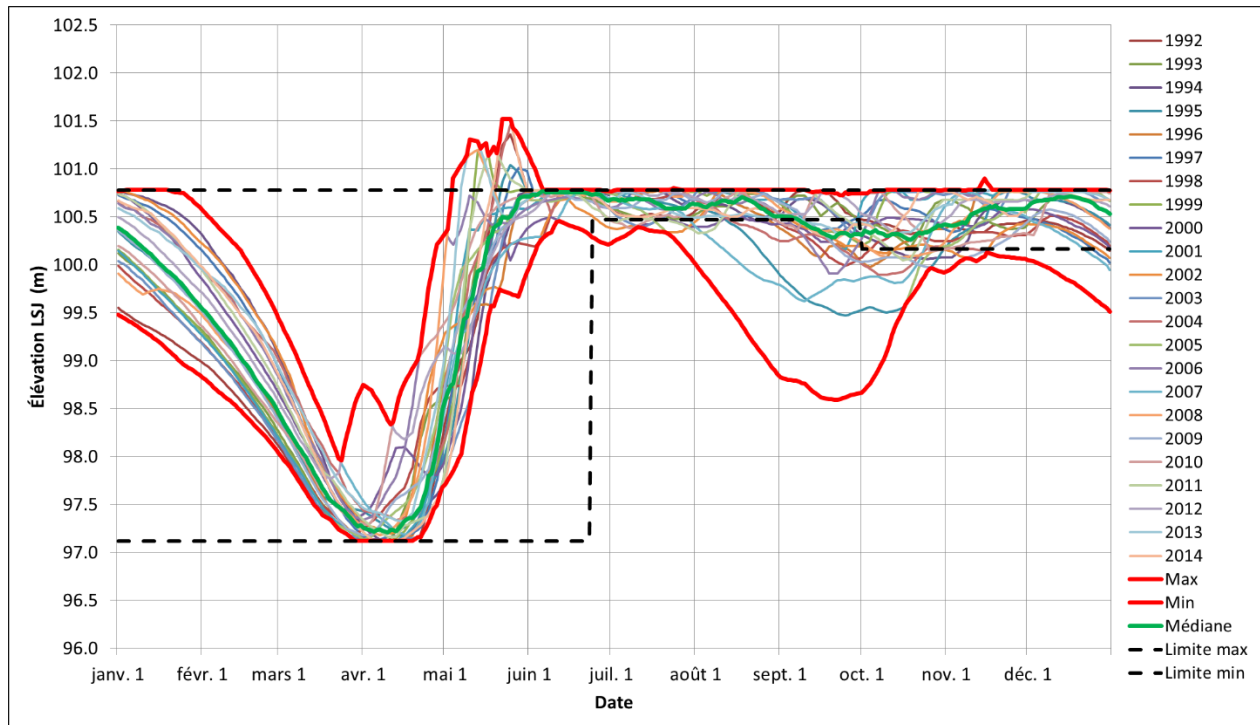


Figure 8.14: Scénario E

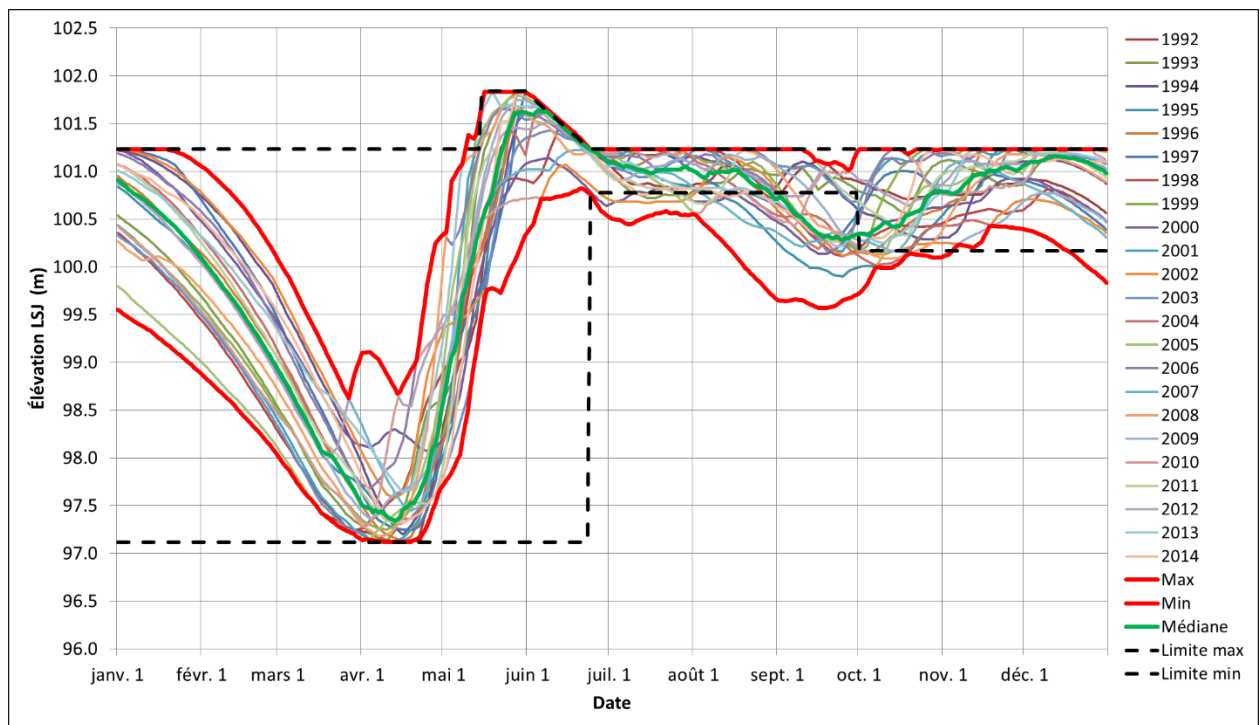


Figure 8.15: Scénario F

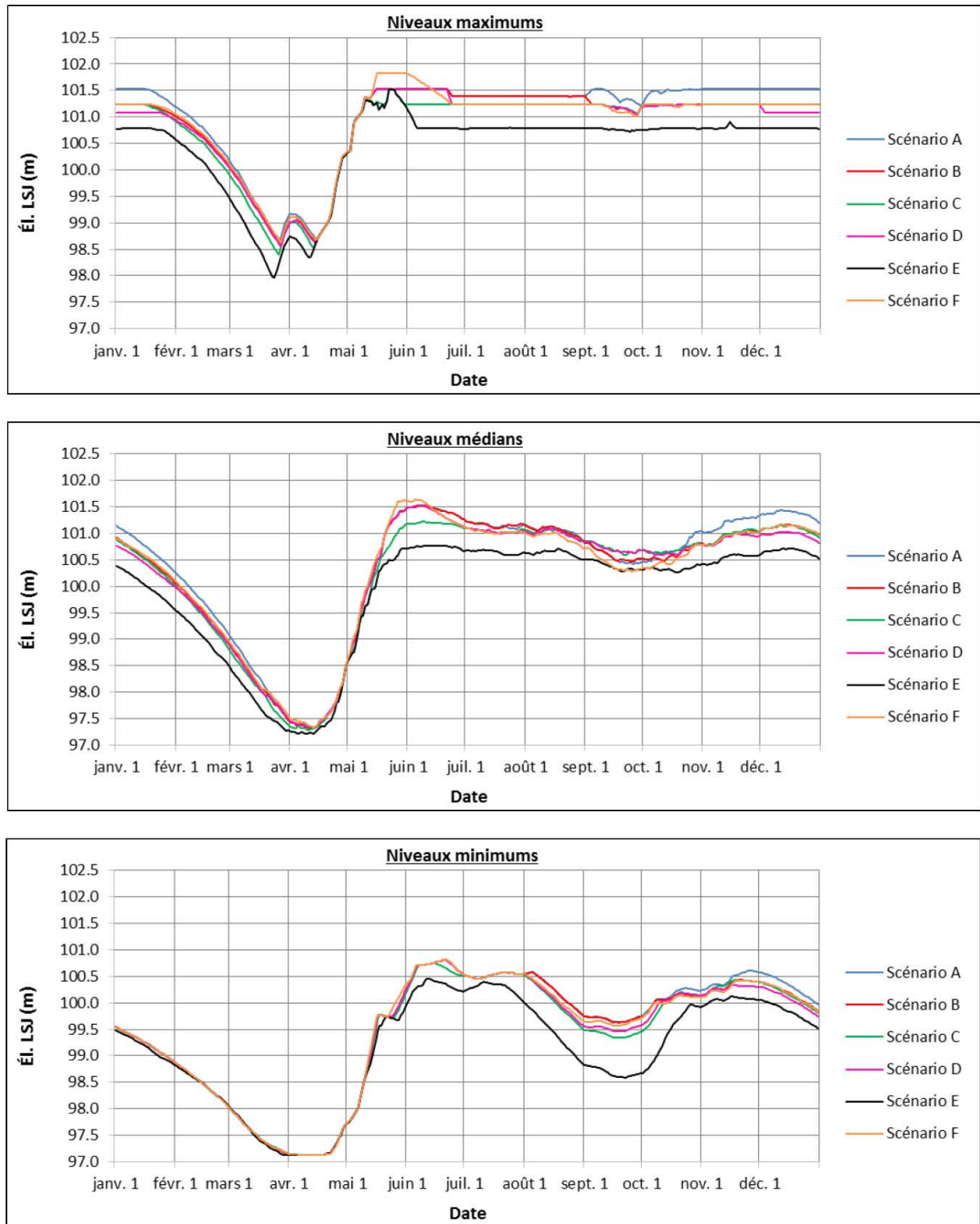


Figure 8.16: Scénarios A à F - Comparaison des niveaux maximums, médians et minimums

8.5 Périodes simulées

Pour limiter les temps de calculs, il avait été initialement prévu de ne simuler que des épisodes de tempêtes. Dans les études passées portant sur l'érosion des berges du lac Saint-Jean, une tempête était définie comme étant un épisode de vents supérieurs à 30 km/h pour une durée de 6 heures.

Ce type d'approche a d'abord été testé pour une année. Toutefois, afin d'avoir une meilleure représentativité des vents et de ne pas omettre un trop grand nombre de données, il a été décidé d'inclure dans la simulation toutes les tempêtes de plus de 15 km/h d'une durée d'au moins 6 heures consécutives ayant atteint au moins une fois 30 km/h. La simulation des vagues a ensuite été reprise en incluant toutes les données de vents, sans se limiter aux épisodes répondant aux critères de tempête. Les deux climats de vagues résultant de ces simulations ont été utilisés pour simuler le transport longitudinal à l'aide du modèle LITPACK. En comparant les résultats de transport des sédiments, il a été observé que les faibles vents causant des petites vagues pendant une longue période de temps avaient un effet tout aussi important que les tempêtes fortes mais de courte durée. Plus de détails sont donnés à ce sujet à la section 9.3.6. Suite à cette analyse, l'approche méthodologique de modélisation a été révisée pour inclure toutes les données de vent enregistrées pendant les périodes d'eau libre pour les simulations de vagues à long terme.

La durée des périodes d'eau libre pour les périodes passées et futures ont été établies sur la base des températures de l'air quotidiennes enregistrées à la station météorologique de Roberval et de l'analyse des changements climatiques (chapitre 5). Pour offrir un maximum de flexibilité, une période d'eau libre unique, regroupant toutes les possibilités, a été spécifiée pour chaque année de simulation. La période choisie, du 5 avril au 10 janvier, inclut toutes les périodes d'eau libre passées et anticipées dans le futur (tableau 8.4). Pour chaque année, les résultats obtenus pour les journées simulées en trop selon les dates indiquées au tableau 8.4 ont été éliminées en post-traitement.

8.6 Récapitulatif

Les simulations à long terme des vagues sur le lac Saint-Jean ont été effectuées avec les paramètres suivants :

- Modèle de terrain au maillage simplifié, incluant les données relevées en 2014;
- Formulations spectrale et instationnaire;
- Paramètres par défaut de MIKE21 SW pour les phénomènes de diffraction, déferlement, et rugosité;
- Données de vent enregistrées à Mistook avec facteur de recalage de 1,05;
- Niveaux d'eau moyens du lac sur une base quotidienne selon différents scénarios de gestion;
- Périodes d'eau libre historiques puis futures pour tenir compte des changements climatiques.

Tableau 8.4: Périodes d'eau libre pour les périodes passée (1992-2014) et future (2015-2037)

1992-2014			2015-2037*		
Année	Début	Fin	Année	Début	Fin
1992	15-mai	08-déc	2015	08-mai	18-déc
1993	10-mai	11-déc	2016	03-mai	21-déc
1994	21-mai	13-déc	2017	14-mai	23-déc
1995	14-mai	29-nov	2018	07-mai	09-déc
1996	12-mai	10-déc	2019	05-mai	20-déc
1997	07-mai	30-nov	2020	30-avr	10-déc
1998	03-mai	19-déc	2021	26-avr	29-déc
1999	08-mai	22-déc	2022	01-mai	01-janv
2000	07-mai	08-déc	2023	30-avr	18-déc
2001	09-mai	28-déc	2024	02-mai	07-janv
2002	01-mai	01-déc	2025	24-avr	11-déc
2003	13-mai	09-déc	2026	06-mai	19-déc
2004	12-mai	07-déc	2027	05-mai	17-déc
2005	08-mai	12-déc	2028	01-mai	22-déc
2006	26-avr	26-déc	2029	19-avr	05-janv
2007	08-mai	05-déc	2030	01-mai	15-déc
2008	07-mai	09-déc	2031	30-avr	19-déc
2009	03-mai	16-déc	2032	26-avr	26-déc
2010	22-avr	15-déc	2033	15-avr	25-déc
2011	12-mai	20-déc	2034	05-mai	30-déc
2012	18-avr	15-déc	2035	11-avr	25-déc
2013	06-mai	09-déc	2036	29-avr	19-déc
2014	12-mai	04-déc	2037	05-mai	14-déc
moyenne	07-mai	11-déc		30-avr	21-déc

* Basé sur le scénario médian des changements climatiques

8.7 Résultats pour la période 1992-2014

Les résultats de MIKE 21 SW peuvent être extraits sous forme de cartes ou de séries temporelles, pour chacune des variables sélectionnées par l'utilisateur. Les hauteurs de vagues, périodes de pointe et direction des vagues ont d'abord été extraites en plusieurs points pour générer des roses des vagues et servir d'intrants au modèle d'érosion des berges. Ces points ont été choisis au large des sites d'intérêt, à environ 2 kilomètres du rivage. La figure 8.17 illustre leur position et le tableau qui l'accompagne précise la profondeur d'eau des points d'extraction pour le niveau maximal de 101,54 m (16,5 pi).

Les roses de vagues obtenues au large des différents secteurs d'intérêt sont illustrées aux figures 8.18 à 8.20. Elles intègrent tous les résultats simulés en eau libre pour la période 1992-2014.

La direction dominante de chacune des roses des vagues illustre bien le rôle du fetch du vent dans la génération des vagues. Pour les points 1 à 5, situés dans les portions est et sud du lac, les vagues viennent principalement de directions comprises entre l'ouest et le nord. Pour les points 6 à 8, situés dans les secteurs ouest et nord du lac, la tendance s'inverse et les vagues viennent principalement des directions sud à est. La rose de vagues au centre du lac est de son côté bien représentative de la rose des vents de Mistook, et présente les mêmes secteurs dominants, soit l'ONO et l'ESE.

Outre la direction, la hauteur significative des vagues et leur fréquence sont représentées dans les roses des vagues. Les hauteurs significatives supérieures à 1,25 m avec une fréquence visible sur les graphiques (bandes rouge et jaune) permettent d'identifier les sites où les vagues les plus fortes prédominent. C'est le cas aux points 1, 2, 3a, 3b et 6a, soit les secteurs de St-Henri-de-Taillon Nord, Saint-Gédéon Sud, Métabetchouan-Lac-à-la-Croix et Mashteuiatsh. À noter que le pourcentage de calmes indiqué dans les roses de vagues correspond à la fréquence des vagues de hauteur inférieure à 10 cm.

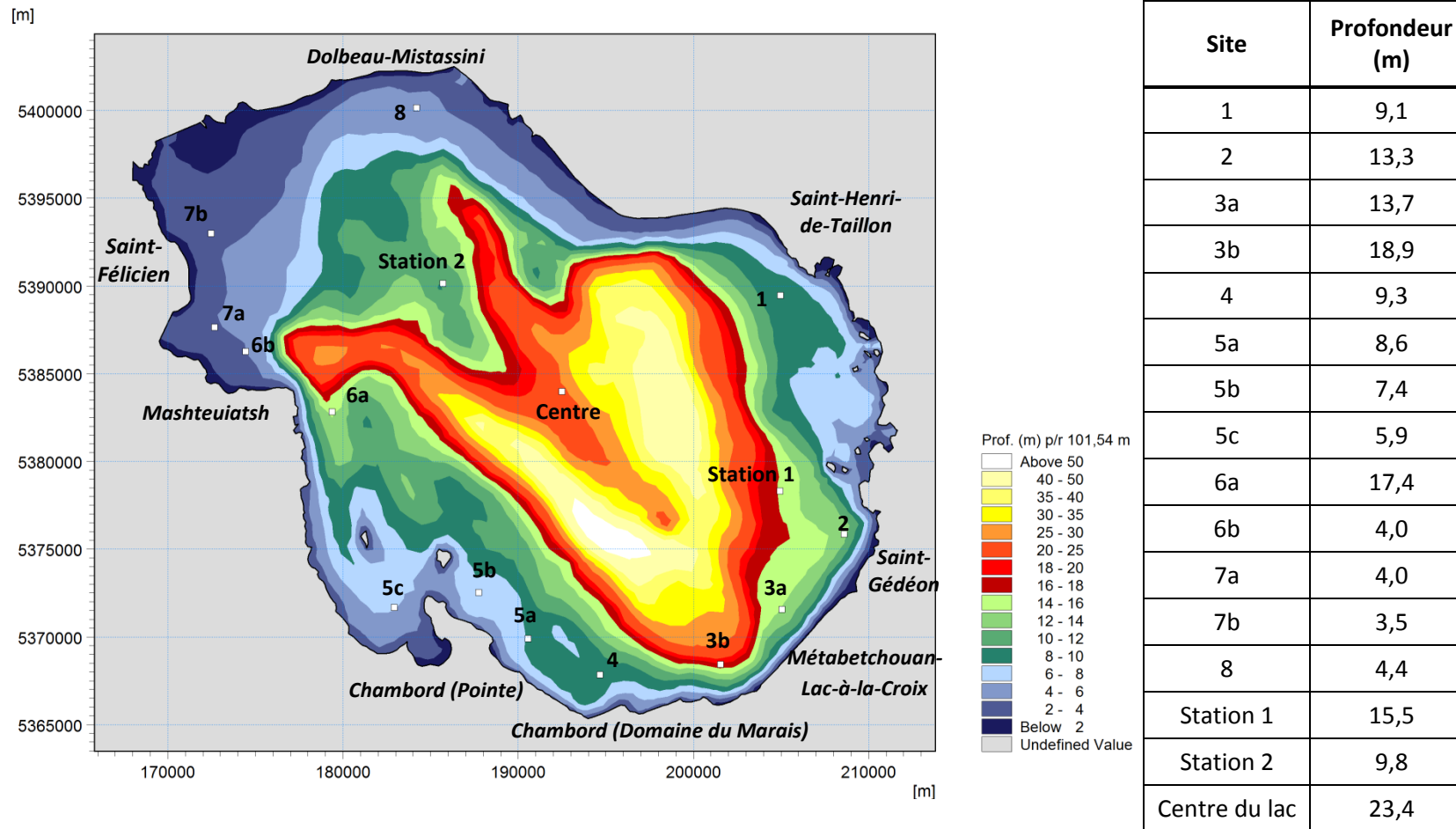


Figure 8.17: Sites d'intérêt et d'extraction des résultats de modélisation des vagues

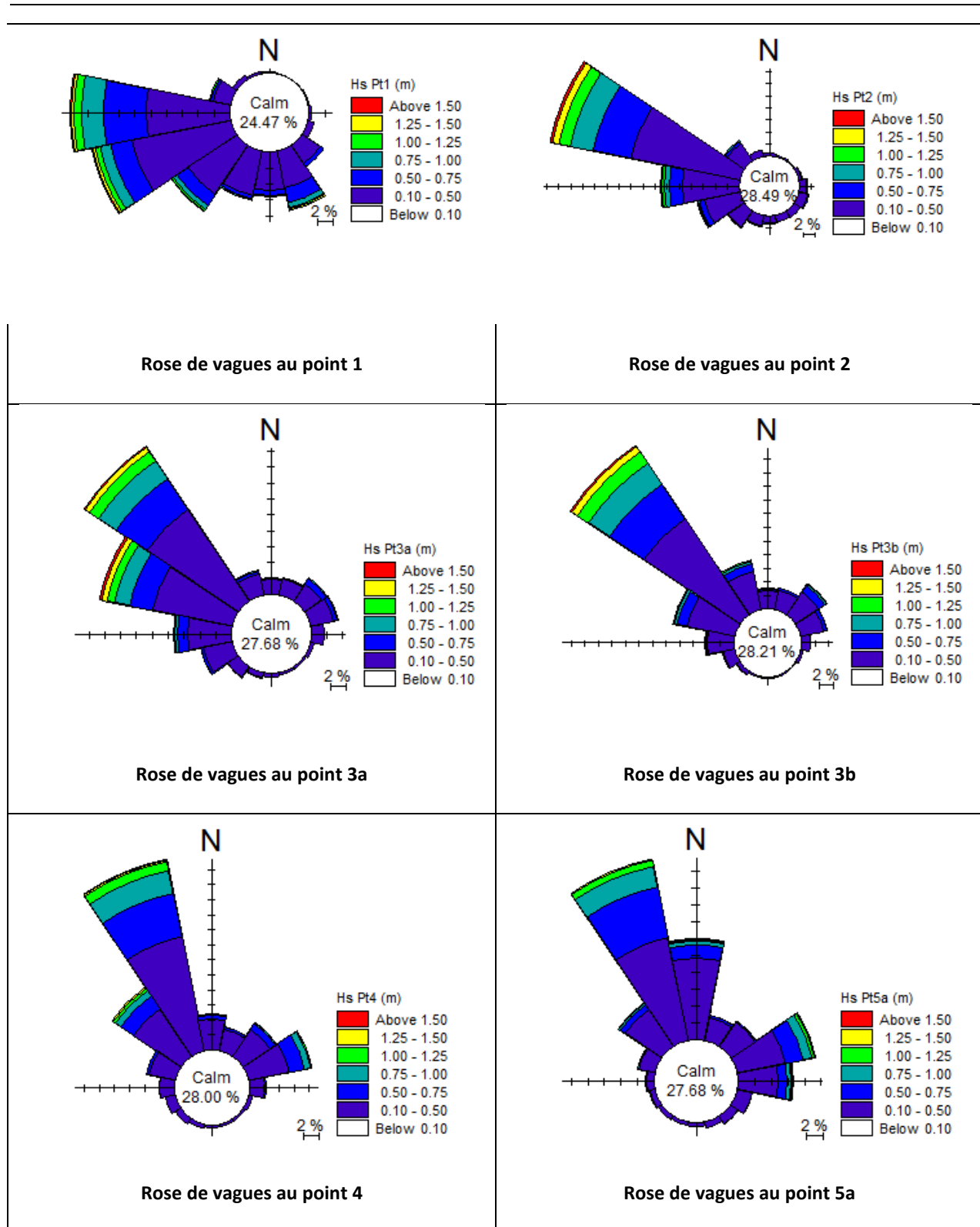


Figure 8.18: Rose des vagues 1992-2014 simulées aux points 1 à 5a

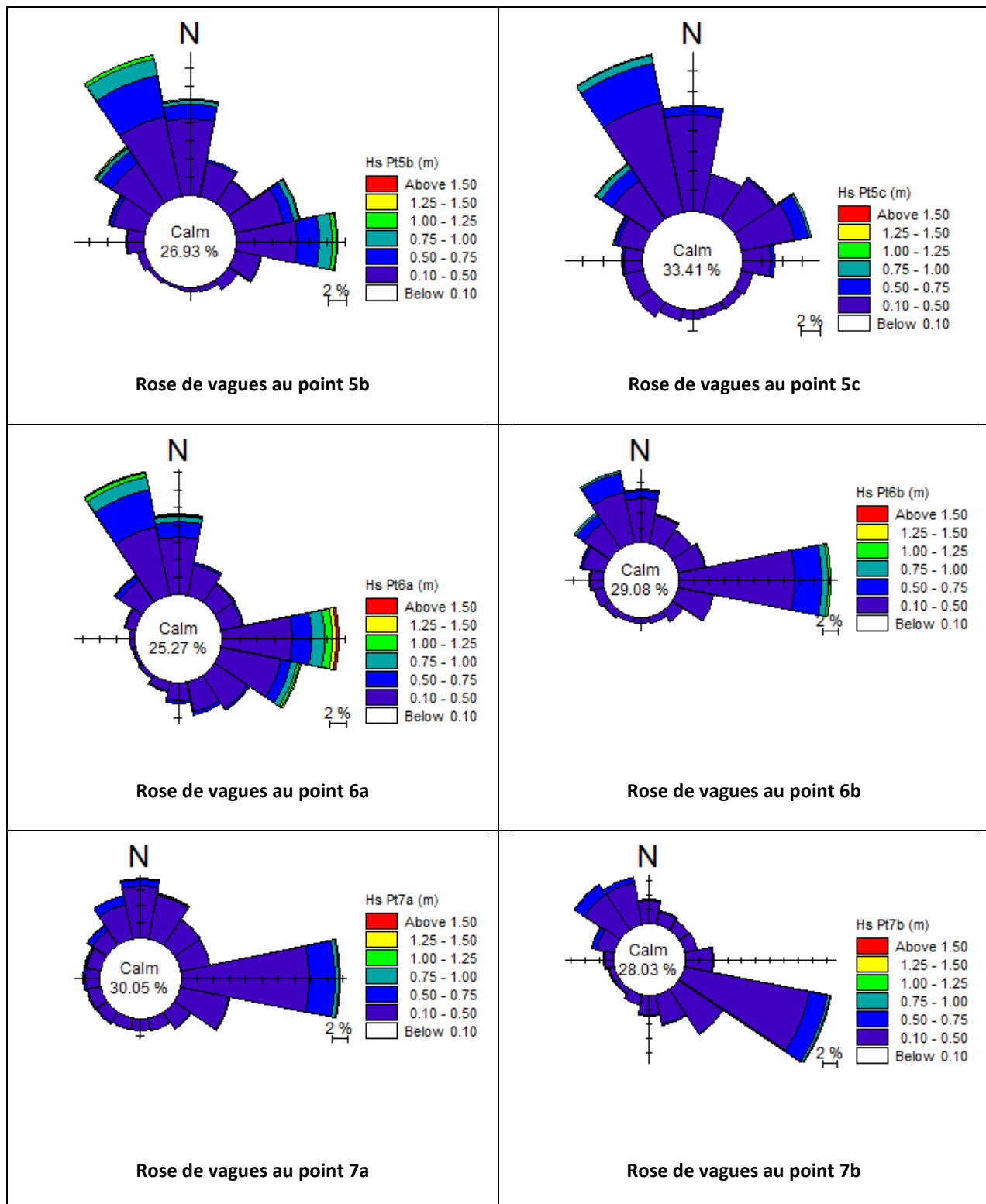


Figure 8.19: Rose des vagues 1992-2014 simulées aux points 5a à 7b

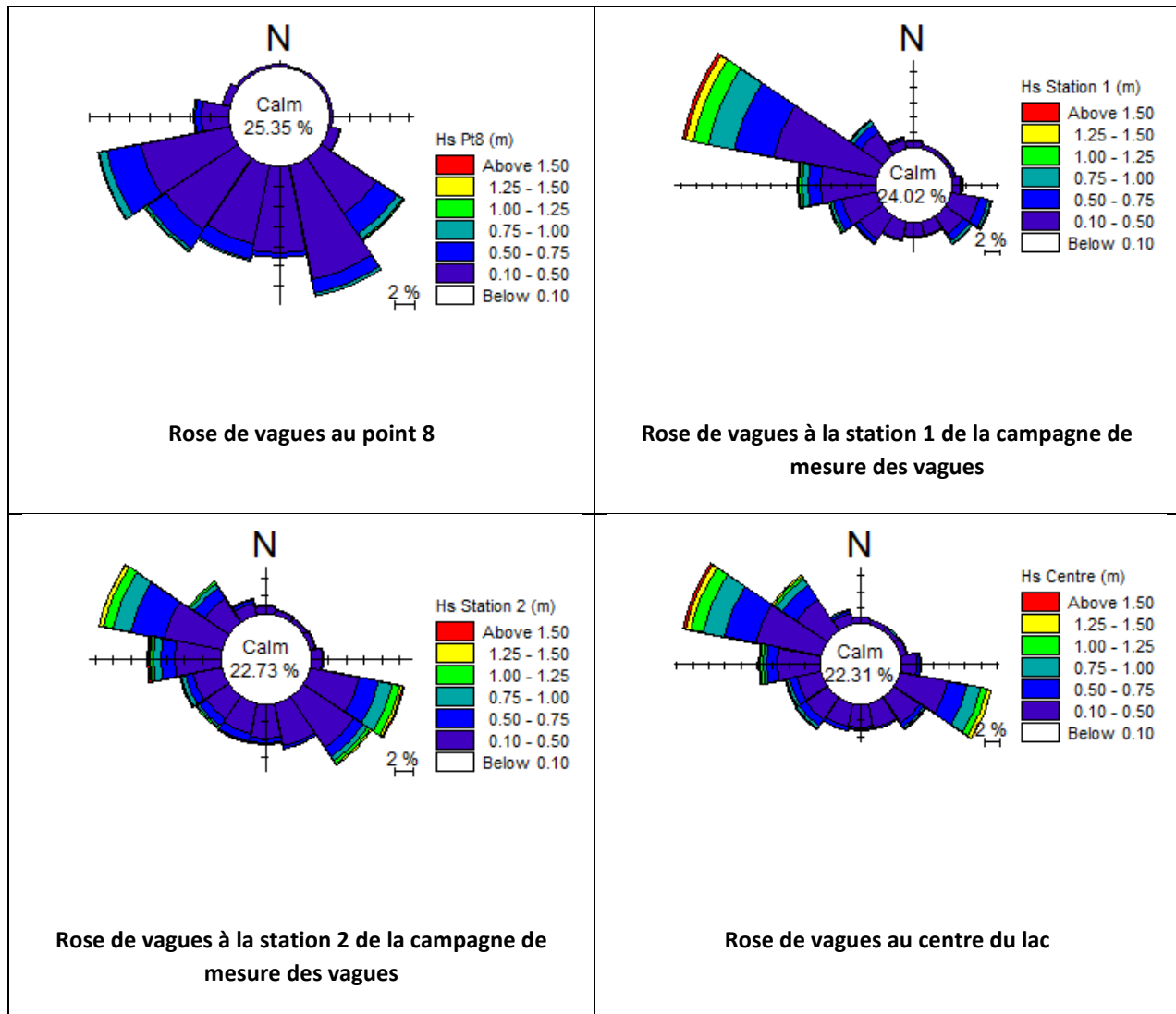


Figure 8.20: Rose des vagues 1992-2014 simulées au point 8, stations 1 et 2 et centre du lac

8.8 Résultats pour la période 2015-2037

La modélisation des vagues sur une période de 23 ans a été reprise pour simuler les conditions futures. Tel que mentionné à la section 8.4.2, ces simulations ont été effectuées en maintenant les mêmes paramètres que les conditions actuelles (incluant les vents), à l'exception des niveaux d'eau qui ont été modifiés pour tenir compte des différents scénarios de gestion d'eau envisagés par Rio Tinto Alcan et des périodes d'eau libre qui ont été allongées pour inclure l'impact des changements climatiques.

Les résultats ont été extraits et analysés aux mêmes points d'analyse que précédemment (voir figure 8.17). Globalement, les régimes des vagues d'un scénario à l'autre diffèrent peu. D'une part, les écarts de niveau d'un scénario à l'autre sont similaires, à l'exception du scénario E (voir figure 8.16). D'autre part, la

modélisation des vagues a été effectuée avec un modèle d'ensemble pour extraire les résultats au large des secteurs d'intérêt, ces derniers servant ensuite d'intrants au modèle d'érosion des berges.

À titre d'exemple, les figures 8.21 et 8.22 comparent différentes classes de hauteurs de vagues simulées en deux points d'analyse du modèle pour les conditions actuelles et le scénario E, ce dernier présentant les différences de niveau les plus importantes par rapport aux autres scénarios. Les points choisis pour l'exercice de comparaison caractérisent bien la gamme de profondeurs des points d'analyse (4 à 10 m d'eau sous le niveau de 101,54 m).

Au point 7a (figure 8.21), l'abaissement général du niveau d'eau du scénario E fait en sorte que les fortes vagues sont moins nombreuses, celles-ci subissant davantage l'influence des fonds en eau peu profonde. Les vagues perdent de l'énergie, ce qui résulte en une diminution de leur hauteur significative. À la station 1, qui est située en eau plus profonde, le régime des vagues avec le scénario E est pratiquement identique à celui simulé en conditions actuelles. Les vagues à ce point sont peu influencées par le niveau d'eau.

Le niveau d'eau du lac agit non seulement sur les vagues mais aussi sur la hauteur de plage vulnérable aux phénomènes d'érosion. Pour cette raison, l'influence des scénarios de gestion et des changements climatiques ressort davantage dans l'analyse des volumes d'érosion, abordée aux chapitres suivants.

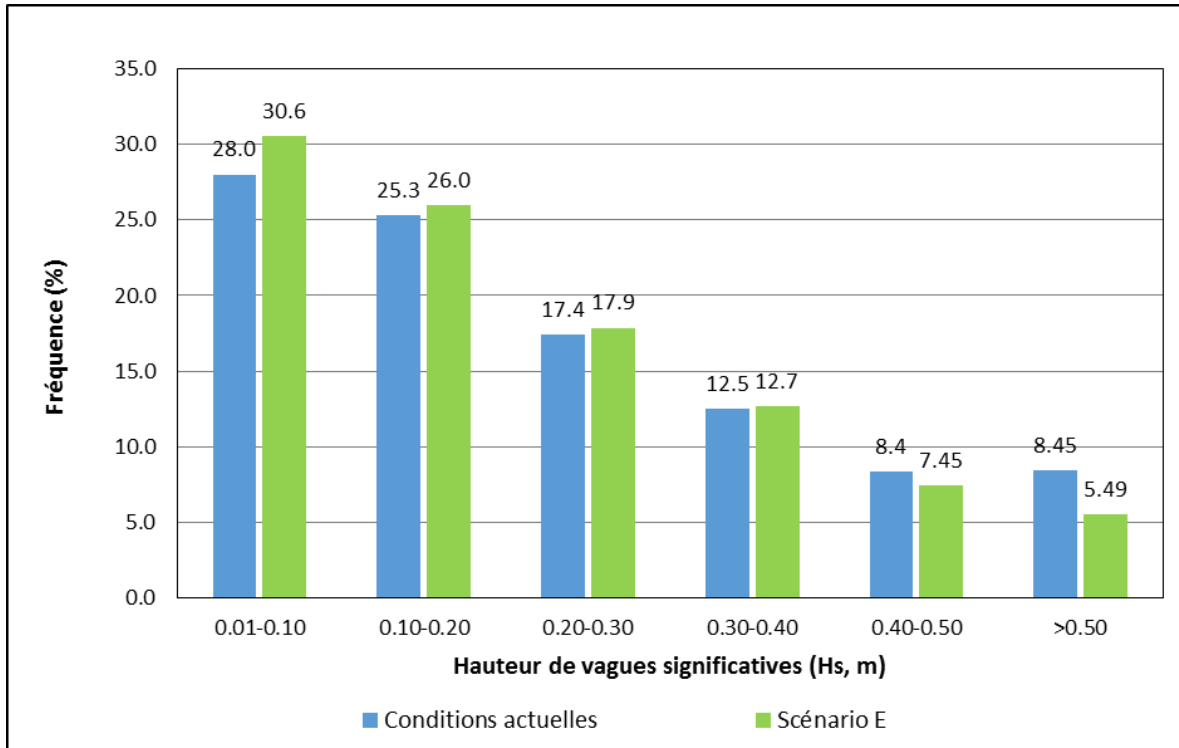


Figure 8.21: Classes de vagues simulées au point 7a en conditions actuelles et pour le scénario E

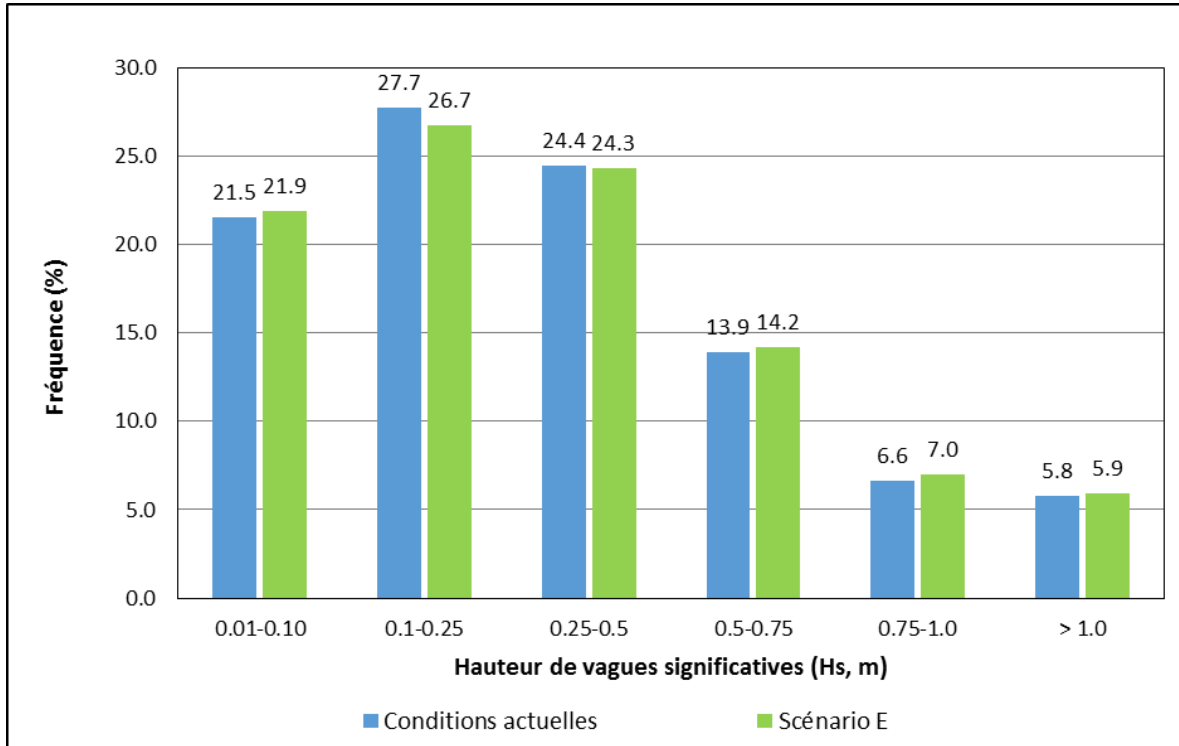


Figure 8.22: Classes de vagues simulées à la station 1 en conditions actuelles et pour le scénario E

9 MODÉLISATION DE L'ÉROSION DES BERGES

9.1 Approche méthodologique

Tel qu'indiqué à la section 3.3, l'approche méthodologique générale de modélisation consiste en la mise en œuvre de trois types de modèles numériques permettant de calculer les différents paramètres entrant en jeu dans l'érosion des berges. Les principaux objectifs liés à l'utilisation de ces outils de modélisation sont rappelés ci-dessous, tandis que le schéma de principe présenté à la figure 9.1 illustre les liens entre les différents types de données et résultats conduisant à l'évaluation des conditions érosives. Les sous-sections subséquentes présentent quant à elles les principales hypothèses de modélisation inhérentes aux différents modèles utilisés.

- Une approche bidimensionnelle globale pour obtenir les champs de niveaux d'eau (surcotes et décotes pour des épisodes de tempêtes) et de vagues sur l'ensemble du lac pour une période de 23 ans (modules HD et SW de la suite MIKE 21). Les résultats des simulations avec ces modèles ont servi d'intrants aux modèles de transports sédimentaires sous l'action des vagues;
- Une approche filaire (*one-line*) pour modéliser l'évolution à long terme de la position de la ligne de côte résultant du transport longitudinal induit par la série chronologique complète des vagues (module LITLINE ou, dans sa version plus récente, *CoastlineEvolution* de la suite LITPACK). L'intégration d'ouvrages de contrôle du transport longitudinal a été évaluée avec ce modèle;
- Une approche unidimensionnelle pour modéliser le transport transversal conduisant à une modification morphologique du profil de plage sous l'action des vagues de tempête (module LITPROF de la suite LITPACK). Ce type de modèle est généralement conçu pour simuler des événements de tempête à court terme (plusieurs jours, voire semaines) et permet d'évaluer la stabilité d'une plage face à un événement donné. Selon la morphologie initiale du profil de plage, cette dernière peut être plus ou moins sensible à l'action des vagues et l'érosion résultante peut être analysée en fonction des spécificités du site, notamment en comparant le recul potentiel à la largeur de plage. La stabilité des massifs de rechargement peut également être analysée à l'aide de ce type de modèle. L'utilisation sur le long terme n'est pas indiquée. Toutefois, afin de compléter la caractérisation des sites, les résultats ont également été traités de manière à ce qu'ils reflètent la variabilité des conditions de vagues et de niveaux d'eau.

Une série de simulations-types a permis de couvrir les aspects suivants :

- Caractérisation des conditions historiques;
- Évaluation de l'efficacité d'ouvrages existants et futurs pour contrôler l'érosion longitudinale;
- Évaluation de l'impact de l'allongement de la période d'eau libre causé par les changements climatiques;
- Évaluation de l'impact des scénarios alternatifs de gestion du niveau d'eau.

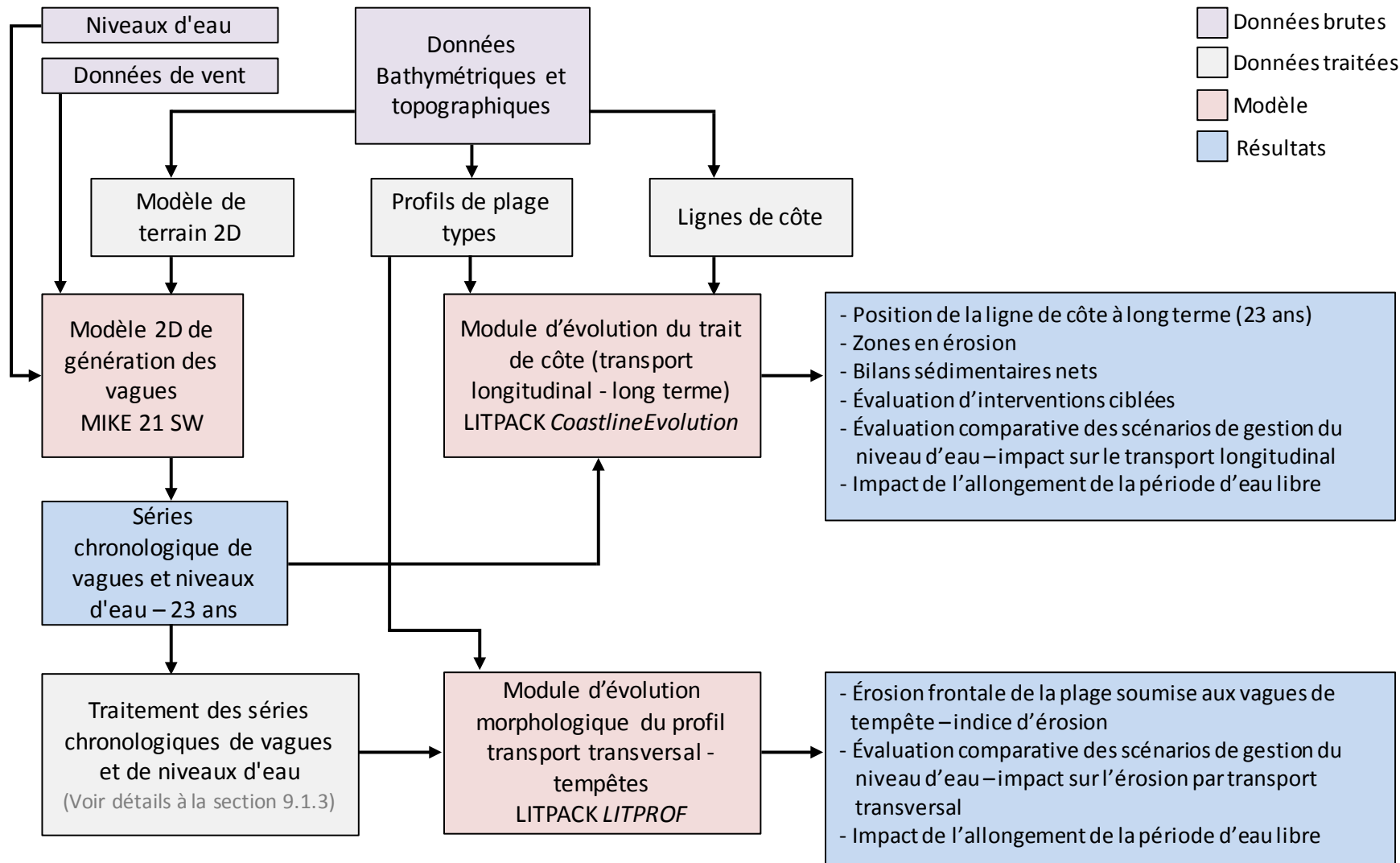


Figure 9.1: Organigramme de modélisation du transport sédimentaire

9.1.1 Utilisation des résultats du modèle global du lac

Les chapitres 6 à 8 du présent rapport décrivent de manière détaillée la méthodologie adoptée pour la modélisation bidimensionnelle. Rappelons seulement ici que le modèle global du lac a été utilisé pour calculer les vagues générées par les vents enregistrés à la station de Mistook sur une période de 23 ans (1992 à 2014) après avoir été calibré sur la base de mesures in-situ réalisées durant l'automne 2014. Des séries chronologiques de vagues ont ensuite été extraites au large des différents secteurs devant faire l'objet de modélisation du transport sédimentaire.

9.1.2 Approche filaire – Transport longitudinal et évolution du trait de côte à long terme

L'approche filaire consiste à faire l'hypothèse d'une quasi-uniformité dans la morphologie des plages étudiées caractérisée par des variations graduelles de la ligne de côte et des profils transversaux de plages. Ces hypothèses permettent de schématiser la bathymétrie afin de calculer les mouvements (accrétion ou érosion) de la ligne de côte induits par les processus complexes de transport longitudinal des sédiments dû à l'action des vagues et des courants littoraux qui en résultent.

Les modèles utilisés dans le cadre de cette approche, qui vise à évaluer l'évolution à long terme du trait de côte, font également l'hypothèse d'un profil transversal dont la morphologie ne varie pas. Cela revient à considérer ce profil comme étant dans un état d'équilibre au cours d'une longue période durant laquelle l'érosion frontale (ou transversale) des tempêtes est compensée par un processus de reconstruction par temps plus calme (bilan net nul à long terme en l'absence d'érosion longitudinale). Selon l'incidence des vagues et le transport littoral résultant, le trait de côte moyen peut alors être soit en recul (érosion), soit en accrétion, soit globalement stable.

La méthode des profils d'équilibre pour évaluer les bilans sédimentaires nets à long terme, adoptée par WSP dans l'étude d'impacts du PSBLSJ, est similaire. Elle se base également sur la position de la ligne de côte et pose l'hypothèse d'un profil ne subissant pas de variation morphologique.

Les modules *Littoral Drift* et *Coastal Evolution* du logiciel *Littoral Processes FM* (version récente de la suite LITPACK) ont été utilisés dans le cadre de la présente étude. Le premier module (*Littoral Drift*) repose principalement sur la combinaison d'un modèle hydrodynamique et d'un modèle de transport de sédiments (STPQ3D) et résout par différences finies les équations de quantité de mouvement dans un plan horizontal pour ensuite calculer le transit littoral résultant. Le second module (*Coastline Evolution*) utilise les résultats du premier pour établir par continuité une progression ou un recul de la ligne de côte. L'interface entre les deux modules se présente sous la forme de tables de transport dans lesquelles sont calculées les valeurs du transport de sédiments couvrant toute une gamme de hauteurs, périodes et directions de vagues ainsi que de niveaux d'eau.

Sans toutefois résoudre l'évolution bidimensionnelle de la morphologie des fonds, une formulation paramétrique permet de tenir compte de certains aspects bidimensionnels, comme notamment la présence de structures, telles que les épis ou les brise-lames détachés.

Le modèle filaire d'évolution du trait de côte a essentiellement été calibré à partir des mesures d'arpentage annuel des plages (position de la ligne de côte par rapport aux bornes inamovibles). La section 9.5 décrit de manière détaillée la phase de calibrage du modèle.

Les séries chronologiques complètes des vagues d'une durée 23 ans (1992-2014, 2015-2037) ont servi de base à la modélisation du transport longitudinal.

9.1.3 Approche unidimensionnelle – Transport transversal en réponse aux tempêtes

Le transport transversal et la réponse des profils de plage à l'action des vagues générées au cours d'événements de tempêtes ont été évalués à l'aide du module LITPROF de LITPACK. Ce module permet de simuler l'attaque des vagues sur un profil-type de plage ainsi que l'évolution morphologique résultant du transport transversal à la côte. Ce modèle étant conçu pour l'étude d'événements de durée limitée (court terme), il est utilisé pour évaluer l'effet du niveau maximal de gestion sur l'érosion et le recul du trait de côte lors d'événements de tempêtes.

De la même manière que pour le module de transport longitudinal, la formulation de LITPROF est basée sur des hypothèses permettant de schématiser la bathymétrie. Le modèle opère sur un profil unique et considère que les isobathes sont parallèles. Le modèle combine également un modèle hydrodynamique et un modèle de transport de sédiments. Un système de tables de transport permet de calculer les taux de transport en fonction des vagues incidentes et la morphologie du profil est mise à jour en conséquence à intervalle régulier.

Dans un premier temps il s'agit de déterminer les événements clé représentatifs de chacun des sites à l'étude et couvrant une large gamme de conditions de vagues. Les séries chronologiques horaires de vagues obtenues à partir des simulations sur le modèle global du lac ont servi de base à la définition des cas de calculs. Le diagramme de la figure 9.2 illustre le cheminement de la méthode décrite ci-après.

Un événement est typiquement défini ici par la valeur maximale annuelle de l'énergie des vagues cumulée sur une période donnée. Dans le cas de la présente étude, cette période a été établie à 72 heures. En effet, l'examen des données horaires de vagues au cours des 23 années de référence (1992-2014) dans le secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix montre que la tempête du 23 au 26 novembre 2013 a généré des vagues de plus de 1 m pendant près de 60 heures. Ainsi le choix d'une période de 72 heures apparaît adéquat pour inclure non seulement des événements prolongés de forte intensité mais aussi des événements de plus faible intensité tout en limitant la durée des conditions calmes. La formulation de ce type de modèle étant axée sur les vagues de tempête, le calcul par temps calme a tendance à introduire des erreurs qui, cumulées sur une période prolongée, conduisent à des résultats clairement non représentatifs des conditions réelles. Pour cette raison, les périodes de temps calme doivent être limitées durant les événements retenus.

Pour chaque site, la valeur maximale de l'énergie des vagues cumulée sur une période de 72 heures a été calculée pour chacune des 23 années de référence. Ces maximums annuels ont ensuite été classés et leur période de récurrence a été établie. Cinq événements correspondant aux périodes de récurrence 1 an, 2 ans, 5 ans, 10 ans et 15 ans ont ensuite été retenus pour les simulations. Les séries chronologiques horaires

des vagues correspondant aux événements d'une durée de 72 heures retenus ont servi d'intrant au modèle. L'annexe D présente les caractéristiques (H_s et direction) des vagues utilisées pour les simulations.

Ensuite, des simulations pour les conditions de vagues de chacun de ces cinq événements ont été effectuées sous six niveaux d'eau différents (17,5 pi, 16,5 pi, 15,5 pi, 14 pi, 12 pi et 9,5 pi). Pour chaque site, un tableau présentant le volume érodé obtenu pour chaque combinaison vagues/niveaux d'eau est alors produit. Le diagramme de la figure 9.3 illustre cette méthode. Les reculs associés sont également déterminés pour être comparés aux largeurs de plage disponibles.

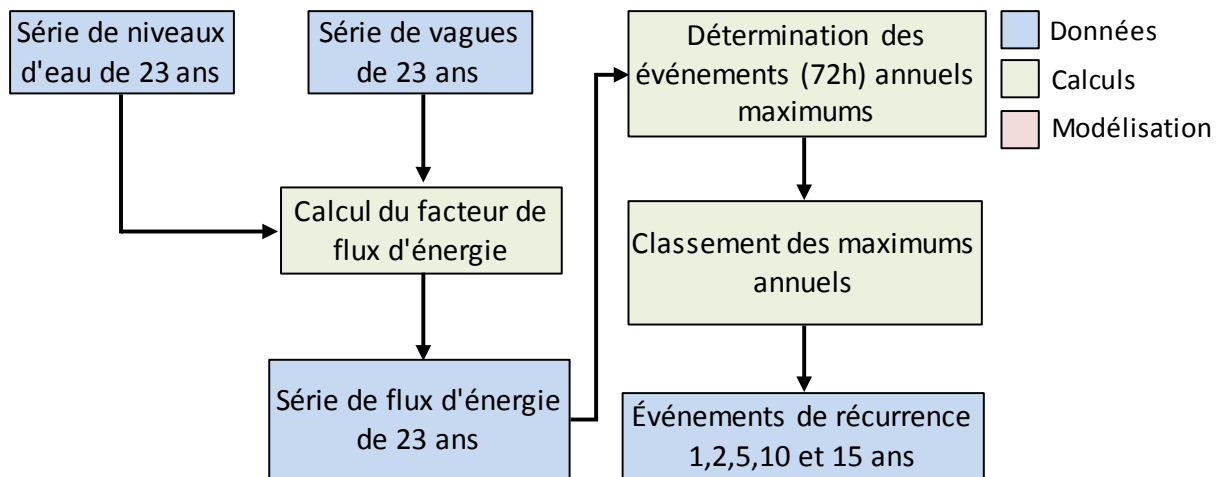


Figure 9.2: Organigramme de modélisation du transport transversal

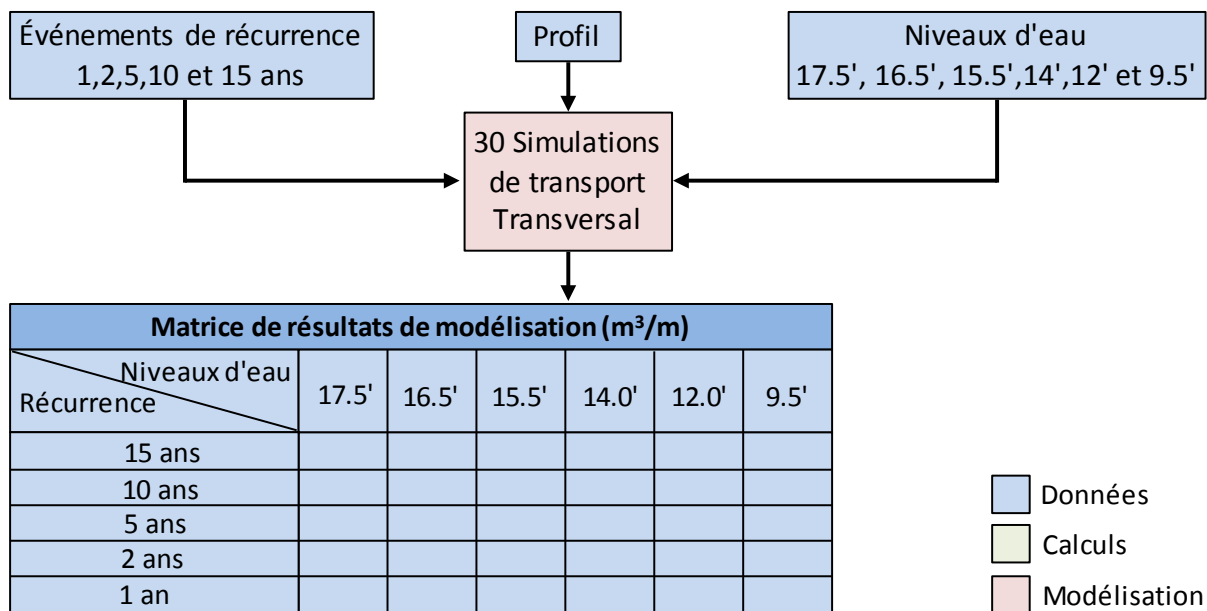


Figure 9.3: Organigramme de modélisation du transport transversal (suite)

Cette approche est également utilisée pour évaluer la stabilité des massifs de rechargement. En effet les massifs de rechargement présentent généralement une pente relativement raide qui tend à s'adoucir rapidement suite aux tempêtes rencontrées au cours des premières années.

Les résultats des simulations de transport transversal permettent de caractériser la réponse des sites en fonction des événements et du niveau d'eau. Toutefois, compte tenu de la variabilité des conditions de vagues et de niveaux d'eau sur la période de 23 ans (1992-2014) à l'étude, on a cherché à intégrer cette variabilité au sein d'un paramètre permettant de caractériser de manière plus globale l'érosion transversale moyenne annuelle en chaque site. Les séries chronologiques de vagues et de niveaux d'eau ainsi que les valeurs du tableau des volumes érodés (résultats des simulations) ont donc été traitées selon la méthode décrite à la figure 9.4 afin d'établir un indice d'érosion. Ce dernier est utilisé pour évaluer la vulnérabilité des sites à l'érosion frontale les uns par rapport aux autres.

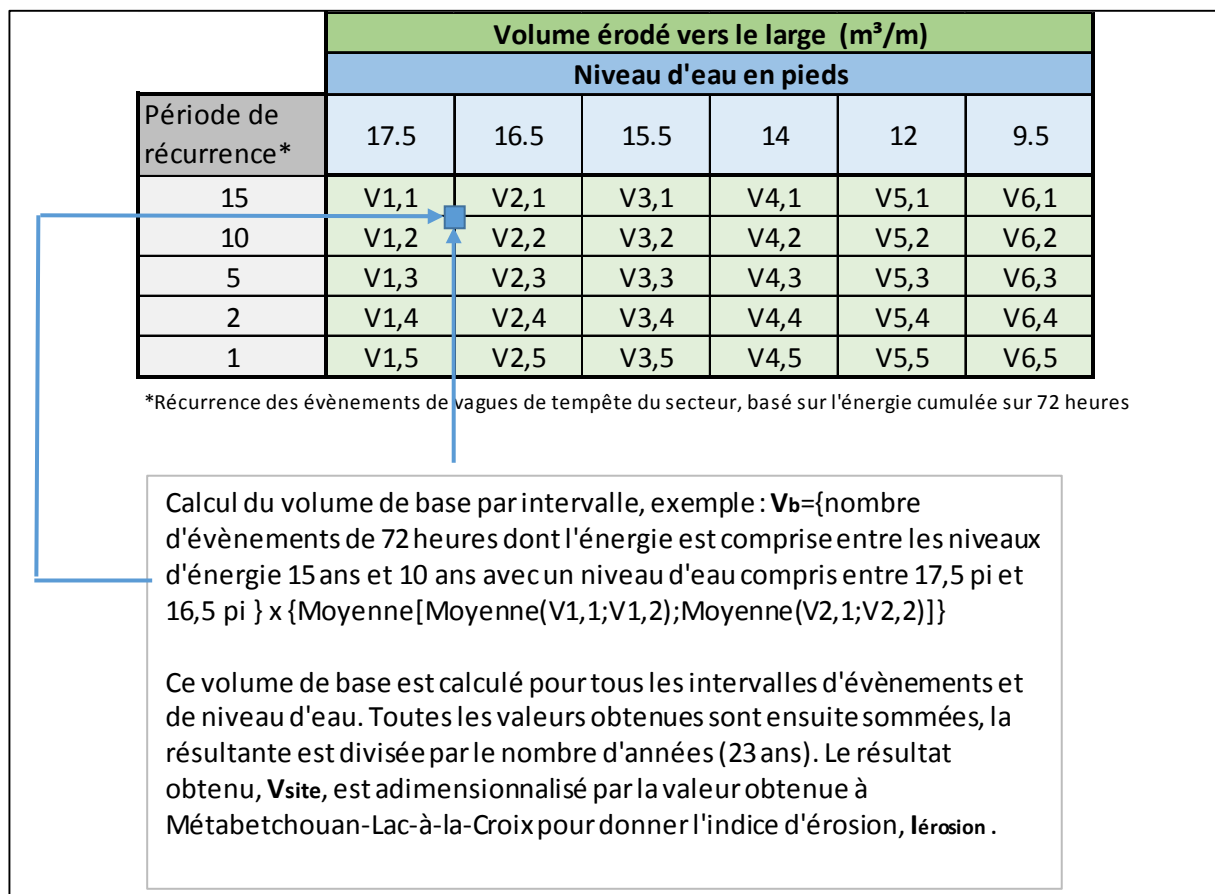


Figure 9.4: Méthode de calcul de l'indice d'érosion

Initialement cette méthode visait à quantifier les volumes d'érosion transversale à long terme en chacun des sites à l'étude (potentiel annuel d'érosion brute). Toutefois, cette approche donne généralement lieu

à une valeur annuelle qui semble largement surestimée, ne reflétant pas adéquatement la réalité des sites, notamment lorsque comparée aux volumes impliqués dans les rechargements de plage.

Les paramètres suivants permettent de comprendre certaines limitations de la méthode :

- Tel qu'indiqué précédemment, cette approche ne tient compte que des vagues de tempête et ne considère pas les périodes de temps calmes qui contribuent généralement à la reconstruction naturelle des plages;
- Le profil de base est le même pour chaque simulation et le volume qui est comptabilisé ne tient donc pas compte de l'adoucissement des pentes entre les événements rapprochés;
- En chacun des sites, le modèle a été calibré sur le recul typique du trait de côte (voir section 9.6) mais pas sur la morphologie après tempête ni sur les volumes correspondants, ce qui limite l'utilisation du modèle et la portée des résultats.

Devant ces limitations et les incertitudes sur la valeur absolue du volume d'érosion brut résultant de cette méthode globale, celle-ci doit plutôt être utilisée à l'aide de la valeur adimensionnée (l'indice d'érosion tel que défini sur le diagramme de la figure 9.4) pour caractériser la sensibilité d'un site à l'érosion transversale par rapport aux autres, et pour évaluer la réponse relative d'un site à différents scénarios de gestion du niveau d'eau.

L'indice adimensionnel a été défini comme le rapport entre le potentiel d'érosion brute annuel du site à l'étude et le potentiel d'érosion brute annuel obtenu à un site de référence. Le secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, l'un des plus exposés aux tempêtes dominantes, bien connu des riverains et suivi de près par Rio Tinto Alcan, a été retenu comme site de référence.

9.2 Secteurs à l'étude

Tel que mentionné précédemment, huit principaux secteurs vulnérables à l'érosion font l'objet d'un suivi régulier depuis le début du PSBSJ en 1986 (figure 9.5). Ces huit grands secteurs ont été subdivisés de manière à isoler les tronçons répondant aux hypothèses de modélisation. Le tableau 9.1 présente les principales caractéristiques des tronçons modélisés en termes de longueur, orientation et présence d'ouvrages. Soulignons également que les sites de Dolbeau-Mistassini, Métabetchouan-Lac-à-la-Croix et Saint-Henri-de-Taillon Nord ont été identifiés et désignés par Rio Tinto Alcan par le terme générique de « sites spécifiques ». Ces derniers ont fait l'objet d'une étude plus détaillée, notamment avec une analyse des interventions potentielles dans plusieurs sous-secteurs en érosion. Les secteurs modélisés selon une approche bidimensionnelle sont quant à eux présentés dans les deuxième et troisième volumes du rapport d'étude.

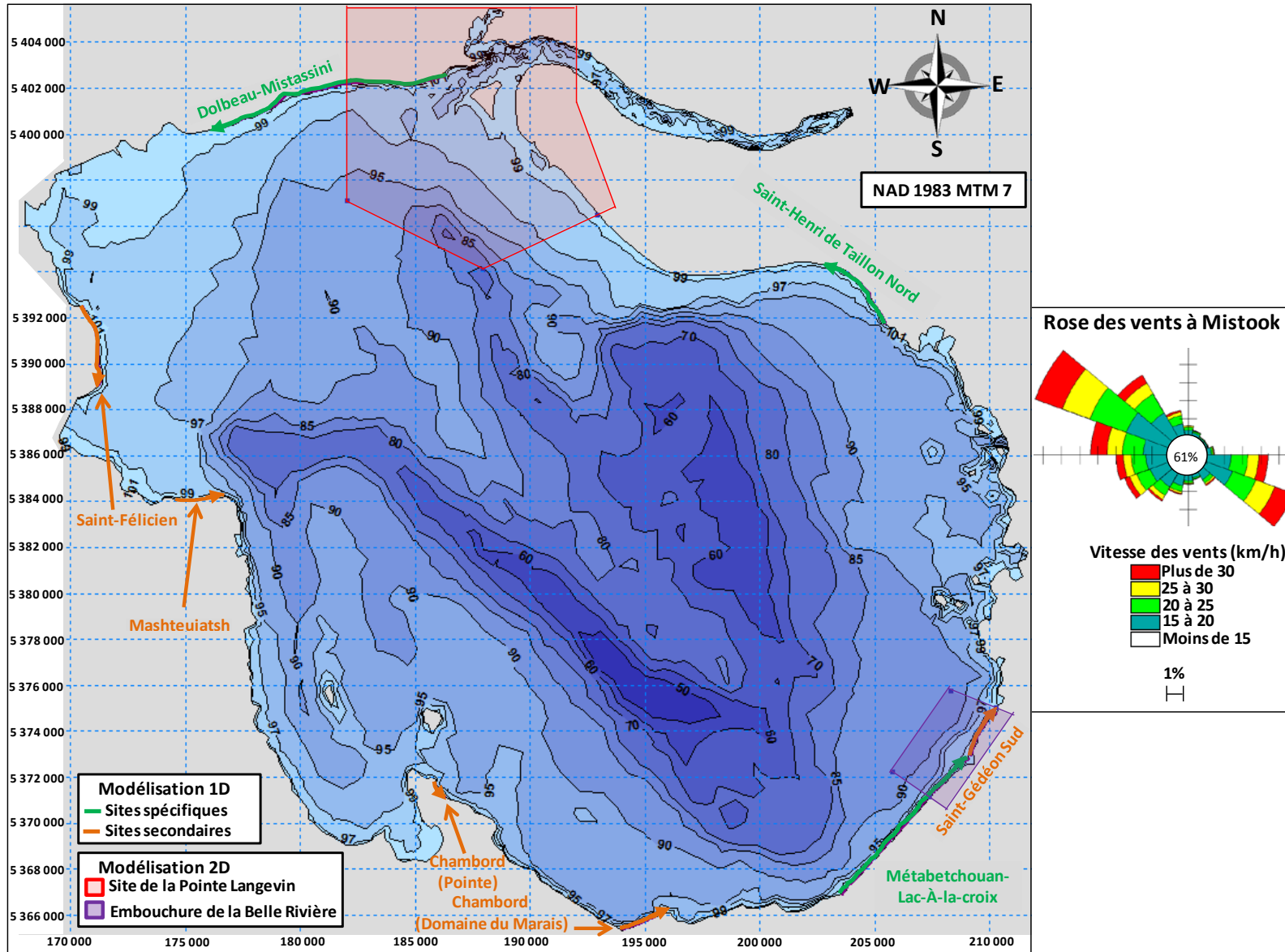


Figure 9.5: Localisation des secteurs modélisés

Tableau 9.1: Caractéristiques des secteurs modélisés

Secteur	Longueur de la plage modélisée	Origine X	Origine Y	Orientation Moyenne par rapport au Nord	Ouvrages dans le modèle 1D
Saint-Gédéon Sud	2 200 m	209459	5372776	28°	7 épis
Métabetchouan-Lac-à-la-Croix	8 040 m	203644	5366863	43°	20 épis + 2 brise-lames
Chambord (Domaine du Marais)	1 990 m	194061	5365231	70°	-
Chambord (Pointe)	720 m	185777	5371591	140°	-
Mashteuiatsh	1 300 m	174605	5383952	90°	5 épis
Saint-Félicien	3 480 m	170364	5392440	173°	4 épis + 1 brise-lames
Dolbeau-Mistassini	10 300 m	186121	5403426	258°	-
Saint-Henri-de-Taillon Nord 1	2 420 m	205069	5393134	305°	-
Saint-Henri-de-Taillon Nord 2	1 420 m	205669	5391859	325°	-
Total	33 210 m	-	-	-	31 épis + 3 brise-lames

9.3 Données de base pour chacun des secteurs

9.3.1 Profils bathymétriques

La bathymétrie est essentiellement représentée par des profils transversaux caractéristiques des plages à l'étude. Les profils ont été extraits à partir de modèles numériques de terrain locaux élaborés avec les diverses sources de données présentées au chapitre 6. Alors que les données de la campagne de mesures de l'automne 2014 permettent une description plus raffinée des plages, les données historiques (SHC) ont été utilisées afin de compléter les profils plus au large. Les figures 9.6 et 9.7 illustrent les profils typiques des secteurs à l'étude utilisés dans la modélisation. Les profils bathymétriques sont complétés par les relevés topographiques jusqu'à la cote 103 m.

9.3.2 Lignes de côte

Les lignes de côte historiques à l'élévation 16,5 pi (101,54 m), relevées chaque année au début du mois de novembre, ont été extraites de la base de données d'arpentage des plages de Rio Tinto Alcan. Ces données permettent d'évaluer les mouvements des lignes de côtes au cours du temps et constituent la principale base de calibrage des modèles (voir sections 9.5 et 9.6).

9.3.3 Contours bathymétriques - Isobathes

Bien que l'hypothèse d'isobathes parallèles à la ligne de côte soit généralement bien adaptée près de la plage, celle-ci devient moins valide en s'éloignant vers le large, ce qui peut affecter la réfraction des vagues. Cet aspect bidimensionnel de la bathymétrie est schématisé dans le modèle d'évolution du trait de côte à long terme (transport longitudinal) afin de mieux représenter le processus de réfraction à

l'approche de la côte. Ce dernier, présenté plus en détails à la section 2.1.1, conditionne la direction des vagues jusqu'à la côte et joue un rôle important sur la direction du transport sédimentaire. Rappelons seulement ici que la crête des vagues a toujours tendance à tourner pour s'aligner avec les isobathes et ultimement avec la ligne de côte.

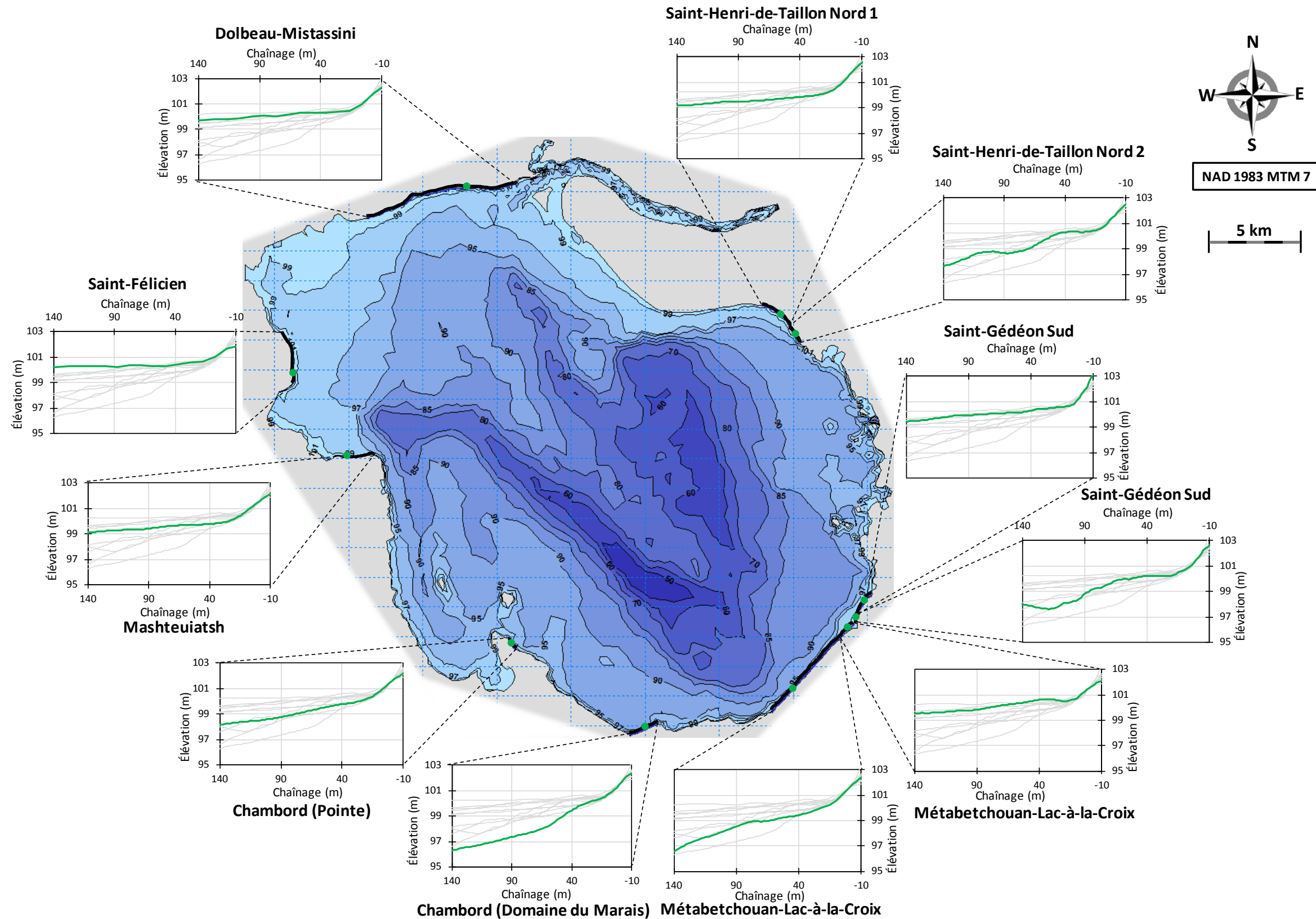


Figure 9.6: Profils de plage des différents secteurs à l'étude

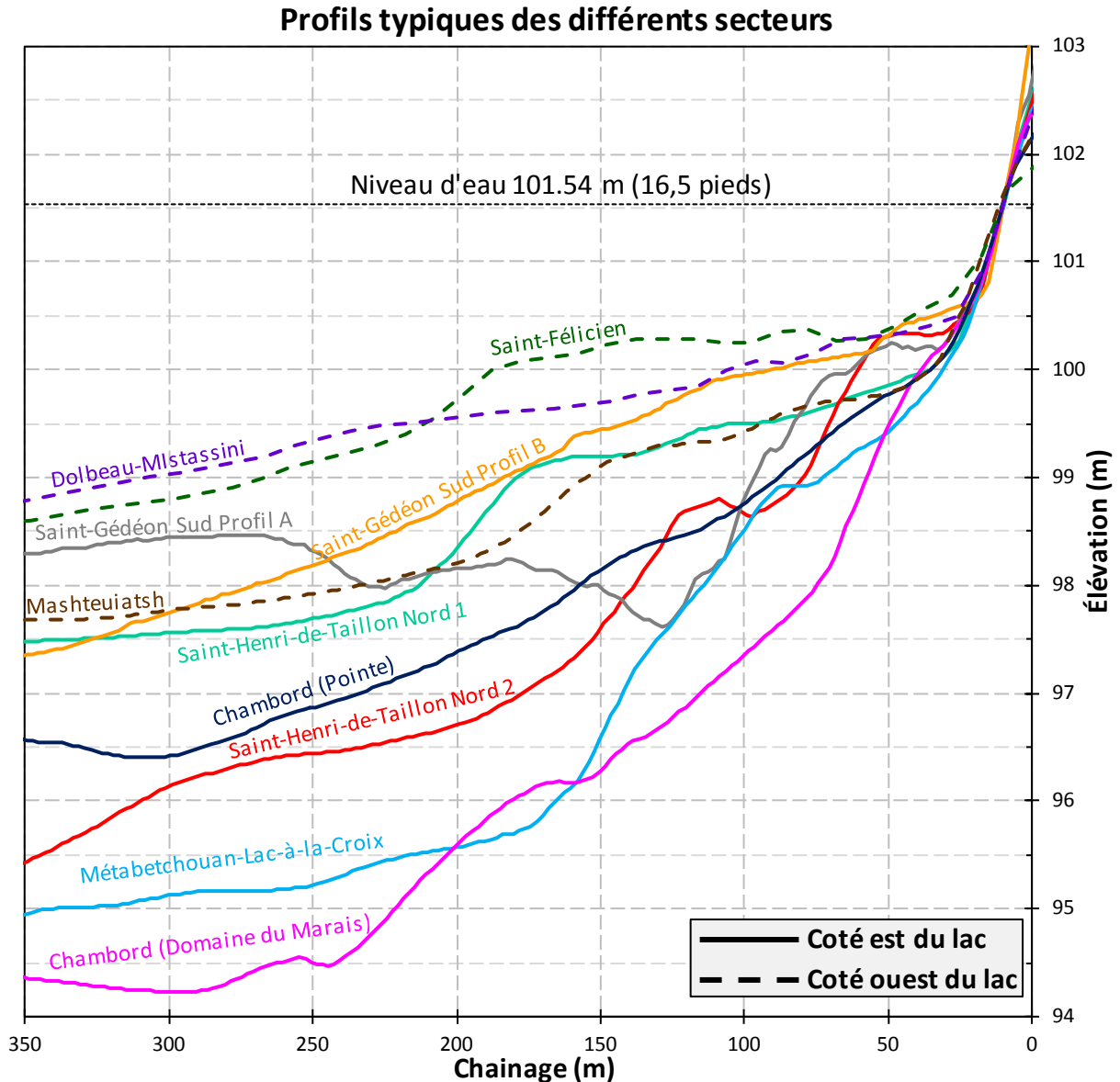


Figure 9.7: Profils typiques des différents secteurs à l'étude

9.3.4 Granulométrie

La granulométrie des plages et du fond du lac Saint-Jean fait l'objet d'une grande variabilité dans l'espace. Celle-ci s'explique principalement par la diversité des matériaux granulaires utilisés pour les nombreux rechargements ayant eu lieu au cours des 30 dernières années ainsi que pour les plages suspendues réalisées dans les années 1970 (éléments de gros calibre recouvert de sables fins). Les matériaux de rechargement couvrent une gamme de calibres relativement étalée entre le sable et le gravillon. Certains secteurs font l'objet d'une alternance entre différents types de matériaux et ce, autant dans l'espace que dans le temps. De plus, le sable naturel du lac est généralement plus fin que celui utilisé dans les rechargements, ce qui augmente davantage la diversité du sable présent autour du lac.

Outre la distribution longitudinale non uniforme, la distribution transversale est également non uniforme. Alors que les matériaux plus grossiers (sables et gravillon) caractérisent la bande littorale soumise aux rechargements, le sable original du lac, plus fin, caractérise la zone infralittorale plus au large. Le diamètre médian, d_{50} , des plages du lac Saint-Jean peut ainsi varier entre 0,2 mm et 20 mm en fonction du site considéré.

Lorsque disponibles, les données proviennent principalement des rapports des travaux de rechargement des plages. Certaines données historiques sur la granulométrie naturelle des plages et des fonds du lac sont également disponibles dans la première étude d'impacts sur l'environnement émise en 1983 (réf. [5]). Il n'y a toutefois eu aucune caractérisation récente des secteurs de plage permettant de définir clairement la répartition granulométrique longitudinale et transversale résultant de près de 30 ans d'interventions dans les différents secteurs.

Dans la mesure où le transport sédimentaire s'effectue en grande partie à proximité des berges, le sable utilisé durant les rechargements a été privilégié dans le modèle par rapport au sable naturel présent dans les zones plus profondes du lac. De plus, les incertitudes sur la répartition longitudinale de la granulométrie ne permettant pas d'établir clairement le diamètre moyen (d_{50}) dans les différents sous-secteurs à l'étude, il a finalement été décidé de fixer une granulométrie moyenne uniformément répartie le long de la ligne de côte.

La granulométrie utilisée dans le modèle numérique a donc été fixée à un diamètre uniforme de 1,3 mm pour l'ensemble des secteurs. Cette dimension de particule a été obtenue par l'étude de diverses courbes granulométriques d'échantillons de matériaux des rechargements entre 1986 et 2014 pour les secteurs de Saint-Gédéon Sud, Métabetchouan-Lac-à-la-Croix et Chambord (Pointe). Ces courbes granulométriques sont disponibles dans certains rapports de travaux de rechargement présentés dans la base de données de Rio Tinto Alcan.

Une étude de sensibilité sur la granulométrie a été effectuée à l'aide de simulations supplémentaires pour chacun des secteurs à l'étude. La granulométrie utilisée lors de ces simulations variait entre 0,3 mm et 5 mm afin d'évaluer l'influence de ce paramètre sur l'érosion simulée. L'ensemble des résultats de simulation est présenté dans le tableau 9.2. Il est possible de constater que le fait de choisir un diamètre moyen légèrement différent, soit 0,5 mm ou 2 mm, provoque des variations de l'ordre de +/- 15%. Cependant, un diamètre moyen fin de 0,3 mm provoque une augmentation importante de l'érosion, de plus de 75% par rapport aux résultats obtenus avec le diamètre moyen de référence (1,3 mm). De même, l'utilisation d'un diamètre moyen très grossier de 5 mm (le d_{50} des gravillons peut atteindre environ 2 mm) engendre une diminution de l'érosion d'environ 50% par rapport à la référence. Cette constatation démontre la non-linéarité de la corrélation entre le diamètre moyen des grains et le transport sédimentaire. Ce transport est calculé à partir, entre autre, de la vitesse de chute des sédiments qui est elle-même non-linéaire. Cette vitesse diminue très rapidement lorsque le diamètre moyen descend en dessous de la barre de 0,5 mm.

En ce qui concerne le transport transversal (tableau 9.3), la variation du volume érodé en fonction du diamètre des sédiments est de l'ordre de +/-15% pour les calibres de 0,5 mm (augmentation) et 2 mm (réduction) alors qu'elle est de l'ordre de +/- 40% pour les calibres de 0,3 mm et 5 mm. Le tableau 9.3

présente les résultats obtenus pour les événements de 72 heures de période de récurrence 15 ans propres à chaque site considérés. Les sites pour lequel l'étude de sensibilité a été réalisée sont représentatifs du pourtour du lac. L'exercice a également été effectué sur l'indice d'érosion et conduit à des résultats tout à fait comparables.

Les variations obtenues sont relativement restreintes et bien centrées sur le calibre de référence dans l'intervalle 0,5 mm – 2,0 mm, qui représente la grande majorité des matériaux des rechargements sableux sur l'ensemble des sites. Certains secteurs seraient plus enclins à présenter des matériaux plus fins, plus proches du calibre naturel du sable du lac. Ces secteurs sont généralement situés aux embouchures de rivières, ce qui demeure très localisé. Cette étude de sensibilité permet dans une certaine mesure d'estimer l'ordre de grandeur de l'incertitude engendrée par le paramètre de la granulométrie, et éventuellement mettre en perspective certains résultats.

Précisons à nouveau que l'ensemble des résultats de simulation présentés à partir de la section 9.8 ont été obtenus avec un diamètre moyen de 1,3 mm.

Tableau 9.2: Sensibilité de la granulométrie sur le transport longitudinal à long terme

Variation du volume érodé par transport longitudinal par rapport à la référence (événement de tempête à niveau 16,5 pieds)					
	0,3 mm	0,5 mm	1,3 mm	2,0 mm	5,0 mm
Saint-Gédéon Sud	11%	3%	-	-9%	-17%
Métabetchouan- Lac-à-la-Croix	92%	38%	-	-10%	-48%
Chambord (Domaine du Marais)	109%	0%	-	-23%	-58%
Chambord (Pointe)	100%	27%	-	-18%	-64%
Mashteuiatsh	78%	33%	-	-22%	-44%
Saint Félicien	40%	16%	-	-16%	-44%
Dolbeau-Mistassini	82%	30%	-	-16%	-66%
Saint-Henri-de-Taillon Nord 1 (BI 15)	87%	9%	-	-9%	-48%
Saint-Henri-de-Taillon Nord 2 (BI 25)	95%	0%	-	-20%	-60%
Moyenne	77%	15%	-	-16%	-50%

Tableau 9.3: Sensibilité de la granulométrie sur le transport transversal

Variation du volume érodé par transport transversal par rapport à la référence (événement de tempête à niveau 16,5 pieds)					
	0,3 mm	0,5 mm	1,3 mm	2,0 mm	5,0 mm
Saint-Gédéon Sud (BI 18)	29%	17%	-	-11%	-34%
Saint-Gédéon Sud (BI 29)	-	-	-	-	-
Métabetchouan- Lac-à-la-Croix	25%	10%	-	-8%	-27%
Chambord (Domaine du Marais)	-	-	-	-	-
Chambord (Pointe)	29%	18%	-	-12%	-48%
Mashteuiatsh	-	-	-	-	-
Saint Félicien	-	-	-	-	-
Dolbeau-Mistassini	34%	20%	-	-12%	-49%
Saint-Henri-de-Taillon Nord 1 (BI 15)	-		-		
Saint-Henri-de-Taillon Nord 2 (BI 25)	58%	14%	-	-16%	-47%
Moyenne	35%	16%	-	-12%	-41%

9.3.5 Niveau d'eau

Le niveau moyen journalier a été fourni par Rio Tinto Alcan sous forme de séries chronologiques. Tel qu'indiqué à la section 8.4, en plus de la série chronologique historique de 1992 à 2014, différents scénarios de gestion ont été considérés dans l'étude. Les scénarios de gestion des niveaux d'eau établis par Rio Tinto Alcan, notamment en fonction des contraintes de niveaux maximal et minimal, sont résumés au tableau 8.2 et présentés graphiquement aux figures 8.10 à 8.16.

9.3.6 Vagues

Tel que résumé au chapitre 8, les données de vagues (hauteur, période et direction) ont été extraites des résultats de simulation du modèle de génération des vagues (MIKE 21 SW) basées sur les vents historiques mesurés à la station de Mistook. Pour chacun des secteurs, ces données de vagues ont été extraites parallèlement à la ligne de côte en plusieurs points afin de tenir compte des variations des différents paramètres le long du tronçon étudié.

Le climat de vagues a ensuite été utilisé sous forme de séries chronologiques horaires des vagues générées par les vents pendant les périodes d'eau libre de 1992 à 2014, puis de 2015 à 2037.

Tel que mentionné à la section 8.5, il avait initialement été prévu de ne s'en tenir qu'aux événements de tempêtes, a priori les plus susceptibles d'avoir un impact sur les berges du lac. Toutefois l'exercice de

sélection des tempêtes s’est révélé ardu et finalement très subjectif. En effet, une tempête est caractérisée non seulement par la vitesse et la direction du vent mais aussi par sa durée. Il en découle que les vagues induites par de courts coups de vent (fortes vitesses pendant seulement quelques heures) et par des vents plus modérés mais prolongés, peuvent contribuer à une proportion significative du transport longitudinal sur le long terme.

Afin de vérifier cette hypothèse, des simulations préliminaires ont été réalisées pour une période d’eau libre s’étendant d’avril à septembre (année 1993) sur le secteur de Saint-Gédéon Sud.

Deux séries chronologiques de vagues ont été générées, l’une à partir de la série chronologique complète des vents à la station de référence et l’autre à partir d’une série triée dans laquelle tous les événements de vent de vitesse inférieure à 15 km/h ont été supprimés et seuls les événements de plus de 15 km/h de plus de 6 heures présentant au moins une valeur supérieure ou égale à 30 km/h ont été conservés. Ensuite, ces séries de vagues ont été appliquées à un profil de plage et une ligne de côte typiques du secteur sud-est du lac, dans le module de transport longitudinal (évolution du trait de côte).

Les résultats présentés à la figure 9.8 montrent que le transport est significativement sous-estimé avec la série partielle de tempêtes (courbe bleue). En effet, le pic de transport sédimentaire aux abords de la plage est sous-estimé d’environ 40% en ne simulant que des épisodes précis de tempêtes. Les résultats de simulation montrent également que la série partielle de tempêtes sous-estime le recul du trait de côte.

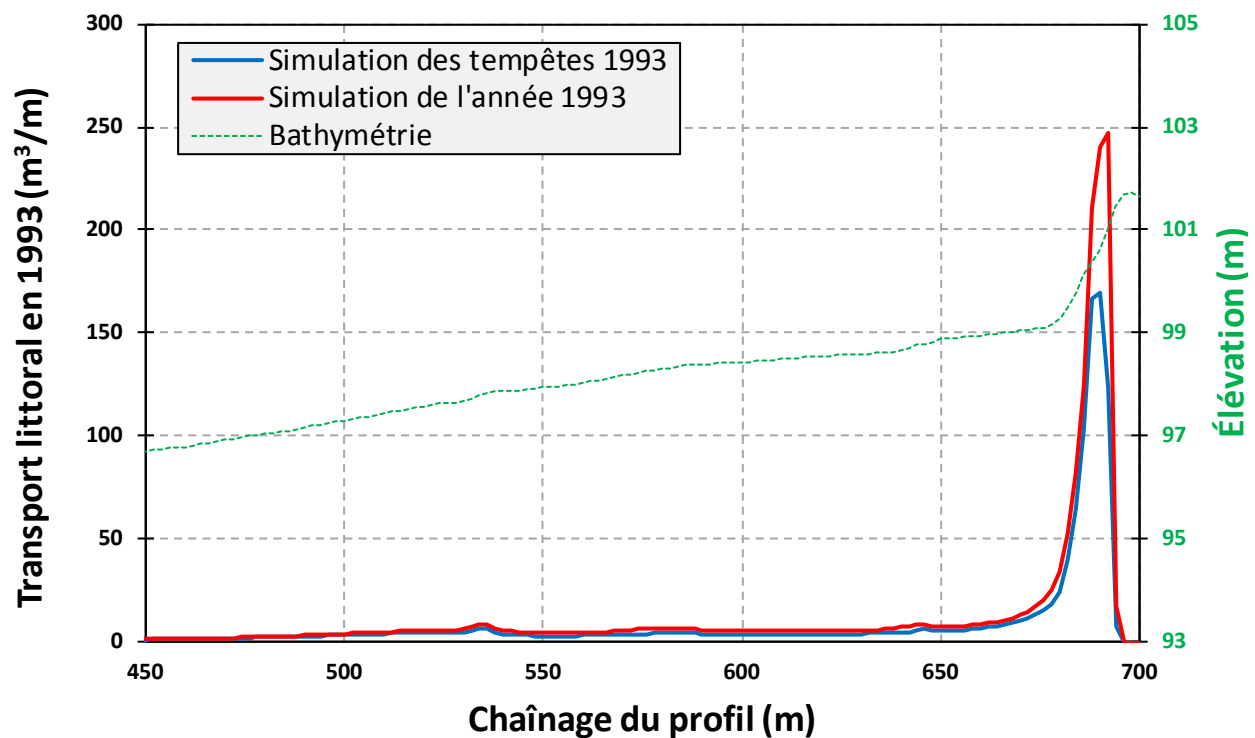


Figure 9.8: Transport littoral obtenu en fonction de la série de vagues considérée

L'exercice de tri des tempêtes a ensuite été repris pour les 23 années de simulation. La figure 9.9 montre que selon les résultats à long terme, la fréquence d'occurrence élevée de vagues plus modestes contribue à une grande partie du transport des sédiments. À Saint-Gédéon Sud, exposé aux vagues les plus fréquentes, les résultats montrent typiquement que 50% du transport est généré par des vagues de hauteur inférieure à 70 cm (soit un peu plus de 90% du temps) et que 25% du transport est induit par des vagues inférieures à 45 cm (soit un peu plus de 80% du temps). Les vagues de 1,5 m et plus contribuent à moins de 10% du transport littoral. L'ensemble de ces résultats montrent donc que pour une évaluation à long terme du transport longitudinal sur l'érosion, il est important de considérer l'ensemble des vagues (et donc des vents) afin de tenir compte de la fréquence d'occurrence qui joue un rôle notable dans l'érosion.

Sur la base de cette analyse, et considérant que l'ensemble des sites suit cette tendance générale, les séries complètes de vagues ont été conservées dans les simulations de l'érosion des berges dans chaque secteur.

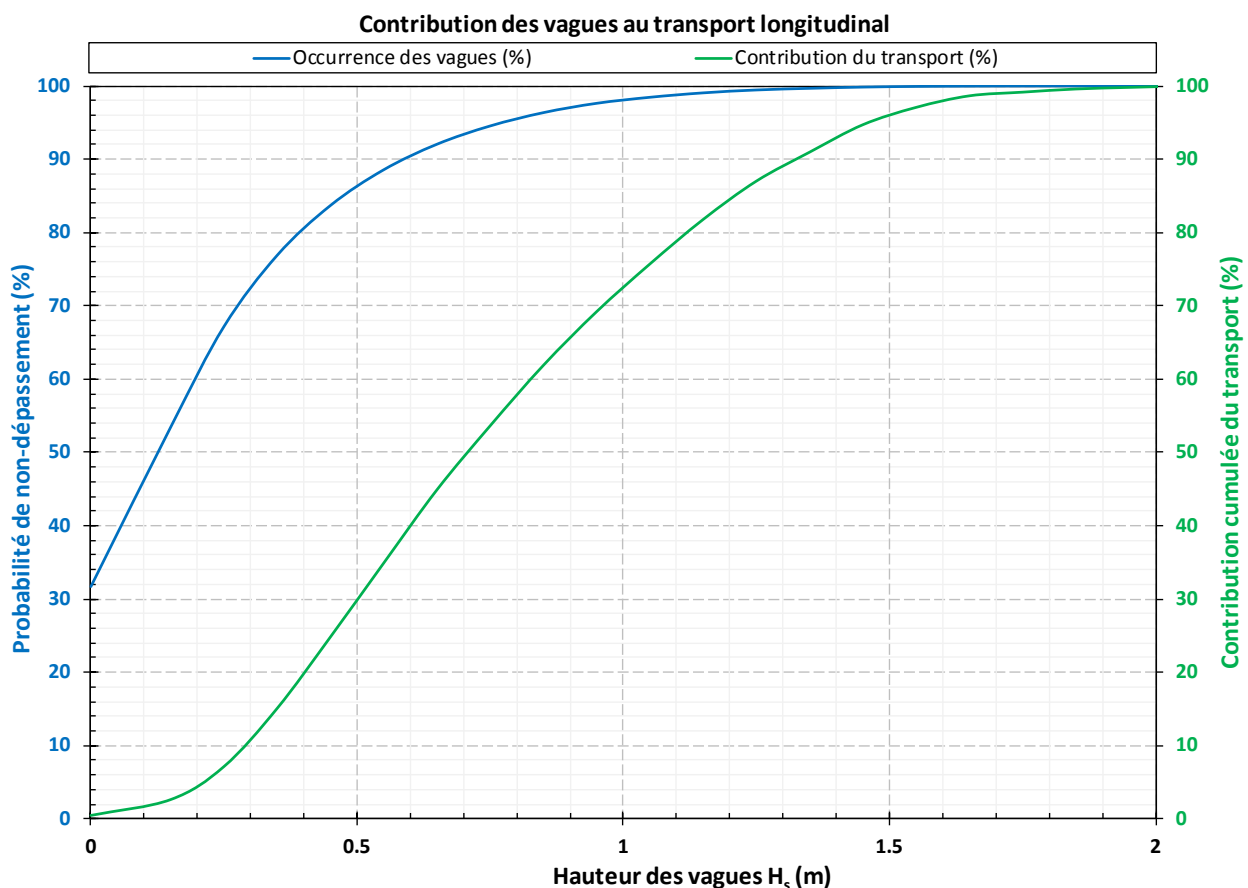


Figure 9.9: Contribution des vagues au transport longitudinal

9.4 Paramètres de modélisation

La présente section introduit et décrit brièvement les différents paramètres de modélisation des modèles de transport longitudinal et transversal qui ont été utilisés pour évaluer les différents modes d'érosion.

9.4.1 Module d'évolution du trait de côte (transport longitudinal ou littoral)

Pas de temps

Le pas de temps dans le module d'évolution du trait de côte a été fixé à 1 heure. Ainsi, la ligne de côte est actualisée à chaque heure simulée.

Discrétisation du profil et de la ligne de côte

Les profils utilisés dans le module d'évolution du trait de côte ont été discrétisés avec des intervalles de 2 m. Cette discrétisation permet d'obtenir des temps de calcul raisonnables tout en définissant suffisamment de points pour calculer le transport sédimentaire.

Les lignes de côte ont été discrétisées avec des intervalles de 10 m conduisant à une bonne résolution de la ligne de côte ainsi qu'à des temps de calcul raisonnables. À titre d'exemple, un tronçon de plage entre deux épis séparés de 250 m fait l'objet de 25 points de calcul, ce qui est suffisant pour évaluer les mouvements de la ligne de côte. Des essais de sensibilité avec un intervalle plus petit n'ont pas montré d'écarts significatifs.

Profondeur de la plage active

La profondeur de la plage active est le paramètre qui permet de relier le volume net de sédiments érodés avec le recul de la ligne de côte. La profondeur active est la somme de la profondeur de fermeture et de la hauteur de plage (réf. [15]).

La signification physique de la profondeur active est illustrée à la figure 9.10. Sur cette figure, le volume actif (VA) représente le volume de sédiments érodés pour faire reculer la ligne de côte d'une certaine distance (d_y). Ainsi, lorsque la profondeur active augmente, le volume actif (VA) fait de même, ce qui exige une plus grande quantité de sédiments érodés pour faire reculer la plage de la même distance d_y . Une augmentation de la profondeur active induit donc un ralentissement du recul de la ligne de côte.

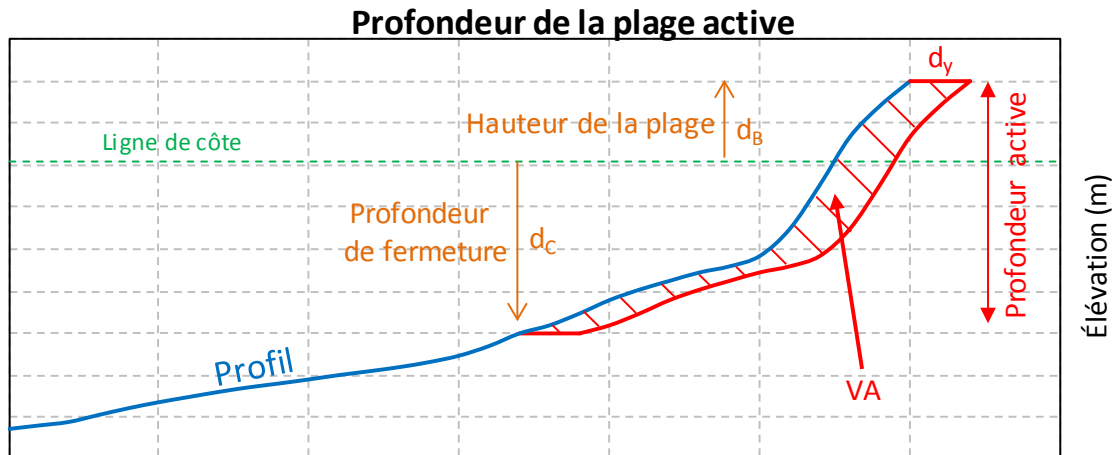


Figure 9.10: Signification physique de la profondeur active

Le principe de la profondeur active est également valide pour l'accrétion : une augmentation de la profondeur active engendrera une augmentation du volume actif (VA) qui, par la suite, accroîtra le volume de sédiments nécessaire pour faire avancer la ligne de côte d'une distance d_y . Un accroissement de la profondeur active engendre donc un ralentissement de l'accrétion de la ligne de côte.

La profondeur de fermeture peut être calculée *a priori* à l'aide des formules classiques d'Hallermeier (réf. [16]). Toutefois l'analyse de la distribution du transport littoral selon différents événements de tempête permet une approche plus spécifique au site à l'étude. Ce paramètre a été ajusté par la suite pour fin de calibrage.

Étendue transversale du transport longitudinal

Afin de calculer le bilan sédimentaire, le module d'évolution du trait de côte (transport longitudinal) procède à une intégration spatiale de la distribution du transport littoral dans l'ensemble du profil. Ce bilan sédimentaire est par la suite utilisé pour actualiser la nouvelle ligne de côte.

Lorsque le transport longitudinal débute à une distance éloignée de la ligne de côte, une partie de ce transport ne participe pas à l'évolution de la ligne de côte. Une certaine correction peut alors être apportée au module d'évolution du trait de côte afin de schématiser cette réalité et de calculer les volumes plus directement liés à l'évolution de la position de la ligne de côte. Le paramètre d'étendue transversale du transport longitudinal permet de poser une distance limite au-delà de laquelle le transport sédimentaire n'a plus aucun impact sur la ligne de côte. Le transport littoral qui se produit entre la ligne de côte et cette distance-limite contribue à la modification de la ligne de côte alors que le reste du transport n'est pas pris en compte.

L'étendue transversale du transport longitudinal a été déterminée par l'analyse de la distribution du transport littoral induit par différents événements à niveau d'eau élevé. Dans l'exemple de la figure 9.11, l'étendue transversale du transport longitudinale a été fixée à 175 mètres pour le secteur de Dolbeau-Mistassini.

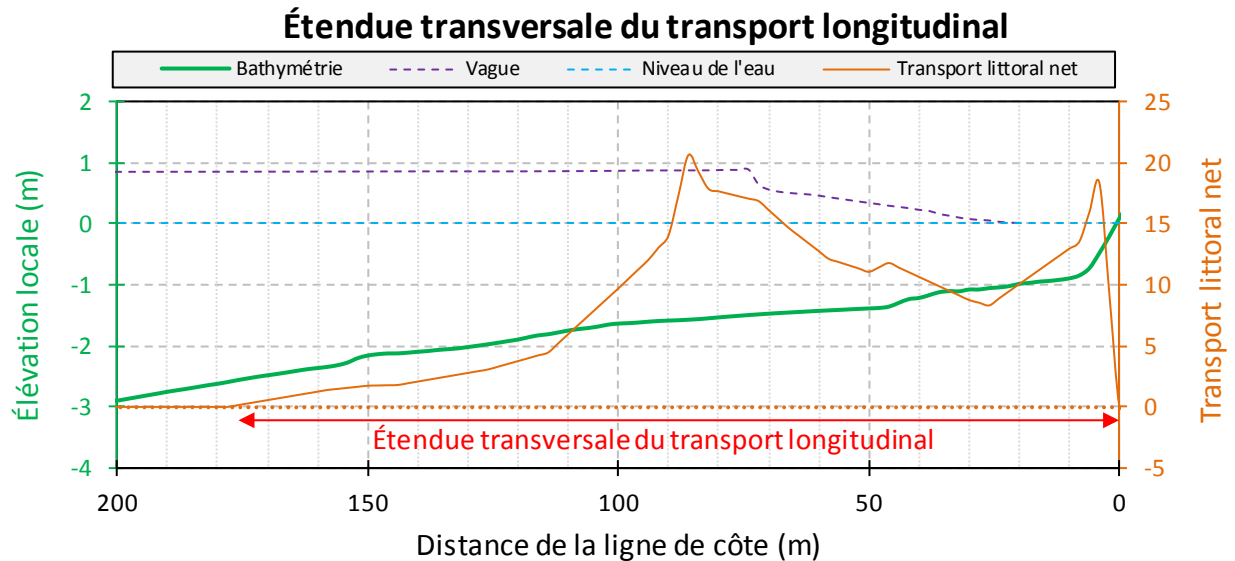


Figure 9.11: Étendue transversale du transport longitudinal

Conditions aux limites

Les conditions aux limites imposées aux extrémités latérales du modèle de transport longitudinal se traduisent par une condition de gradient de transport littoral nul. Par conséquent, l'angle de la ligne de côte à ces limites reste constant tout au long de la simulation. Cette condition aux limites imposée par le modèle contraint alors de prolonger la zone modélisée au-delà de la zone d'étude afin de s'affranchir d'éventuels effets non réalistes aux frontières latérales du modèle.

Les conditions à la limite au large du modèle sont définies par les séries chronologiques horaires de vagues à chaque intervalle de discrétisation de la ligne de côte. Tel qu'indiqué à la section 9.1, les séries de vagues ont été extraites des résultats de simulation du modèle bidimensionnel global de génération des vagues.

Ouvrages de contrôle

Dans les cas où des ouvrages de contrôle sont présents (épi, brise-lames), la position et les dimensions ont été extraites à partir des orthophotos et des données rendues disponibles par Rio Tinto Alcan.

Dans la schématisation du module d'évolution du trait de côte, les épis sont définis par la coordonnée du nez de l'ouvrage et orientés perpendiculairement à la ligne de base (orientation moyenne de la ligne de côte). D'un côté, les épis bloquent une fraction du transport littoral, alors que de l'autre côté, ils créent une zone d'ombre, basée sur l'angle d'incidence des vagues, dans laquelle l'énergie des vagues est réduite. Le modèle numérique permet également d'introduire des brise-lames dans le domaine d'étude. Le phénomène de diffraction est considéré en arrière des brise-lames, ce qui conduit à la propagation de vagues dans la zone d'ombre. Ces vagues transformées par les principes de diffraction et d'énergie réduite affectent le transport entre le brise-lames et la côte. Les perrés peuvent aussi être inclus dans le modèle numérique. Ces ouvrages empêchent la ligne de côte de reculer au-delà d'une certaine limite. Cependant, les phénomènes d'érosion et de transport sédimentaire sont toujours calculés au pied du perré.

Les ouvrages de contrôle schématisés dans le modèle numérique permettent d’influencer l’évolution du trait de côte en raison de la modification du transport littoral. En revanche, lorsqu’une proportion importante des vagues présente une faible obliquité, l’effet de ces structures dans le modèle peut conduire à une représentation erronée de l’érosion ou de l’accrétion au droit-même des ouvrages.

9.4.2 Module de transport transversal

Pas de temps

Le pas de temps dans le module de transport transversal a été fixé à 30 minutes. Ainsi, le profil est actualisé au terme de chaque intervalle de 30 minutes simulées. Des essais de sensibilité ont montré qu’il n’y a pas de variation significative des résultats avec un intervalle plus court.

Discrétisation du profil et de la ligne de côte

Les profils utilisés dans le module de transport transversal ont été discrétisés avec des intervalles de 0,5 m. Le calcul de l’évolution morphologique des profils de plage requiert une résolution accrue permettant de prendre en compte des variations sur quelques mètres. Ainsi, la discrétisation spatiale est plus fine que celle utilisée avec le module de transport longitudinal.

Conditions aux limites

Un gradient de transport transversal nul est imposé à la limite au large du profil. Ainsi, l’angle du profil à cette condition-limite reste le même tout au long de la simulation. Le profil est donc défini de manière à ce que le transport transversal au large soit négligeable.

9.5 Calibrage du module d’évolution du trait de côte (transport longitudinal)

9.5.1 Approche générale

Le module d’évolution du trait de côte a été principalement calibré sur la base des lignes de côte mesurées entre 1996 et 2014 dans chacun des secteurs d’étude. Ces lignes de côte, à l’élévation 16,5 pi (101,54 m), sont arpentées au début du mois de novembre de chaque année pour l’ensemble des secteurs à l’étude. L’examen des données montre que certains points font l’objet de variations importantes de la position du trait de côte d’une année à l’autre. Ces variations peuvent être attribuables à des tempêtes, des rechargements granulaires et des incertitudes en lien avec l’arpentage (mesures ou post-traitement). Pour cette raison, il a été décidé d’analyser l’évolution du trait de côte sur une longue période (18 ans) et de calibrer le modèle numérique à l’aide des tendances observées sur cette période de 18 ans, plutôt que sur les positions initiales et finales des lignes de côte.

Afin de compléter le calibrage dans certains secteurs, les volumes érodés qui ont été simulés par le module d’évolution du trait de côte ont été comparés avec ceux calculés par la firme WSP à partir des profils transversaux et de la position de la ligne de côte (réf. [17]). D’une manière générale, cette démarche permet de valider l’ordre de grandeur des résultats obtenus par le modèle numérique. Soulignons toutefois que la fréquence élevée des rechargements dans certains secteurs limite dans ces cas la comparaison à de trop courtes périodes pour être concluante. De plus, les calculs, étant basés sur la différence entre une position initiale et une position finale de la ligne de côte, ne permettent pas le

développement d'une tendance au cours du temps. Compte tenu des variations qui peuvent être importantes d'une année à l'autre, les volumes obtenus peuvent présenter des écarts significatifs avec les résultats du modèle qui ne sont pas nécessairement représentatifs de la tendance du site.

Un élément important dans la validation du modèle numérique a été de comparer les résultats simulés avec les faits observés au cours des 18 dernières années. Par exemple, les photos aériennes rendues disponibles par Rio Tinto Alcan et sur Google Earth permettent d'identifier qualitativement les secteurs en érosion ou en accrétion. De plus, la présence de nombreux rechargements à certains endroits confirme la problématique d'érosion locale qui est simulée par le modèle numérique.

La section suivante compare les tendances observées entre 1996 et 2014 avec les tendances simulées par le module d'évolution du trait de côte. Les résultats de calibrage sont présentés pour les sites de Dolbeau-Mistassini et Métabetchouan-Lac-à-la-Croix. Les autres sites sont présentés à l'annexe B du présent rapport. Les comparaisons ont été effectuées vis-à-vis de plusieurs bornes inamovibles sur l'ensemble des secteurs à l'étude. Rappelons que le modèle ne peut tenir compte des rechargements et ainsi les progressions brusques de la ligne de côte mesurées d'une année à l'autre ne sont pas reproduites dans les résultats de modélisation.

9.5.2 Exemples de résultats de calibrage

Dolbeau-Mistassini

Les figures 9.12 et 9.13 illustrent les résultats de calibrage pour le secteur de Dolbeau-Mistassini. Les bornes sont numérotées en ordre croissant de l'est vers l'ouest. Les tendances simulées par le module d'évolution du trait de côte suivent de manière satisfaisante les tendances extraites des mesures d'arpentage pour le site de Dolbeau-Mistassini, à l'exception du secteur de la borne 92 qui est situé à l'embouchure d'un ruisseau. Ce ruisseau est responsable de la présence d'un petit delta dans la bathymétrie qui ne peut être schématisé correctement dans le modèle numérique unidimensionnel.

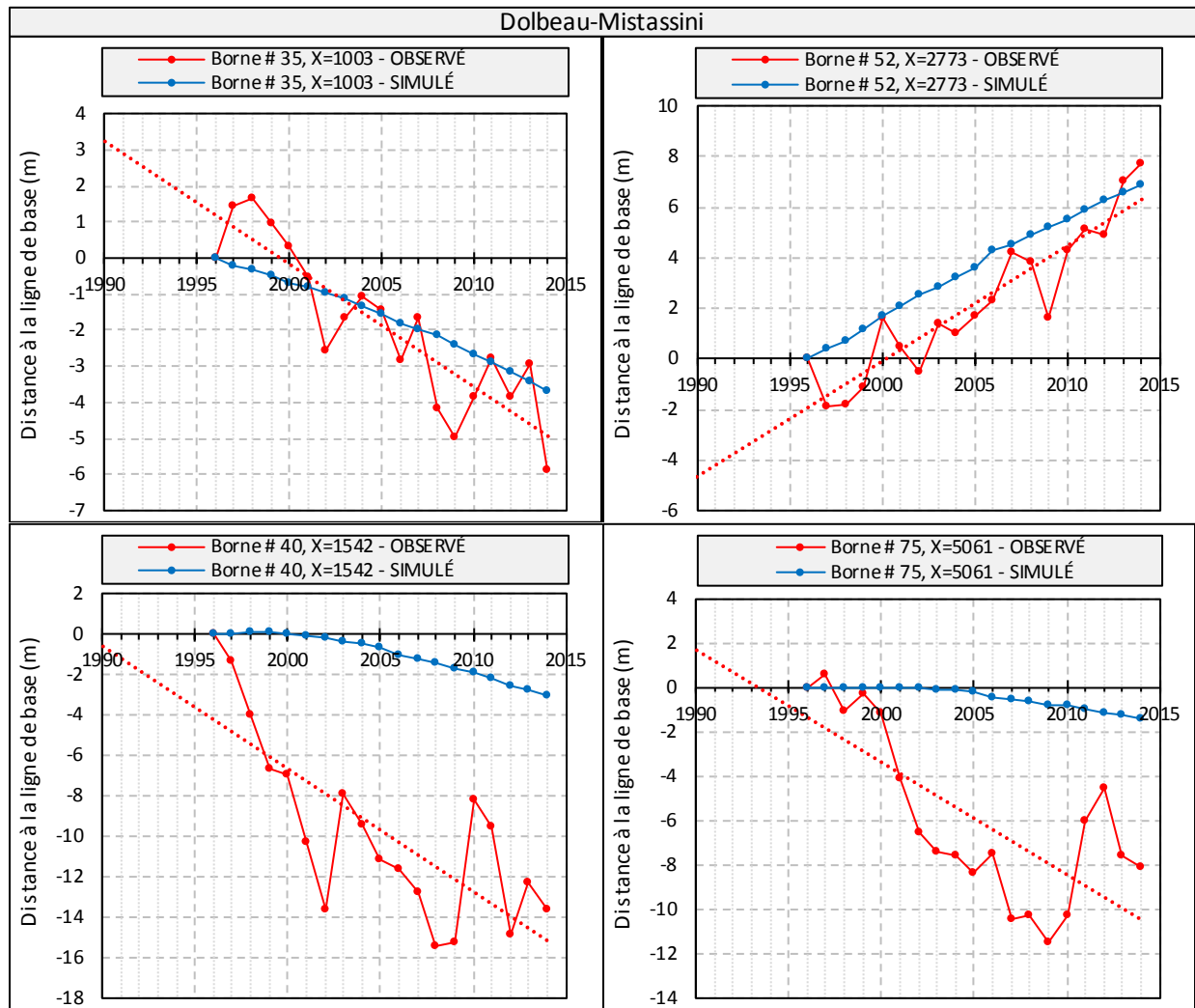


Figure 9.12: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Dolbeau-Mistassini

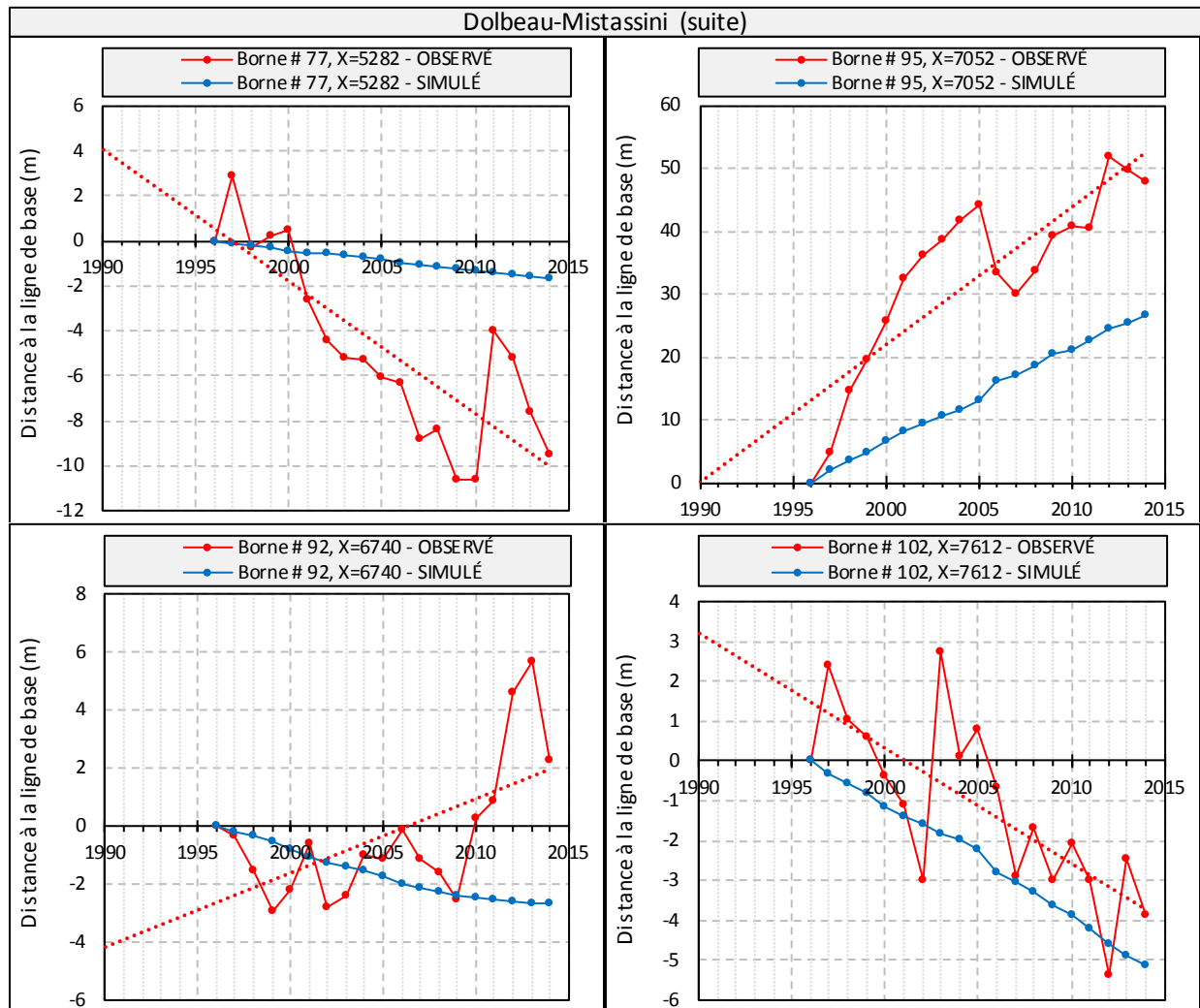


Figure 9.13: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Dolbeau-Mistassini (suite)

Métabetchouan-Lac-à-la-Croix

Les figures 9.14 et 9.15 illustrent les résultats de calibrage pour le secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix. Le premier graphique, « Borne 1 », est situé à l’est du site alors que le dernier graphique, « Borne 48 », est situé à l’ouest. Les résultats du module d’évolution du trait de côte indiquent des variations rapides en début de simulation dans les secteurs des bornes 8, 40 et 48 qui semblent peu représentatives. Cette aberration est principalement causée par la direction quasi-parallèle des vagues par rapport aux épis. Dans de telles circonstances, le modèle, qui ne peut reproduire les courants bidimensionnels générés par le déferlement des vagues, ni, *a fortiori*, l’interaction avec les structures, répond moins bien pour représenter le transport à proximité des épis. Pour remédier aux instabilités qui en découlent, les simulations ont été par la suite ajustées pour inclure une période de stabilisation numérique du modèle avant de débiter les analyses en transport sédimentaire.

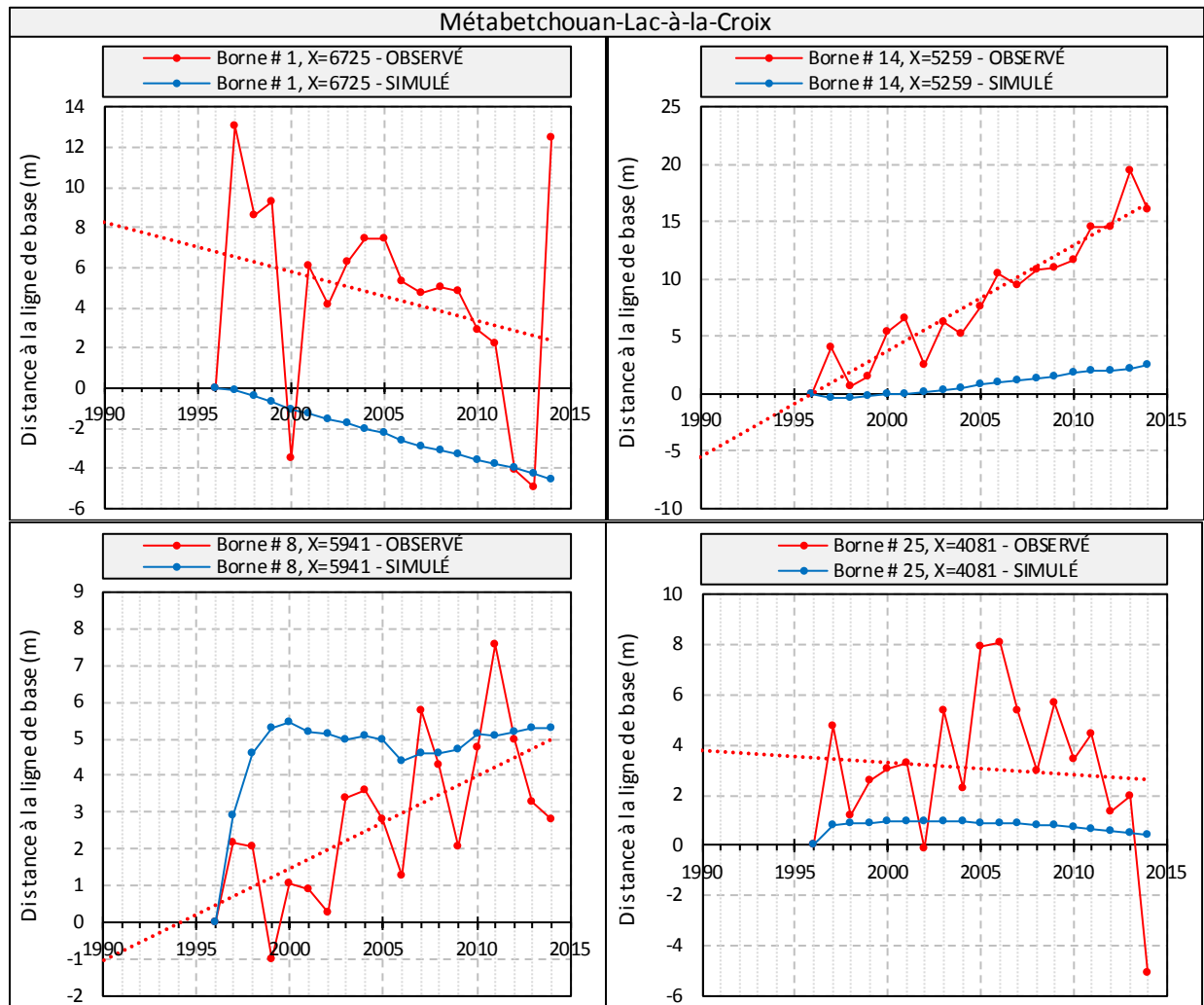


Figure 9.14: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Métabetchouan-Lac-à-la-Croix

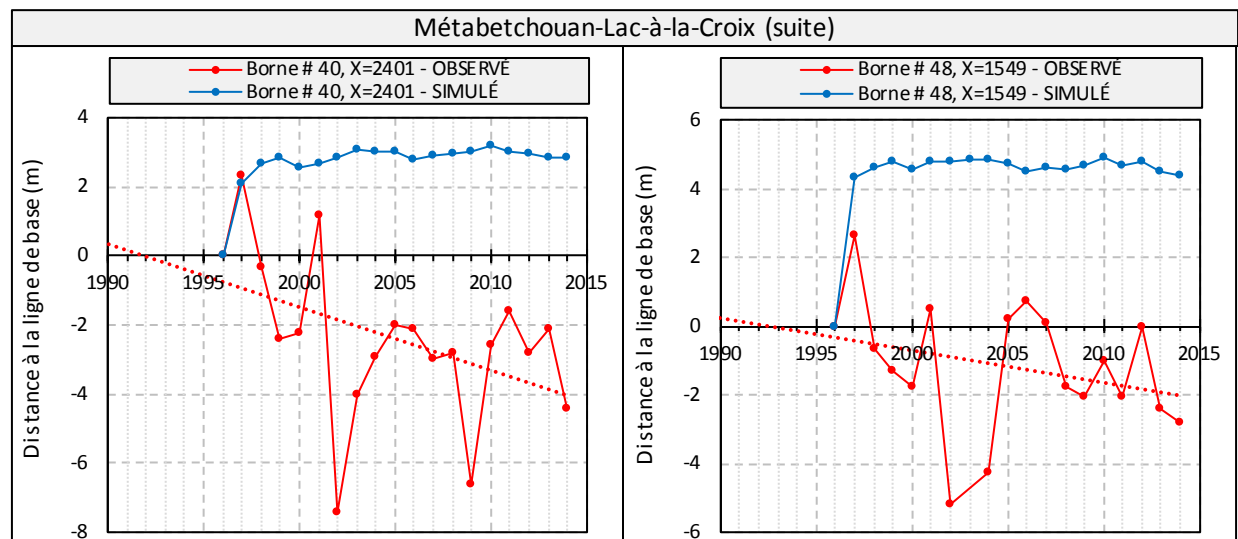


Figure 9.15: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Métabetchouan-Lac-à-la-Croix (suite)

Le site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix est un site complexe comprenant un grand nombre d'épis et présentant une orientation générale telle que les vagues dominantes ont une incidence quasi perpendiculaire à la ligne de côte dans certaines zones. Dans les zones particulièrement soumises à ce type de vagues, le transport longitudinal est faible et les effets d'érosion sont alors sous-estimés car la formulation du modèle d'évolution du trait de côte ne tient pas compte du transport transversal. C'est notamment le cas pour les secteurs des bornes 40 et 48. Il est à noter que les secteurs modélisés sont décrits plus en détails à partir de la section 9.8.

9.6 Calibrage du module de transport transversal

Le module de transport transversal visant à évaluer l'impact des tempêtes sur les profils de plage a été calibré sur la base de l'arpentage des lignes de côte de novembre 2013 et de mai 2014. Ces mesures permettent d'évaluer l'évolution de la position de la ligne de côte durant un peu plus d'un mois en eau libre. Il convient de souligner que le mois de novembre 2013 a été particulièrement riche en tempêtes, notamment en provenance des secteurs ESE (entre les 16 et 19 novembre) et OSO (entre les 23 et 26 novembre). On considère ainsi que l'évolution de la position de la ligne de côte entre novembre 2013 et mai 2014 est principalement le résultat de l'érosion frontale sur une courte durée induite par les vagues de tempêtes. Lors de ces dernières, l'action des vagues contribue en premier lieu à rapidement éroder la face et le haut de plage par un mécanisme de transport vers le large (transversal). Les sédiments transportés vers le pied de la plage peuvent ensuite être repris par les courants littoraux.

Dans certains cas, il est plus difficile d'établir clairement le recul typique associé au transport transversal car les données d'arpentage utilisées ici sont caractérisées par une variabilité importante, notamment dans les zones présentant des ouvrages (Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, Saint-Félicien) ou situées à proximité de pointes rocheuses (Saint-Henri-de-Taillon Nord). Dans ces zones, le transport de sédiments est affecté par les courants littoraux générés localement suite au déferlement des vagues qui contribuent à remanier les patrons d'érosion et d'accrétion, masquant les effets de la composante transversale du transport sédimentaire. Les figures 9.16 et 9.17 illustrent les cas de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix et Dolbeau-Mistassini.

Dans les zones plus uniformes, l'évolution de la position de la ligne de côte présente une variabilité plus limitée permettant d'extraire une valeur caractéristique du recul. C'est principalement à partir de ces données que le modèle a été réglé. Le tableau 9.4 présente les valeurs obtenues.

Soulignons que certains secteurs ayant fait l'objet de rechargements durant l'hiver 2014 n'ont pu être analysés à l'aide de cette méthode. C'est notamment le cas de Chambord (Pointe) et de Chambord (Domaine du Marais). Dans ces cas, le modèle a été réglé par analogie à des sites ayant des profils similaires. Le secteur de Chambord (Pointe) a été abordé de manière analogue au site de Saint-Henri-de-Taillon Nord alors que le secteur du Chambord (Domaine du Marais) a été traité par analogie au site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix.

Finalement, il est important de noter que l'absence de données bathymétriques et volumétriques caractérisant les sites avant et après des épisodes de tempête limite de façon importante l'exercice de calibrage de ce type de modèle.

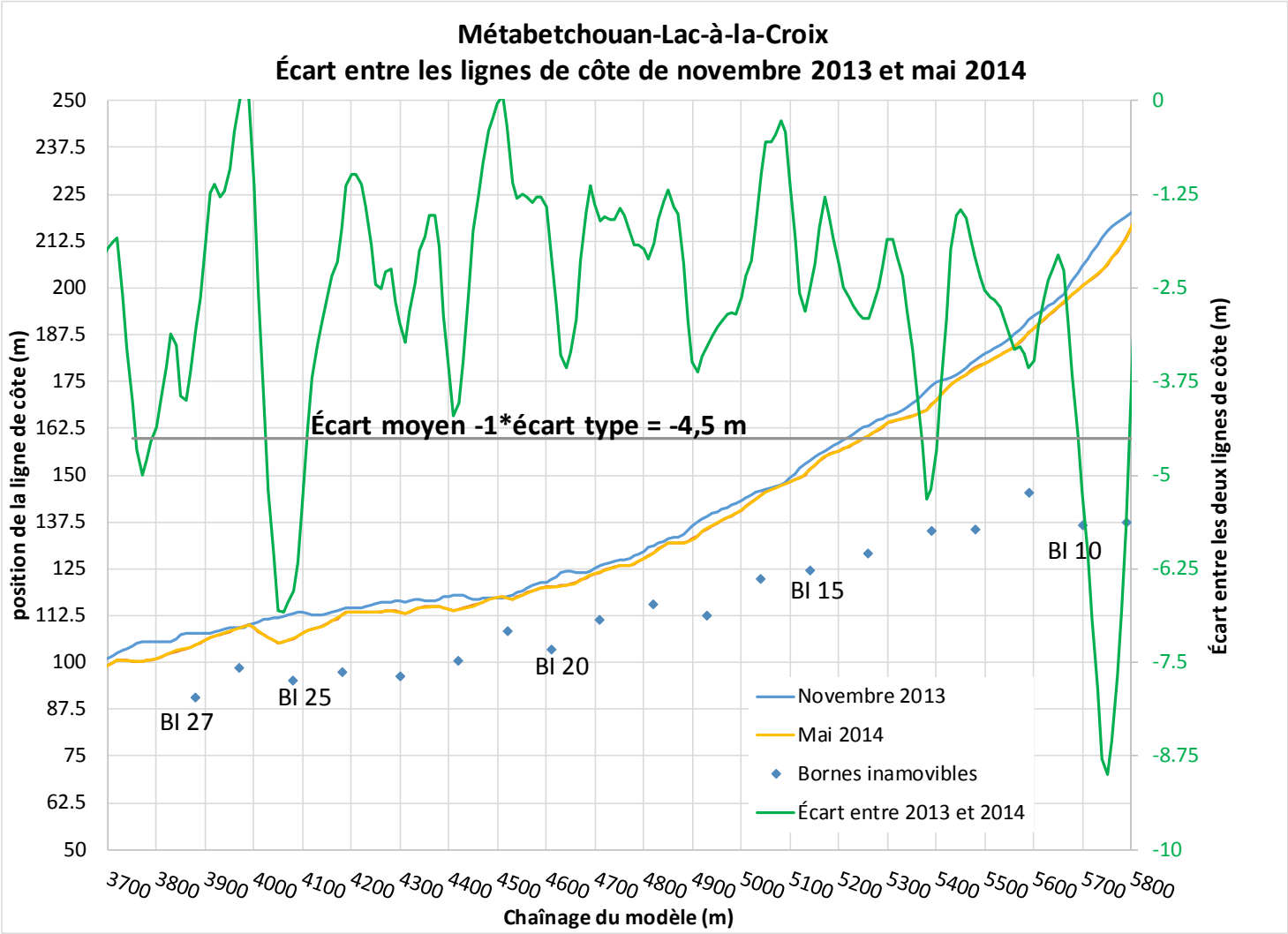


Figure 9.16: Évolution de la ligne de côte mesurée à Métabetchouan-Lac-à-la-Croix entre novembre 2013 et mai 2014

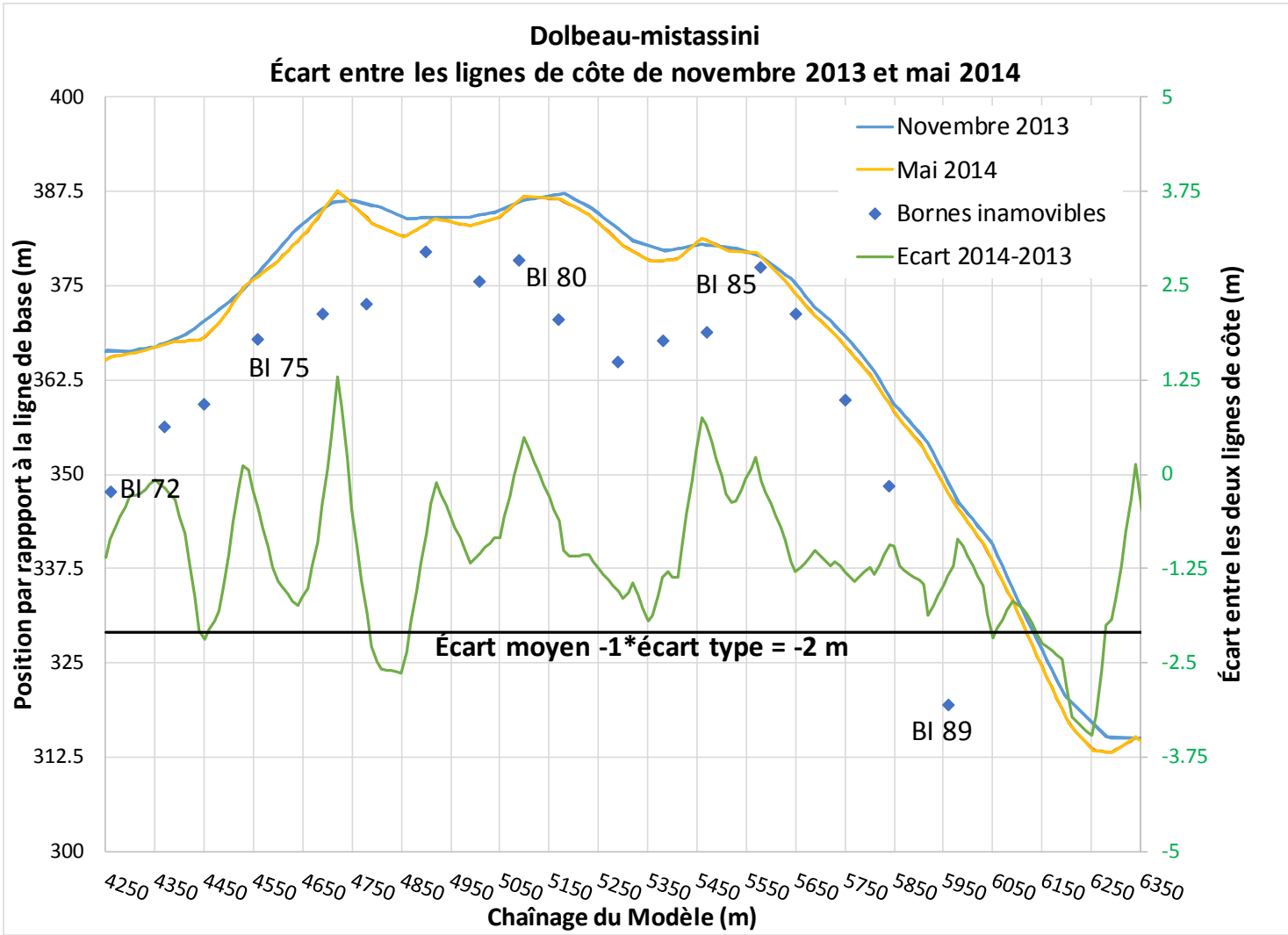


Figure 9.17: Évolution de la ligne de côte mesurée à Dolbeau-Mistassini entre novembre 2013 et mai 2014

Tableau 9.4: Calibrage du modèle de transport transversal

Secteur	Période de tempête (novembre 2013)	Recul caractéristique mesuré (m)	Recul calculé (m)	Volume calculé correspondant (m ³ /m)	Notes
Saint-Gédéon Sud	23 au 26	3,5	3,5	4,9	Zone de la borne 18
Métabetchouan-Lac-à-la-Croix	23 au 26	4,5	4,5	8,9	Entre les bornes 10 et 28
Chambord (Domaine du Marais)	23 au 26	N/A (rechargement)	2,5	6,9	Profil raide analogue à Métabetchouan
Chambord (Pointe)	16 au 19	N/A (rechargement)	2,5	5,2	Profil analogue à Saint-Henri Nord1
Saint-Félicien	16 au 19	2,5	2,5	2,1	Entre les bornes 31 et 45
Mashteuiatsh	23 au 26	2	2	2,8	Entre les bornes 3 et 13
Dolbeau-Mistassini	16 au 19	2	1,5	3,4	Entre les bornes 72 et 92
Saint-Henri-de-Taillon Nord 1	23 au 26	3	3	4,7	Entre les bornes 1 et 15
Saint-Henri-de-Taillon Nord 2	23 au 26	4	4,5	4,8	Entre les bornes 19 et 27

9.7 Présentation des résultats

Les résultats de modélisation de l'érosion des huit secteurs à l'étude sont présentés dans les sections suivantes. Pour chaque secteur, la présentation des résultats est organisée de la façon suivante :

1. Caractérisation du site : une vue rapprochée du site à l'étude est donnée, avec la position de certaines bornes inamovibles comme repères. La position du secteur examiné par rapport à l'ensemble du lac est plutôt donnée en début de chapitre, à la figure 9.5 de la section 9.2. Les ou la rose(s) de vagues caractérisant le site sont également illustrées;
2. Évolution à long terme du trait de côte - Transport longitudinal : les résultats en termes de transport longitudinal sur une période de 23 ans sont détaillés pour tous les sites. Les bilans sédimentaires en termes de transport brut (vers la droite et vers la gauche) et de transport net sont présentés en tout point de la ligne de côte. Les figures illustrant la ligne de côte ainsi que le transport net sont présentées dans les sections suivantes alors que les figures présentant le transport brut sont placées à l'annexe C. Pour les trois sites spécifiques désignés par Rio Tinto Alcan (Dolbeau-Mistassini, Métabetchouan-Lac-à-la-Croix et Saint-Henri-de-Taillon Nord), les tronçons les plus vulnérables à l'érosion pour lesquels des variantes d'aménagement ont été testées sont identifiés;

3. Analyse des variantes proposées : les résultats obtenus pour chacune des variantes d'aménagement sont présentés. Cette sous-section est uniquement présente pour les trois sites spécifiques identifiés au point 2;
4. Transport transversal : cette sous-section présente les résultats de modélisation obtenus en termes de transport transversal. Pour chacun des secteurs, la réponse des profils bathymétriques caractéristiques sous l'action des vagues lors d'événements de courte durée d'intensité variable et sous différents niveaux d'eau est présentée dans une matrice de volume érodé (aspect de stabilité de la plage face aux tempêtes). L'indice d'érosion décrit à la section 9.1.3 est également présenté. L'annexe E regroupe les tableaux des reculs correspondant aux volumes érodés.

9.8 Résultats pour le site de Saint-Gédéon Sud

9.8.1 Caractérisation du site

La figure 9.18 illustre le tronçon de plage modélisé à Saint-Gédéon Sud. Le domaine du modèle numérique s'étend de la borne inamovible 32 jusqu'à la borne 14 pour une distance totale de 2 km. Ce secteur contient 7 épis, le plus récent ayant été construit en 1995. L'embouchure de la Belle Rivière n'est pas présente dans ce domaine en raison de la complexité des courants locaux. À ce sujet, un rapport distinct (volume 2) est consacré entièrement à la modélisation bidimensionnelle et à l'analyse de ce secteur.

La figure 9.19 présente les roses des vagues pour le secteur de Saint-Gédéon Sud. La première rose des vagues a été extraite dans l'axe de la borne 19 alors que la seconde a été extraite vis-à-vis la borne 26. Dans les deux cas, l'extraction a été effectuée à une distance approximative de 800 m de la ligne de côte.

Le site de Saint-Gédéon Sud est exposé à des vagues dominantes concentrées dans un secteur angulaire relativement étroit. Ces vagues sont générées par les vents dominants en provenance du nord-ouest. Cette direction possède un fetch de 40 km de distance ce qui permet de générer les vagues les plus hautes que l'on peut rencontrer sur le lac. De plus, les eaux profondes au large de Saint-Gédéon Sud permettent aux vagues de minimiser leur perte d'énergie causée par le frottement du fond à l'approche de la ligne de côte.

Tel qu'illustré sur les roses des vagues, la direction dominante des vagues est peu diversifiée pour le secteur de Saint-Gédéon Sud et est principalement centrée sur l'ouest-nord-ouest, soit une incidence pratiquement perpendiculaire par rapport à la côte.



Figure 9.18 : Secteur Saint-Gédéon Sud

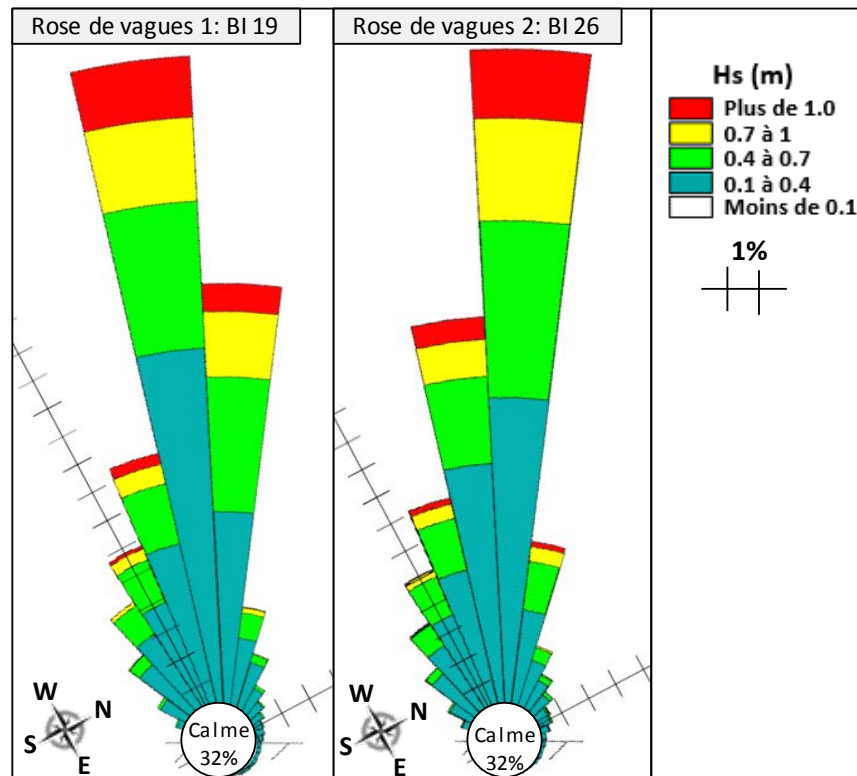


Figure 9.19: Roses des vagues pour Saint-Gédéon Sud

9.8.2 Évolution à long terme du trait de côte à long terme - Transport longitudinal

L'aspect général légèrement convexe de la ligne de côte du site de Saint-Gédéon Sud permet d'augmenter l'angle d'incidence des vagues de part et d'autre du point de divergence des courants littoraux situé entre les bornes 24 et 25 et donc d'accentuer le transport résultant.

Les figures 9.20 et C1 (à l'annexe C) illustrent les résultats de simulation de l'état de référence (état 2014) pour le secteur de Saint-Gédéon Sud. La simulation sans aucun ouvrage (état 1986) n'a pas pu être effectuée en raison de l'absence de données complètes sur le profil de la ligne de côte avant l'implantation des divers ouvrages de contrôle.

Sur ces graphiques, un transport littoral positif (axe des ordonnées de droite) indique un transport littoral vers la droite (est) alors qu'une valeur négative équivaut à un transport vers la gauche (ouest). De plus, une pente positive (ou gradient positif) de cette courbe de transport résulte en une érosion alors qu'une pente négative (ou gradient négatif) engendre une accrétion. Le transport littoral net négatif observé à gauche de la borne 25 indique donc un transport vers la gauche (sud-ouest) alors que le transport positif présent à droite de cette borne signifie un transport vers la droite (nord-est). L'inversion de la direction du transport se produit dans la zone de la borne 25.

En se basant sur les résultats du modèle numérique, les images satellites ainsi que sur l'historique des rechargements granulaires, trois zones en érosion ont été identifiées pour le site de Saint-Gédéon Sud. Ces sites sont illustrés sur la figure 9.20.

Les résultats de modélisation indiquent que la principale zone en érosion est située à l'ouest du premier épi du secteur de Saint-Gédéon Sud (situé entre les bornes 27 et 28). L'érosion s'étend de la borne 28 à la borne 31 et conduit à une problématique plus marquée entre les bornes 29 et 30. Les simulations des conditions de vagues et de niveaux d'eau de 1992 à 2014 donnent lieu à un volume érodé total de 35 000 m³ sur 2 km, dont près de 14 000 m³ attribuable à la zone sud-ouest entre les bornes 28 et 32. Cette zone, désignée par « zone de la borne 31 » sur la figure 9.20, est en effet caractérisée par de nombreux rechargements entre les années 1993 et 2015. Une partie des sédiments transportés vers l'embouchure de la Belle-Rivière se déposent dans la zone de la borne 33.

Le tronçon en érosion entre les bornes 28 et 32 présente un profil relativement raide, entre la plage et le chenal de la rivière Belle-Rivière, sensible à l'attaque frontale des vagues de tempête et à l'érosion transversale (voir section 9.8.3). Le sable érodé en haut de plage est transporté au pied de la plage, vers le chenal de la rivière, et est ensuite repris par les courants littoraux générés par les événements de vagues. Ainsi le caractère érosif est initié par le transport transversal et entretenu par le transport longitudinal. Cette dynamique limite significativement la reconstruction naturelle de la plage (impossibilité de maintenir une réserve de sable au pied de la plage) et à long terme, le volume de plage perdu correspond au gradient de transport longitudinal.

Pour atténuer la problématique d'érosion, une réduction de la pente de la plage par un rechargement en pente douce permettrait de réduire l'érosion frontale initiale. La mise en place d'un épi entre les bornes 32 et 31 permettrait aussi de couper le transport sédimentaire vers la gauche. Ceci induirait un déplacement de l'érosion vers une zone où la plage est plus large, soit en face de la borne 33. Dans un tel cas, la plage étroite située entre les bornes 29 et 30 serait alors protégée. Il faut toutefois garder à l'esprit qu'une éventuelle intervention de ce type pourrait modifier significativement la dynamique complexe du secteur, notamment au niveau de l'embouchure de la rivière. Une étude approfondie du secteur de l'embouchure de la rivière Belle-Rivière est présentée dans le volume 2 du rapport d'étude.

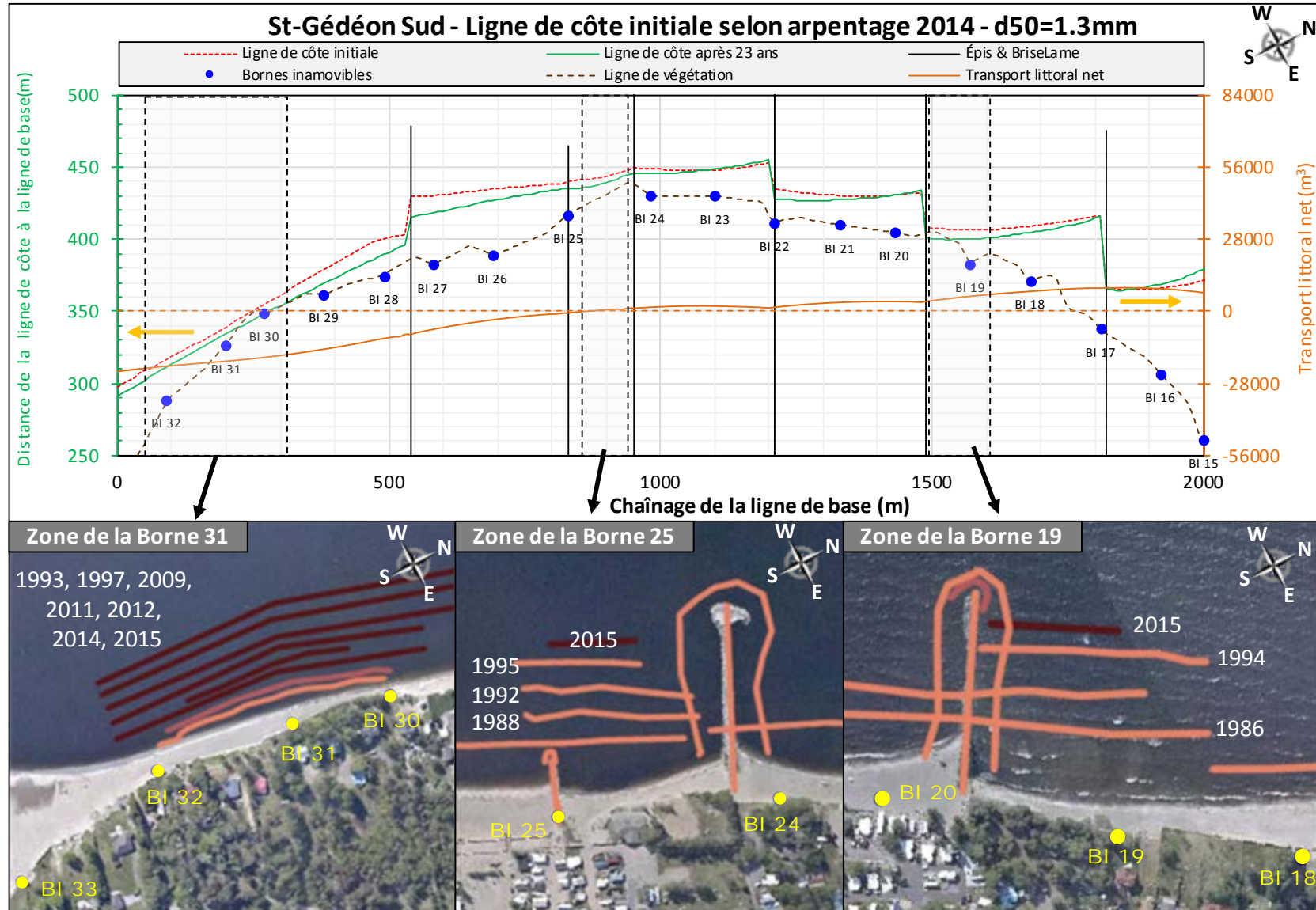


Figure 9.20: Résultats de simulation de l'évolution du trait de côte à long terme pour Saint-Gédéon Sud

La zone de la borne 25 est caractérisée par quelques rechargements granulaires entre les années 1988 et 2015 en raison d'une érosion entre les épis situés vis-à-vis des bornes 25 et 24. Le transport littoral net de cette zone est pratiquement nul et est le résultat d'un transport alternatif dont les volumes transitant dans chacune des directions ont tendance à se compenser. La figure C1 présentée à l'annexe C illustre le transport obtenu selon chacune des directions. La divergence du transport sédimentaire net serait donc responsable de l'érosion dans cette zone puisqu'il n'y a aucun apport naturel de sédiments. Dans un tel contexte, l'ajout ou la modification des épis existants n'apporterait aucun avantage concret et les rechargements restent l'approche à privilégier. Les résultats du modèle montrent que le recul à long terme est relativement modéré, ce qui est en accord avec l'intervalle de 20 ans entre les deux derniers rechargements.

La zone de la borne 19 a été identifiée comme étant en légère érosion au vu des résultats de simulation et en raison des rechargements observés entre les années 1986 et 2015. L'érosion est engendrée par le transport sédimentaire en direction nord-est (vers la droite) combiné à la présence d'un épi au sud-ouest de la borne 19 qui intercepte les apports, ce qui induit un déficit au droit de la borne 19. La construction ou la modification des structures existantes n'est pas recommandée pour cette zone en érosion puisque les rechargements granulaires sont peu fréquents.

Au nord-est de la borne 25, l'érosion longitudinale à long terme est relativement faible et les variations saisonnières dues au transport transversal (jeu d'érosion et de reconstruction) semblent se compenser à long terme. Cela est caractéristique d'un site pratiquement en équilibre dont les largeurs de plage offrent une marge suffisante pour absorber le recul induit par les tempêtes et laisser le temps à la reconstruction naturelle du profil.

9.8.3 Transport transversal

La figure 9.7, qui illustre les profils typiques des différents secteurs, montre que le secteur de Saint-Gédéon Sud peut être divisé en deux tronçons définis par deux profils-types différents. Les simulations ont alors été réalisées pour ces deux profils, l'un caractérisant le tronçon sud-ouest (zone de la borne 29, désignée par profil A) et l'autre le tronçon nord-est (zone de la borne 18, désignée par profil B). Les tableaux 9.5 et 9.6 présentent les valeurs obtenues pour chaque cas simulé.

D'une manière générale, les résultats de simulation des différents cas montrent que le tronçon du profil B répond aux sollicitations avec des taux d'érosion significativement plus faibles pour toute la gamme de niveaux d'eau.

Les résultats des tableaux 9.5 et 9.6 se traduisent par un indice d'érosion annuel de 0,73 pour le profil A et de 0,31 pour le profil B. Le profil B présente ainsi moins de la moitié de la valeur obtenue pour le profil A. L'écart entre les valeurs des indices d'érosion montre que la zone du profil A est plus exposée aux tempêtes.

Tableau 9.5: Zone du profil A de Saint-Gédéon Sud – Matrice de volume érodé vers le large

Période de récurrence*	Volume érodé vers le large (m ³ /m)					
	Niveau d'eau en pieds					
	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	8.6	4.9	3.6	2.8	4.0	2.6
10	8.1	5.7	3.6	2.4	3.9	2.6
5	5.9	4.0	3.6	1.8	4.1	2.2
2	7.0	4.7	3.6	1.7	3.4	2.5
1	6.7	4.9	3.4	1.6	2.8	2.4

*Récurrence en années des événements de vagues de tempête basée sur l'énergie cumulée pendant 72 heures

Tableau 9.6: Zone du profil B de Saint-Gédéon Sud - Matrice de volume érodé vers le large

Période de récurrence*	Volume érodé vers le large (m ³ /m)					
	Niveau d'eau en pieds					
	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	5.0	3.6	0.3	0.0	0.3	0.6
10	4.5	2.9	1.7	0.0	0.3	0.6
5	4.7	2.7	1.2	0.0	0.2	0.4
2	4.7	2.8	1.6	0.0	0.3	0.4
1	5.3	4.0	1.2	0.0	0.0	0.4

*Récurrence en années des événements de vagues de tempête basée sur l'énergie cumulée pendant 72 heures

Le tableau 10.4 au chapitre 10 présente une synthèse des indices d'érosion pour les conditions historiques de vagues et de niveaux d'eau. La valeur de l'indice d'érosion dans la zone du profil A (borne 29) du secteur de Saint-Gédéon Sud est comparable à celles obtenues pour Saint-Henri-de-Taillon Nord (0,67 et 0,88, voir détails section 9.15) et Métabetchouan-Lac-à-la-Croix (1,0, voir détails section 9.9), ce qui traduit un secteur relativement exposé à l'érosion transversale en période de tempête.

Rappelons que le site de Saint-Gédéon Sud a été l'un des plus touchés par la tempête du 23 au 26 novembre 2013, notamment dans la zone des bornes 29 et 30. Il est à noter que l'énergie des vagues entre le 23 et le 26 novembre 2013 correspond ici à l'événement de niveau d'énergie de période de récurrence de 15 ans avec un niveau d'eau de 16,5 pieds (ou 101,54 m). Un recul de 5 m a été calculé pour cet événement dans la zone de la borne 29¹². Les données de l'arpentage des plages, réalisé au début du mois de novembre 2013, indiquent une largeur de plage de 13 m à la borne 29 et 3 m à la borne 30, ce qui laisse

¹² L'annexe E présente les reculs associés aux cas simulés.

très peu de marge pour contenir l'érosion de la tempête. Ce secteur a été rechargé en 2014 et les largeurs observées au printemps 2014 étaient de 18 m à la borne 29 et 8 m à la borne 30, d'après l'arpentage réalisé en mai 2014.

Les résultats montrent également que si le niveau d'eau avait été 15,5 pieds pendant cette tempête, un recul de 4,5 m de la ligne de côte à 15,5 pieds aurait été obtenu, conduisant à un recul de 2,5 m du contour à 16,5 pieds. Un abaissement du niveau pendant la tempête aurait offert plus de marge, mais compte tenu de la largeur de plage disponible très limitée dans cette zone, il est probable que la largeur de plage s'avérerait insuffisante lors de la tempête suivante. Ainsi une intervention par rechargement est plutôt recommandée. Ce dernier devrait être conçu en termes de largeur et de pente de manière à pouvoir répondre à ce type de tempête.

En revanche, la zone du profil B (borne 18) est beaucoup moins vulnérable et a plutôt tendance à se comporter de manière analogue aux secteurs de l'ouest du lac comme Dolbeau-Mistassini pour lequel un indice d'érosion de 0,26 a été calculé (voir détails section 9.14.4). L'événement de novembre 2013 a conduit à un recul de 3,5 m dans cette zone dont la largeur de plage avant l'événement était de plus de 30 m à la borne 18 et de plus de 20 m à la borne 19. Dans cette zone, la largeur de la plage est suffisante pour permettre l'érosion des tempêtes sans menacer les propriétés.

La comparaison des profils A et B, illustrés à la figure 9.7, permet de mieux comprendre les écarts obtenus. En effet, le profil A est caractérisé par une pente raide de 10% jusqu'à l'élévation 100,3 m suivie d'un court plateau à l'élévation 100,25 m puis d'une pente à nouveau raide de 5% jusqu'à l'élévation 97,5 m. Au pied de cette pente, le profil présente un plateau oscillant entre les élévations 97,5 m et 98,5 m vers le large. La pente du profil B est également raide (de l'ordre de 10%) en haut de talus, mais s'adoucit ensuite à environ 1% entre les élévations 100,7 m et 97,5 m.

La cavité laissée par le chenal de la Belle-Rivière à environ 150 m de la ligne de côte contribue à maintenir des conditions propices (dissipation de l'énergie des vagues concentrée sur la pente raide) à l'érosion frontale de la plage dans la zone de la borne 29. À l'inverse la pente douce du profil B (zone de la borne 18) permet une dissipation plus étalée de l'énergie des vagues résultant en une érosion plus limitée.

Tel que déjà identifié à la section 9.8.2, le tronçon entre les bornes 29 et 30 apparaît alors comme la zone la plus sensible du site de saint-Gédéon Sud où les effets érosifs des différents modes de transport sédimentaire menacent la plage étroite. À la lumière des résultats obtenus, il semble clair qu'un adoucissement de la pente du profil dans la zone de déferlement (avec la mise en place d'un remblai), par analogie à la zone de la borne 18, permettrait de réduire significativement l'érosion dans la zone des bornes 29 et 30.

9.9 Résultats pour le site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix

9.9.1 Caractérisation du site

La figure 9.21 donne une vue rapprochée du secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix. L'étendue du modèle numérique est située entre la borne inamovible 63 et l'embouchure de la rivière Belle-Rivière, ce qui équivaut à une distance de 8 km. Ce secteur contient plusieurs structures dont deux brise-lames et une vingtaine d'épis ayant été construits entre les années 1988 et 2014.

La figure 9.22 présente les roses des vagues pour le secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix. Celles-ci ont été extraites vis-à-vis des bornes 35 et 19 à une distance approximative de 600 m de la ligne de côte. Les régimes de vague des secteurs de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix et Saint-Gédéon Sud présentent des similarités en raison de leur localisation voisine. Dans les deux cas, les secteurs sont situés au sud-est du lac ce qui les rend vulnérables aux vagues engendrées par les vents dominants du nord-ouest. De même, la combinaison de la bathymétrie profonde au large de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix et de la présence d'un fetch de 40 km de distance permet de maximiser l'énergie des vagues à l'approche de la zone modélisée. Tout comme pour le site de Saint-Gédéon Sud, les vagues dominantes du secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix sont concentrées dans un secteur angulaire étroit ayant une incidence quasiment orthogonale par rapport à l'orientation générale de la ligne de côte.

9.9.2 Évolution du trait de côte à long terme - Transport longitudinal

Les figures 9.23 et C2 (présentée à l'annexe C) illustrent les résultats des simulations de l'état de référence (actuel) et de l'état sans aucun ouvrage (avant 1986). Le transport littoral net avant la construction de l'ensemble des épis est relativement faible pour la section au sud-ouest de la borne 35, notamment entre les bornes 38 et 48, malgré un transport brut élevé mais comparable dans chacune des deux directions (figure C2). À l'est de la borne 36, un gradient positif notable du transport longitudinal est obtenu, traduisant un secteur en érosion. À l'est de la borne 40, le transport dominant est dirigé vers la droite

Depuis la mise en place des épis, le transport net est pratiquement nul entre les bornes 32 et 49 (transport alternatif entre les épis et transport quasiment nul aux épis). Ainsi, dans cette zone et en particulier entre les bornes 38 et 48 où les structures sont les plus anciennes, les tendances à long terme sont faibles (quelques dizaines de centimètres par an). Les mouvements de la ligne de côte semblent en grande partie être attribuables au transport transversal vers le large. Ces variations sont plutôt saisonnières et suivent une dynamique d'érosion et de reconstruction caractéristique des tempêtes et des périodes de temps calme.

Dans la zone de la borne 35, deux épis ont été construits en 2012 à l'est immédiat de la borne 34. La section 9.8.3 (*zone de la borne 35*) présente l'impact de ces épis sur les conditions érosives de la zone des bornes 35 et 36.

Le transport longitudinal devient plus important à l'est de la borne 31. Deux sites en érosion peuvent alors être identifiés à l'aide des résultats du modèle numérique illustrés à la figure 9.23 : la zone de la borne 3 (BI 3 jusqu'à l'embouchure de la rivière Belle-Rivière) et la zone de la borne 19 (BI 19 à BI 27). La problématique d'érosion de ces sites est également appuyée par les photos satellites, l'historique des

rechargements ainsi que les tendances extraites des données d'arpentage des plages : la plage est étroite dans le zone de la borne 19 et les rechargements sont fréquents dans la zone de la borne 3.

Afin de contrer l'érosion dans la zone de la borne 3 et de limiter l'apport de sédiments vers l'embouchure de la rivière Belle-Rivière, trois épis ont été aménagés en 2014. Les résultats des simulations présentés à la section 9.9.3 permettent d'analyser l'efficacité de cette solution. De plus, deux variantes d'aménagement sont présentées pour le site de la borne 19.



Figure 9.21 : Secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix

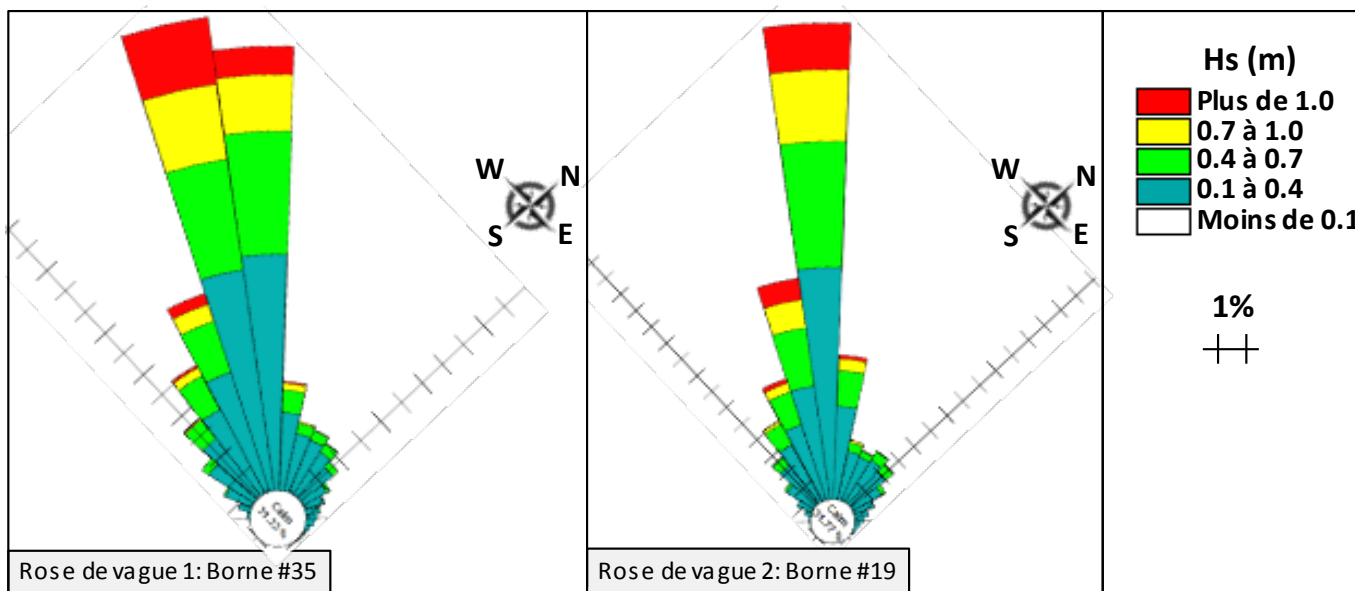


Figure 9.22: Roses des vagues pour Métabetchouan-Lac-à-la-Croix

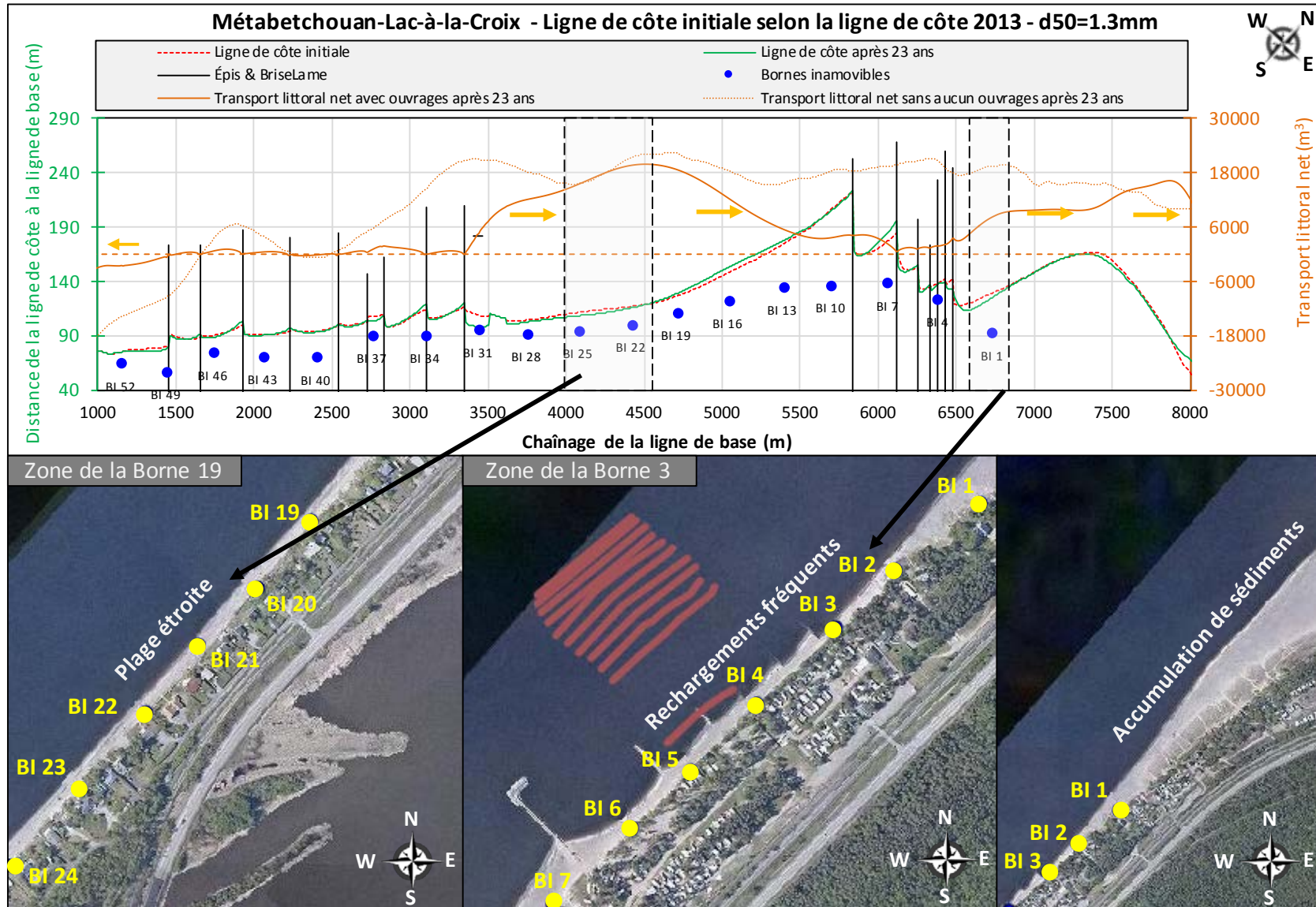


Figure 9.23: Résultats de simulations de l'évolution du trait de côte à long terme pour Métabetchouan-Lac-à-la-Croix

Soulignons que l’implantation d’ouvrages au site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix a été effectuée en plusieurs phases. Ainsi, au cours de la période de référence simulée, nombre d’interventions d’ouvrages et de rechargements ont été réalisées. Certains rechargements étaient destinés à compenser une érosion excessive alors que d’autres faisaient partie des travaux d’aménagement d’épis. Cela rend la modélisation et l’interprétation des résultats complexes. En effet, s’il est possible de dégager les principales tendances, telles que présentées à la section 9.6, il devient difficile de comparer les résultats aux valeurs des volumes de rechargement historiques puisque les changements de configuration ne peuvent être intégrés en cours de simulation. Ainsi, les résultats à long terme obtenus pour le secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix à l’étude doivent être analysés de manière relative, soit en comparant des configurations données ou des scénarios de conditions hydrodynamiques.

9.9.3 Analyse des variantes proposées

Zone de la borne 3

Pour la zone de la borne 3, il s’agit d’évaluer l’efficacité des ouvrages mis en place durant l’hiver 2014. Il s’agit de trois épis dont deux à proximité de la borne 1 et un troisième à l’extrémité nord-est du site, aux abords de l’embouchure de la rivière Belle-Rivière. Initialement, avant la mise en place des épis, les résultats montrent une érosion importante entre les bornes 1 et 3, illustrée par le gradient important de la courbe de transport (figure 9.23).

Les résultats de simulation, présentés à la figure 9.24 et résumés au tableau 9.7, montrent que la mise en place des trois nouveaux épis à l’hiver 2014 corrige la problématique d’érosion au niveau de la borne 2. L’érosion à l’aval du deuxième épi, à l’est de la borne 1, se produit dans une zone où la largeur de plage est importante et ne semble pas problématique à long terme. Il est à noter que le volume calculé après la mise en place des épis tient compte des zones d’érosion à l’aval des épis, ce qui explique l’augmentation globale indiquée dans le tableau 9.7 alors que l’objectif visé est rencontré.

Il faut également noter que cette zone fait l’objet d’un projet de réaménagement où d’importants travaux devraient être réalisés afin de remanier la configuration de l’embouchure. La présence de l’épi pourra alors contribuer à minimiser, voire à éviter, l’ensablement de la nouvelle configuration. Le secteur de l’embouchure de la rivière Belle-Rivière est cependant complexe et une étude plus approfondie faisant intervenir une modélisation bidimensionnelle de la zone a été effectuée afin d’en évaluer les caractéristiques hydrosédimentaires (voir volume 2 du rapport).

Tableau 9.7: Comparaison des aménagements entre les variantes pour la zone de la borne 3

	Rechargement total (m ³)	Longueur cumulée des épis (m)	Longueur cumulée des brise-lames (m)	Nombre d’épis	Nombre de brise-lames	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m ³)	Écart par rapport à la référence
Référence	-	-	-	-	-	13 000	-
Épis 2014	0	250	0	3	0	24 000	+ 85%

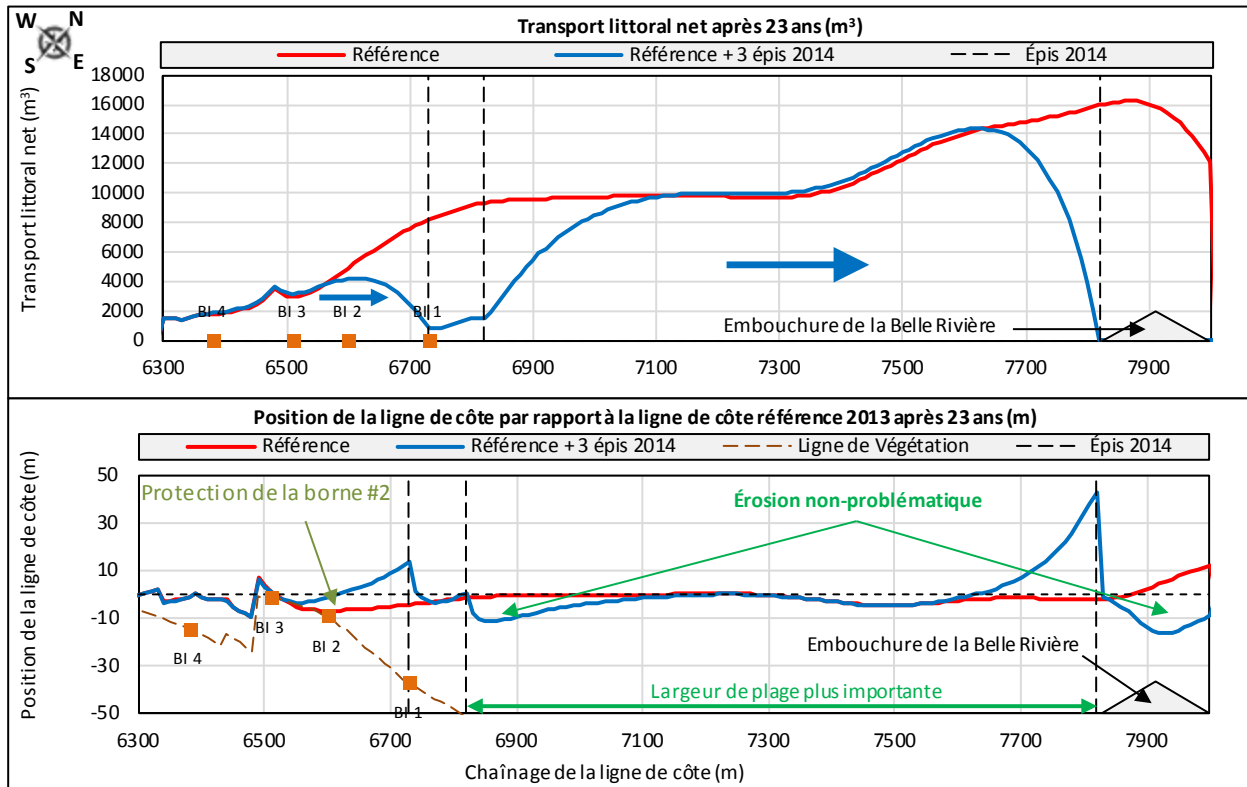


Figure 9.24: Efficacité des épis aménagés en 2014 dans la zone de la borne 3 de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix

Zone de la borne 19

Dans le cas de la zone de la borne 19, les variantes d'aménagement consistent en un rechargement seul d'une part et, d'autre part, en un champ d'épis combiné à un rechargement. Le tableau 9.8 résume les caractéristiques de ces variantes.

La figure 9.25 montre qu'un rechargement seul (variante 1) est suffisant pour protéger la plage sur une durée de 23 ans entre les bornes 21 et 29. Soulignons toutefois que les variations saisonnières dues au transport transversal vers le large ne sont pas prises en compte dans le modèle. L'érosion transversale pourrait alors réduire la durée effective de protection. Selon la configuration initiale du massif de rechargement, il est possible que l'érosion due aux premières tempêtes soit accentuée, notamment si la pente adoptée est raide (supérieure à 10% typiquement).

Bien qu'efficace car étant dans la zone où le transport longitudinal est le plus important, la mise en œuvre de la variante avec épis semble beaucoup plus lourde et pourrait être réduite en incluant une diminution progressive de la longueur des ouvrages à partir de la borne 20 vers le nord-est.

Tableau 9.8: Comparaison des variantes pour la zone de la borne 19

	Rechargement total (m ³)	Longueur cumulée des épis (m)	Longueur cumulée des brise-lames (m)	Nombre d'épis	Nombre de brise-lames	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m ³)	Écart par rapport à la référence
Référence	-	-	-	-	-	20 000	-
Variante 1	20 000	0	0	0	0	7 000	-65%
Variante 2	69 000	700	0	7	0	6 000	-70%

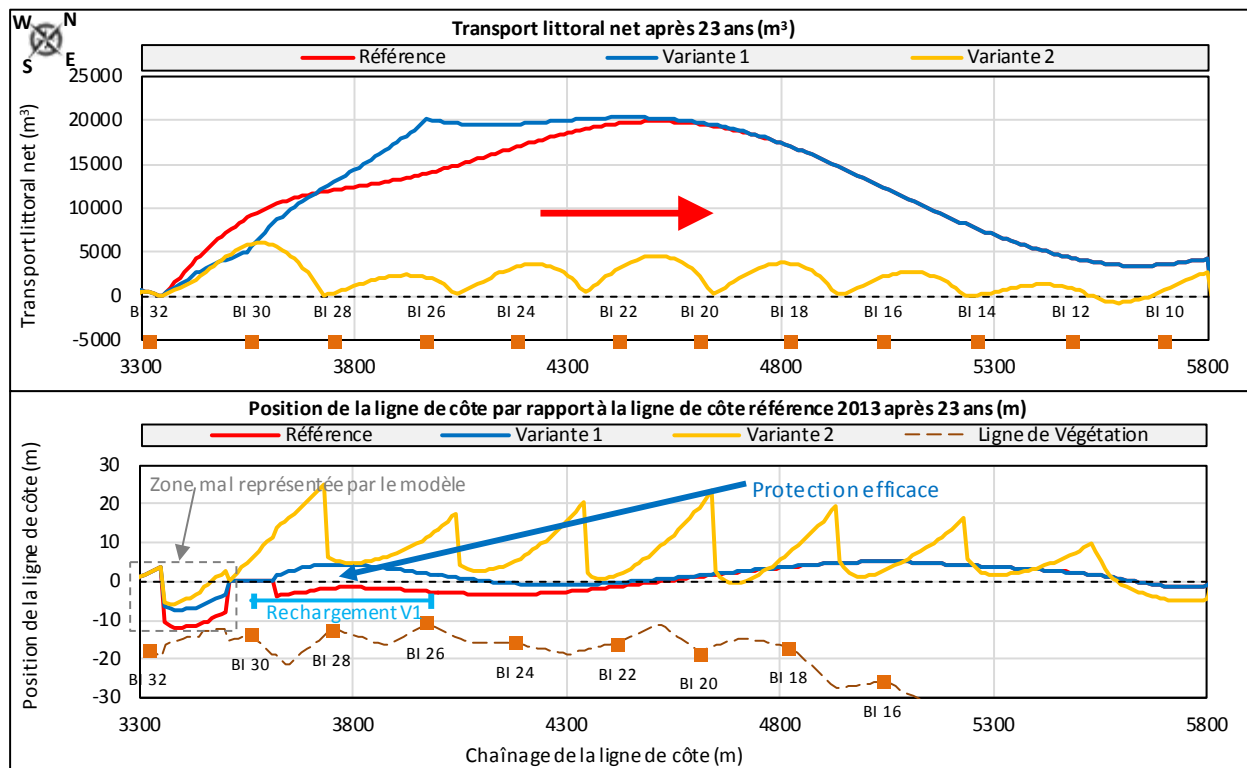


Figure 9.25: Performance des aménagements dans la zone de la borne 19 de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix

Zone de la borne 35

Pour la zone de la borne 35, il s'agit d'évaluer l'efficacité des ouvrages construits en 2012. Ces ouvrages incluent deux épis, un brise-lames et un perré. La figure 9.26 compare les résultats de la simulation du cas incluant ces ouvrages avec les résultats de la simulation exempte d'ouvrages.

En l'absence de ces structures, l'érosion conduit à un recul excessif de la ligne de côte au terme des 23 ans de simulation (au-delà des bornes inamovibles 36 et 35), ce qui explique la fréquence élevée des rechargements dans la zone avant la mise en place des ouvrages. La plage, initialement étroite, a été

rechargée tous les ans entre 2006 et 2012 et tous les 2 ans entre 1996 et 2006. En effet la zone de la borne 35 est située à l'aval d'un champ d'épis qui tend à bloquer le transport dominant dirigé vers la droite, créant ainsi un déficit d'apport à l'est de la borne 36. Tel que mentionné précédemment, le massif de rechargement peut être rapidement érodé par transport transversal vers le large par les premières tempêtes, laissant une marge réduite pour faire face aux autres tempêtes. De plus, les sédiments accumulés au pied de la plage peuvent être repris par les courants littoraux pour alimenter le transport longitudinal.

La construction des épis en 2012 a permis de protéger la portion de plage étroite située dans l'axe de la borne 35 et plus à l'est. L'épi de la borne 34 permet de contenir les sédiments qui étaient auparavant transportés vers l'est. Au niveau de la borne 36, une amélioration significative est obtenue. La largeur de plage demeure toutefois faible au terme d'une période de 23 ans. Une intervention par rechargement à la borne 36 apparaît comme un complément intéressant aux épis.

Les résultats de la simulation suite à la construction des épis en 2012 indiquent que l'érosion, initialement maximale entre les bornes 35 et 36, a été déplacée vers la zone située entre les bornes 26 et 31, où la largeur de la plage est plus importante. Entre les bornes 26 et 31, la présence des épis induit une réduction d'environ 80% du volume érodé.

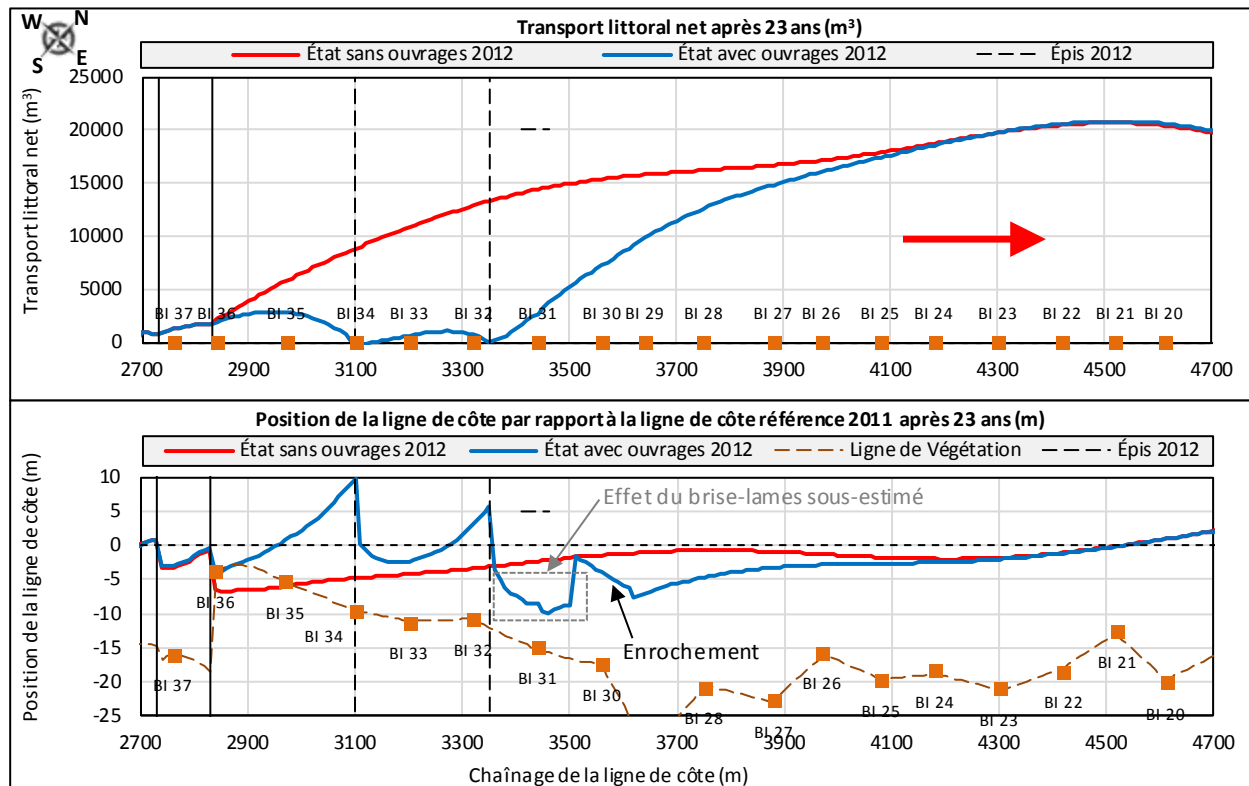


Figure 9.26: Efficacité des ouvrages aménagés en 2012 dans la zone de la borne 35 de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix

Il faut noter que la réponse du modèle à la présence du brise-lames à proximité des épis ne semble pas adéquate, notamment en sous-estimant l'effet d'accrétion derrière l'ouvrage. Le bilan dans la zone d'influence du brise-lames surestime donc l'érosion. L'obliquité restreinte des vagues incidentes dominantes par rapport à l'ouvrage (voir rose des vagues 1 de la figure 9.19) conduit à une représentation erronée des courants locaux et donc à sous-estimer l'accumulation.

Zone de la borne 48

La zone de la borne 48 a également été identifiée comme étant problématique du fait de la faible largeur de plage : des variantes de rechargement et de brise-lames ont donc été proposées par la firme WSP. Les résultats de modélisation montrent toutefois que le transport longitudinal net est faible dans cette zone et que le transport transversal vers le large serait plutôt le principal moteur de l'érosion.

Les résultats présentés aux figures 9.23 et C2 (annexe C) montrent que la présence des épis entre les bornes 46 et 49 a permis de contrôler l'érosion qui se produisait initialement (voir courbe en pointillés résultant de la simulation sans ouvrage). La ligne de côte est maintenant pratiquement stable et sa position suit l'alternance des érosions et reconstructions induites par le transport transversal, les sédiments demeurant disponibles pour le processus de reconstruction de la plage.

L'ajout de brise-lames permettrait effectivement de contrer l'attaque frontale des vagues. Cependant, le modèle de transport longitudinal ne peut simuler l'effet de ces ouvrages en raison de la quantité trop importante de vagues ayant une direction quasi perpendiculaire à la ligne de côte. De plus, la proximité d'autres épis pourrait engendrer des effets complexes. Une modélisation bidimensionnelle permettrait de mieux évaluer la transformation des vagues, la formation des courants et l'impact des brise-lames sur l'érosion dans cette zone.

9.9.4 Transport transversal

Le tableau 9.9 présente la matrice de volumes érodés par transport transversal en suivant la méthode présentée à la section 9.1.3 pour le secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix.

Tableau 9.9: Secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix – Matrice de volume érodé vers le large

Période de récurrence*	Volume érodé vers le large (m ³ /m)					
	Niveau d'eau en pieds					
	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	10.3	8.9	6.8	4.5	3.1	5.6
10	9.8	7.8	5.9	4.3	3.3	5.5
5	10.3	7.9	6.1	3.9	3.2	4.8
2	8.9	7.4	5.0	3.8	2.6	5.0
1	6.0	5.3	4.3	3.3	2.1	2.0

*Récurrence en années des événements de vagues de tempête basée sur l'énergie cumulée pendant 72 heures

Les résultats indiquent que l'intensité des vagues incidentes combinée à un profil typique du site présentant des pentes relativement raides (près de 10% entre 101,5 m et 100,5 m, près de 4% entre 100,5 et 99,5 m et près de 2% entre 99,5 m et 98,5 m) conduit à des volumes d'érosion significatifs pour toute la gamme de niveaux d'eau, contrairement à ce qui est obtenu à d'autres sites présentant des pentes plus faibles (Dolbeau-Mistassini ou Saint-Félicien par exemple).

L'indice d'érosion prend ici une valeur égale à 1. Tel que décrit à la section 9.1.3, par convention, le site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix a été retenu pour servir de référence. Cette valeur est environ 4 fois supérieure à celle obtenue pour des sites moins exposés à l'érosion transversale comme Dolbeau-Mistassini ou Saint-Félicien. Cela traduit la forte exposition du site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix aux vagues de tempêtes (vents dominants du nord-ouest, fetch le plus long du lac et profil de plage relativement raide).

Comme à Saint-Gédéon Sud, la tempête du 23 au 26 novembre 2013 a produit des vagues à Métabetchouan-Lac-à-la-Croix dont le niveau d'énergie (cumulé sur une période de 72 heures) correspond à un événement de période de récurrence de 15 ans. Combiné à un niveau du lac de 16,5 pieds (101,54 m), cet événement a conduit à un recul typique de l'ordre de 5 m pour un volume typique de près de 9 m³/m. Si le niveau avait été de 15,5 pieds pendant la tempête, le volume érodé aurait été réduit d'un peu plus de 20%, avec un recul de la ligne à 15,5 pieds de 4 m ou un recul de la ligne de côte à 16,5 pieds de 1,5 m. Les résultats obtenus pour un niveau d'eau à 15,5 pieds, soit 0,30 m sous le niveau maximum actuel, montrent que la largeur de plage supplémentaire consécutive à l'abaissement du niveau offre une marge notable, mais à l'instar de Saint-Gédéon Sud, la problématique dans les zones de plages étroites risque simplement d'être repoussée à court ou moyen terme (prochaine tempête d'importance). La section 10 du présent rapport traite de manière détaillée de l'effet du niveau d'eau sur l'érosion des plages.

En ce qui concerne les rechargements, certaines zones en font l'objet régulièrement, comme par exemple, la zone de la borne 35 où des travaux de rechargement ont été réalisés tous les ans entre 2006 et 2012, avant la mise place des épis. Les plans de rechargement datés de septembre 2009, proposent un rechargement dans cette zone selon un massif de volume 30 t/m (ou 18 m³/m) avec une pente relativement raide de 1V:7H et une crête à l'élévation moyenne 102,85 m (entre 102,7 m et 103 m), soit environ 1,3 m au-dessus du niveau d'eau maximum. Une telle géométrie s'écarte d'une configuration de profil d'équilibre et est propice à une érosion significative lors des premières tempêtes suivant les travaux. Des simulations ont été entreprises pour évaluer la stabilité typique du massif de rechargement à un événement de tempête ayant un niveau d'énergie (cumulé sur 72 heures) de période de récurrence 1 an au niveau d'eau 16,5 pieds.

Le massif de rechargement tel que décrit permet une avancée de 6 m de la ligne de côte à 16,5 pieds devant être protégée. Les résultats présentés à la figure 9.27 indiquent que l'événement de tempête induit un recul de cette ligne de côte de 3 m, ce qui laisse une protection de seulement 3 m pour les autres tempêtes (près de 30% du volume initial est mobilisé).

Dans le cas d'un site présentant un gradient de transport longitudinal net nul, l'adoucissement de la pente permet de limiter l'action des vagues des tempêtes suivantes et le processus de reconstruction par temps

calme peut avoir lieu suite à l'érosion initiale du massif de rechargement. Dans une zone où le gradient de transport longitudinal est positif (érosion), les sédiments transportés au pied de la plage pour former une barre sont entraînés parallèlement à la côte mais ne sont pas remplacés. Ainsi, la quantité de sédiments disponibles pour la reconstruction de la plage est largement réduite et la barre contribuant à l'adoucissement de la pente disparaît, laissant la pente de la plage exposée aux vagues. Dans ce cas, l'érosion des tempêtes successives est significative et la protection résiduelle de 3 m devient insuffisante. Il pourrait être intéressant de poursuivre une analyse des rechargements afin d'optimiser leur géométrie pour minimiser l'érosion et maximiser leur durée de vie.

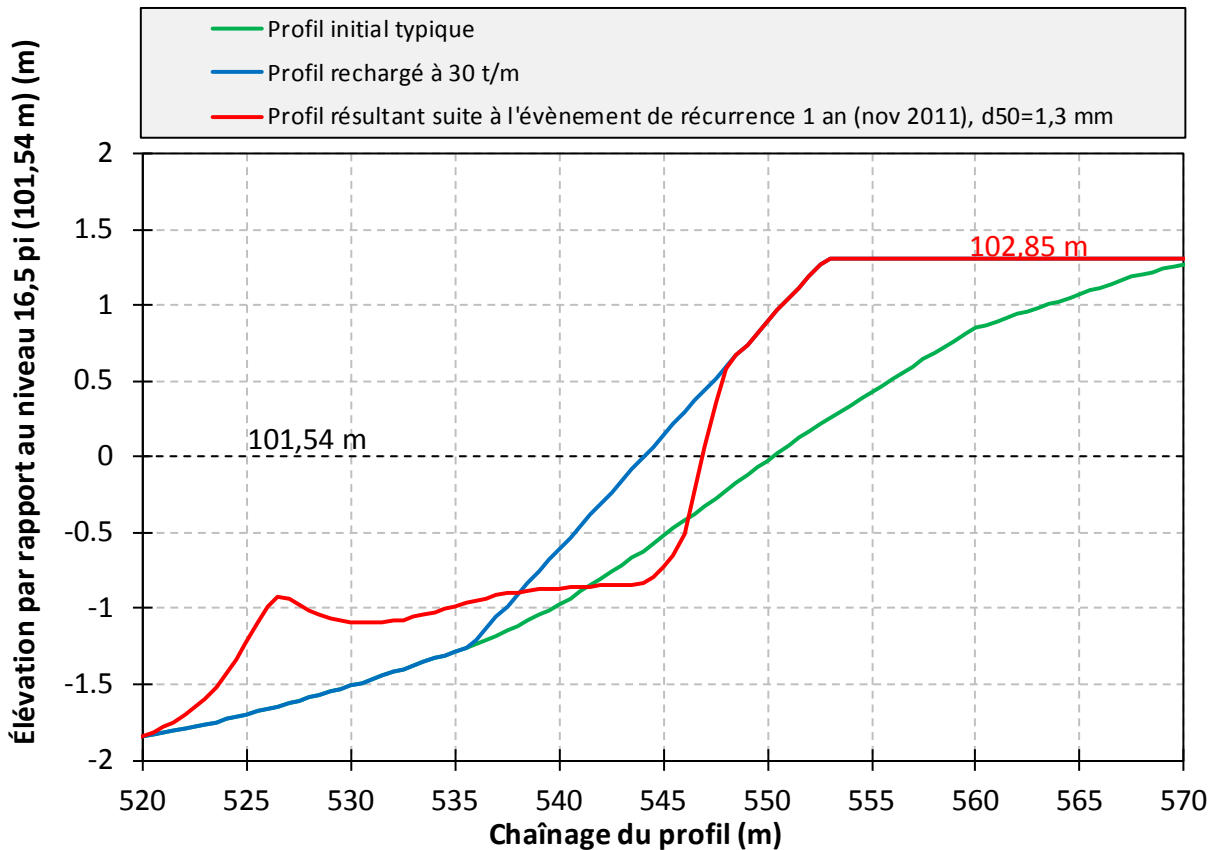


Figure 9.27: Comportement d'un massif de rechargement

9.10 Résultats pour le site de Chambord (Domaine du Marais)

9.10.1 Caractérisation du site

La figure 9.28 illustre la portion de rivage modélisée pour le site de Chambord (Domaine du Marais). La zone modélisée s'étend de la borne inamovible 24 jusqu'à la borne 3 pour une distance totale de 2 km. Ce secteur ne contient aucune structure.

La figure 9.29 présente les roses des vagues pour le secteur de Chambord (Domaine du Marais). Ces roses des vagues ont été extraites vis-à-vis des bornes 18 et 9 à une distance approximative de 1 200 m de la ligne de côte.

Les roses de vagues au large de Chambord (Domaine du Marais) montrent que le site est soumis à deux directions dominantes de vagues. La direction principale est concentrée sur le nord-ouest, correspondant aux vents dominants, et donne lieu à une faible incidence par rapport à l'orientation générale de la ligne de côte. La direction secondaire est centrée sur le nord-est. Les vagues de cette direction, étant générées par les vents de l'est, sont significativement moins fréquentes que celles du nord-ouest.



Figure 9.28 : Secteur de Chambord (Domaine du Marais)

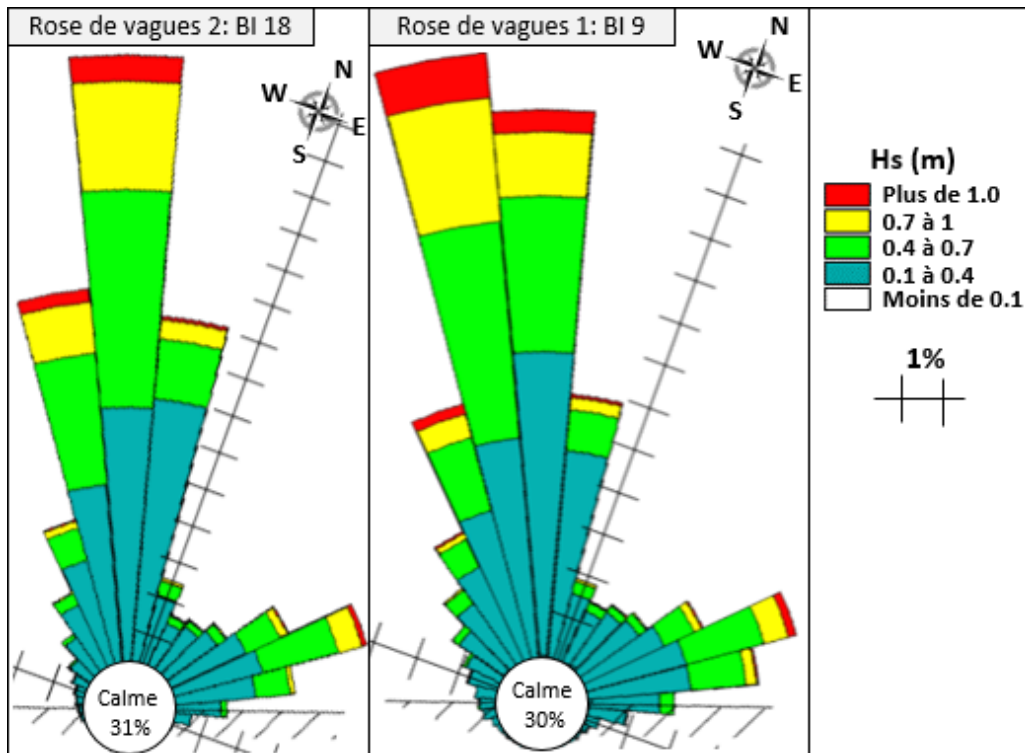


Figure 9.29: Roses des vagues pour le site de Chambord (Domaine du Marais)

9.10.2 Évolution du trait de côte à long terme - Transport longitudinal

Les vagues présentées à la figure 9.29 ont été extraites à une profondeur de près de 10 m pour le niveau d'eau 101,54 m (16,5 pi). Ainsi, ces vagues n'ont pas été suffisamment réfractées pour pouvoir clairement dégager les directions prédominantes des courants littoraux. L'examen de la bathymétrie montre toutefois que les vagues dominantes du nord-ouest auraient tendance à tourner vers l'ouest dans la portion ouest du secteur alors qu'elles auraient plutôt tendance à tourner vers l'est dans la portion est du secteur de Chambord (Domaine du Marais) (figure 9.30).

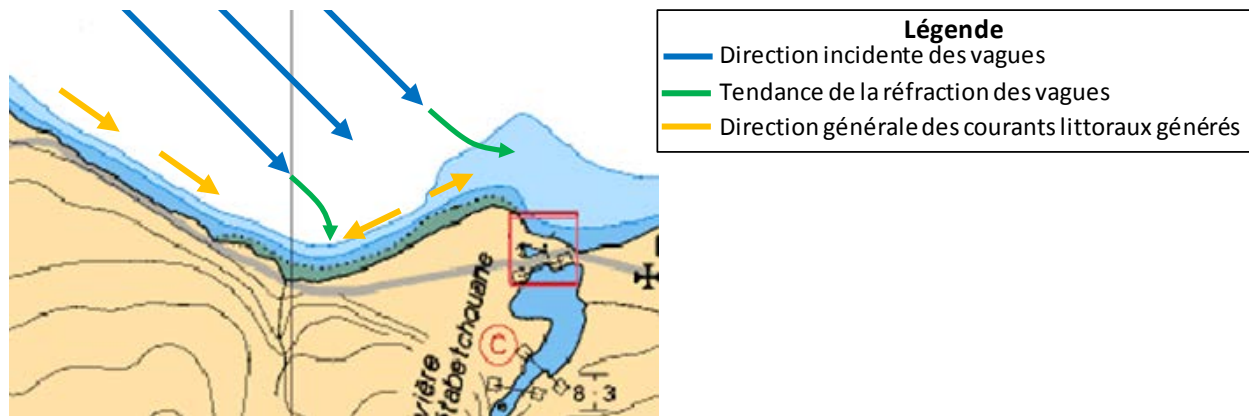


Figure 9.30 : Analyse conceptuelle de l'approche des vagues au site de Chambord (Domaine du Marais)

La figure 9.31 présente les résultats de simulation de l'état de référence (à partir de 2014) pour le site de Chambord (Domaine du Marais). Ces résultats indiquent un transport vers l'est entre les bornes 4 et 10 et un transport vers l'ouest entre les bornes 10 et 24, ce qui concorde avec l'analyse préliminaire des vagues incidentes. Le secteur apparaît donc en érosion sur son ensemble, et plus particulièrement dans les zones des bornes 10 et 20.

Dans la zone de la borne 10, les volumes érodés de 35 000 m³ entre les bornes 6 et 13 conduisent à un recul qui atteint ou dépasse légèrement la ligne des bornes inamovibles après 23 ans. La ligne de côte initiale des simulations étant celle de 2014, relevée peu de temps après le dernier rechargement, les résultats tendent à montrer que des travaux de rechargements devraient être requis environ à mi-parcours de la période de 23 ans, soit typiquement après une dizaine d'années. Bien que cette période puisse être potentiellement réduite par les effets de l'érosion transversale, notamment après les premières tempêtes suivant les travaux de rechargement, ces résultats semblent être en accord avec la réalité du site puisque ce dernier a fait l'objet de rechargements peu fréquents et irrégulièrement espacés, soit en 1994, 2000 et 2014. Plus à l'est, vers la pointe située aux abords des bornes 3 et 4, l'érosion prédite par le modèle pourrait contenir une plus grande part d'incertitude, compte tenu des changements bathymétriques par rapport à la zone plus centrale du secteur (delta de la rivière Métabetchouan).

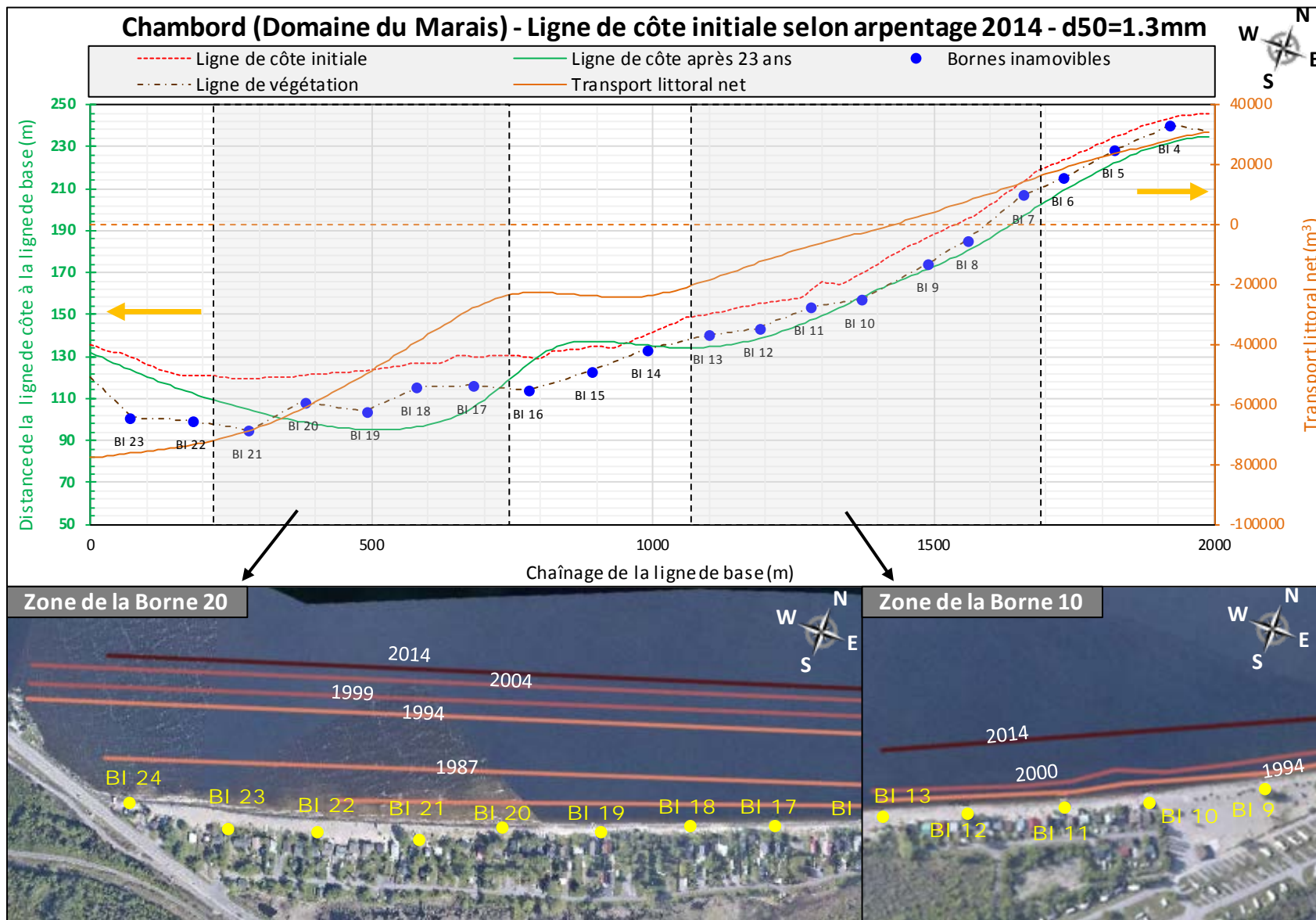


Figure 9.31: Résultats de simulations de l'évolution du trait de côte à long terme pour Chambord (Domaine du Marais)

Dans la zone de la borne 20, les résultats indiquent une érosion importante entre les bornes 22 et 16 avec un transport vers la gauche (sud-ouest). Dans ce cas, les volumes érodés par transport longitudinal indiquent que des interventions de rechargement après une période de l'ordre de 5 à 10 ans seraient requises, ce qui concorde avec la fréquence actuelle des rechargements.

D'après l'analyse initiale de l'approche des vagues, le transport longitudinal aux abords de la borne 24 devrait rencontrer un courant littoral dirigé dans le sens opposé (voir figure 9.30) et donner lieu à un courant dirigé vers le large accompagné d'une zone de dépôt. Le degré de schématisation du modèle ne permet pas de reproduire ces effets bidimensionnels, et les relevés bathymétriques n'offrent pas une résolution suffisante pour clairement déceler une zone de dépôt. Les photos aériennes n'offrent pas non plus d'éléments concrets, excepté une photo satellite (*source : Google Earth*) en fin d'hiver 2013, donc à niveau bas, qui laisse entrevoir une zone de dépôt aux abords de l'extrémité ouest du site (figure 9.32).



Figure 9.32 : Extrémité ouest du secteur de Chambord (Domaine du Marais)

Les mesures d'arpentage des plages ainsi que les résultats de simulations tendent à montrer que la zone entre les bornes 13 et 15 semble relativement stable et n'a pas fait l'objet de rechargement. Les résultats indiquent un gradient de transport net pratiquement nul dans cette zone malgré un transport notable, ce qui traduit un transit littoral sans érosion ni accrétion. Les mesures d'arpentage indiquent quant à elles que la ligne de côte est tout de même soumise à des variations d'une année à l'autre, traduisant l'alternance de l'effet érosif des tempêtes et d'un processus de reconstruction par temps plus calme. À l'inverse, les zones en érosion (zones des bornes 20 et 10) sont le siège de gradient de transport longitudinal positif, donc à effet érosif. Ainsi les sédiments accumulés au pied de la plage du fait de

l'érosion transversale lors d'un événement de tempête sont entraînés parallèlement à la côte mais ne sont pas remplacés par un apport longitudinal, laissant alors un déficit de matériaux pour les processus de reconstruction et conduisant à long terme au recul de la ligne de côte.

Bien que certains éléments semblent confirmer les mécanismes du transport dans ce secteur et que les résultats de calibrage concordent avec les tendances observées (voir annexe B), des données bathymétriques complémentaires seraient nécessaires afin de valider plus clairement les résultats fournis par le modèle. Ces données permettraient de situer les zones de dépôt dans le but de valider les directions d'écoulement et de transport de sédiments. De plus, une bathymétrie mieux définie permettrait une étude par modélisation 2D des patrons de courants littoraux dans la section sud-ouest de Chambord (Domaine du Marais).

9.10.3 Transport transversal

Le tableau 9.10 présente la matrice de volume érodé par transport transversal calculé au site de Chambord (Domaine du Marais).

Le secteur de Chambord (Domaine du Marais) est caractérisé par un profil présentant une pente raide de l'ordre de 10% jusqu'à la cote 100,5 m, suivie par une pente de l'ordre de 6% jusqu'à la cote 98 m, puis une pente de l'ordre de 3% jusqu'à l'élévation 94,5 m (voir figure 9.7). Ce profil est dans l'ensemble plus raide que celui représentant le secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix. Cette morphologie du secteur de Chambord (Domaine du Marais) permet donc d'expliquer les faibles variations du volume d'érosion obtenu en période de tempête sur la gamme des niveaux d'eau étudiée.

Tableau 9.10: Secteur de Chambord (Domaine du Marais) – Matrice de volume érodé vers le large

Période de récurrence*	Volume érodé vers le large (m ³ /m)					
	Niveau d'eau en pieds					
	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	7.9	6.9	6.6	8.6	11.1	7.4
10	5.1	5.3	5.3	7.6	9.8	6.5
5	7.3	6.7	7.4	9.3	10.7	6.5
2	5.9	4.8	4.1	5.0	7.7	6.1
1	5.4	4.0	4.3	2.5	6.2	6.4

*Récurrence en années des événements de vagues de tempête basée sur l'énergie cumulée pendant 72 heures

La morphologie du secteur, combinée à une exposition aux vagues dominantes du nord-ouest, conduit à un indice d'érosion de 1,4, soit 40% plus élevé que pour le secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix. Cette valeur élevée découle du fait que les contributions au calcul de l'indice sont d'un ordre de grandeur comparable sur toute la gamme des niveaux d'eau. Cela traduit également que les tempêtes induisent une érosion significative, que quel que soit le niveau d'eau.

Bien que le site soit exposé à l'érosion transversale sur toute la gamme de niveaux d'eau, les reculs associés demeurent relativement limités avec des valeurs de l'ordre de 2 à 3 m, excepté au niveau 12 pieds, qui se

démarque avec une valeur plus élevée (de l'ordre de 10 m) à cause d'une singularité de la bathymétrie. En effet, dans le cas du profil du secteur de Chambord (Domaine du Marais), la variation de niveau d'eau a une influence très limitée sur la dissipation de l'énergie des vagues avant d'atteindre la plage.

Il faut toutefois souligner que le profil caractéristique de la plage de Chambord (Domaine du Marais) a été extrait des données relevées durant l'automne 2014. Or, ce secteur a fait l'objet de travaux de rechargement au cours de l'hiver 2014, entre l'élévation 102,7 m en haut de talus et l'élévation 99,5 m (environ 9,5 pi) au pied du talus. Cela signifie que les relevés représentent un profil post-rechargement (à forte pente) sur toute la gamme de niveaux d'eau à l'étude (entre 9,5 pi et 17,5 pi). Ce profil a de surcroît subi très peu d'érosion, la période comprise entre les mois de mai et d'octobre 2014 ayant généré les vagues de tempêtes les plus faibles des 23 ans de référence (1992-2014). Bien que le site soit effectivement dans une zone plus abrupte, il est vraisemblable que sa configuration similaire à un profil fraîchement rechargé conduise à surestimer l'indice d'érosion. Il pourrait être intéressant de faire de nouveaux relevés après une période prolongée de quelques années pour obtenir un profil plus stable et plus représentatif.

9.11 Résultats pour le site de Chambord (Pointe)

9.11.1 Caractérisation du site

La figure 9.33 illustre le tronçon de berge modélisé à Chambord (Pointe). La zone modélisée s'étend de la borne inamovible 7 jusqu'à la borne 1 pour une distance totale de 700 m. Cette zone ne contient aucune structure, à l'exception de l'épi implanté en 2007 qui est situé à l'extérieur de la zone modélisée.



Figure 9.33 : Secteur de Chambord (Pointe)

La figure 9.34 présente la rose des vagues pour le secteur de Chambord (Pointe). Celle-ci a été extraite vis-à-vis de la borne 4 à une distance approximative de 1 400 m de la côte.

D'après la rose des vagues, le secteur de Chambord (Pointe) est soumis à deux directions dominantes de vagues, l'une relativement étalée et centrée sur le nord-nord-ouest et l'autre principalement concentrée sur le secteur est. Les vagues du nord au nord-ouest apparaissent comme les plus fréquentes.

Les vagues dominantes sont susceptibles de développer des courants littoraux contribuant au transport de sédiments dans les deux directions parallèlement à la côte.

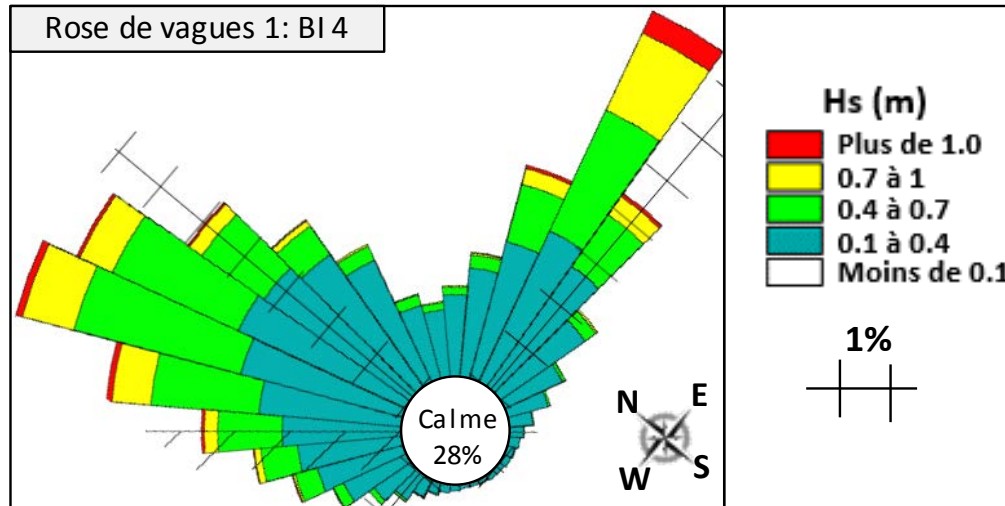


Figure 9.34: Rose des vagues pour Chambord (Pointe)

9.11.2 Évolution du trait de côte à long terme - Transport longitudinal

La figure 9.35 illustre les résultats de modélisation de la simulation de référence (état 2014). Ces résultats montrent une érosion à droite (sud-est) de la borne 4 et une accrétion à gauche (nord-ouest) de cette même borne. Le transport littoral net apparaît relativement faible, traduisant une alternance des directions de transport, tel qu'illustré à la figure C4 (présentée à l'annexe C) et par l'analyse préliminaire de la rose des vagues. Les résultats indiquent que le transport littoral net est majoritairement orienté vers la gauche (direction nord-ouest dans la partie centrale du secteur à l'étude). Aux extrémités de la zone modélisée, le transport net est plutôt vers la droite.

La zone de la borne 3 a été identifiée comme étant problématique compte tenu de l'érosion marquée obtenue par simulations et l'historique des rechargements qui ont eu lieu entre 1989 et 2014. La fréquence et le positionnement de ces rechargements concorde avec l'érosion modélisée. En effet, une érosion de la ligne de végétation a été simulée par le modèle lorsqu'il y a absence de rechargement granulaire. Ces derniers permettent donc de maintenir une largeur de plage acceptable au fil du temps.

L'implantation d'épis dans la zone de la borne 3 n'offrirait pas l'effet escompté en raison de la divergence de la direction de transport net au niveau de la borne 2. Ainsi l'approche par rechargement semble la plus appropriée. Il pourrait être intéressant, comme évoqué à la section 9.9 pour le site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, d'étudier la réponse de divers types de rechargements afin d'en optimiser la durée de vie utile et de minimiser la fréquence des interventions.

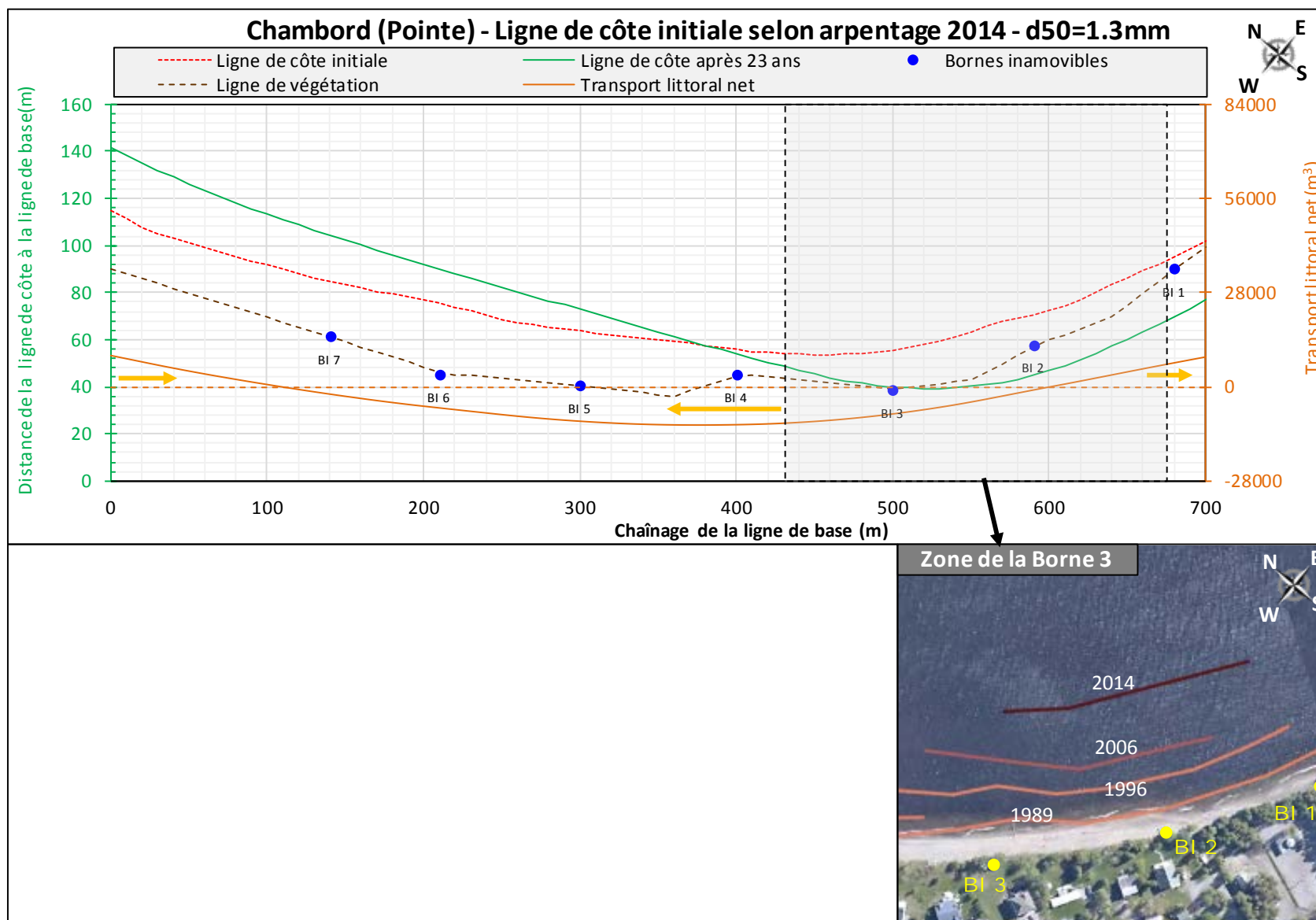


Figure 9.35: Résultats de simulations de l'évolution du trait de côte à long terme pour Chambord (Pointe)

9.11.3 Transport transversal

Le tableau 9.11 présente la matrice de volume érodé par transport transversal au site de Chambord (Pointe) pour des événements de courte durée.

Dans l'ensemble, les résultats montrent une réduction notable du volume érodé au cours d'une tempête en fonction du niveau d'eau. Cette réduction est beaucoup plus marquée dans la gamme des niveaux les plus bas pris en compte. En effet alors que la partie supérieure du profil est caractérisée par une pente raide de l'ordre de 10% entre les élévations 101,5 et 100 m, la partie inférieure à la cote 100 m est plutôt caractérisée par une pente de l'ordre de 1,5% sur plus de 200 m (voir figure 9.7). C'est cette pente douce qui permet de limiter l'action érosive transversale des vagues au niveau de la plage.

L'indice d'érosion, calculé sur la base des résultats du tableau 9.11 et des séries chronologiques de vagues et de niveaux d'eau, est établi à une valeur de 0,76 à Chambord (Pointe). Cette valeur est comparable à celle obtenue au site de Saint-Henri Nord 1 (section 9.15), et traduit un secteur modérément exposé en période de tempête.

Tableau 9.11: Secteur de Chambord (pointe) – Matrice de volume érodé vers le large

Période de récurrence*	Volume érodé vers le large (m ³ /m)					
	Niveau d'eau en pieds					
	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	9.6	8.5	6.8	3.4	0.4	0.7
10	8.7	7.0	5.7	3.4	0.3	0.6
5	8.5	5.6	4.2	2.4	0.3	0.6
2	6.8	5.8	5.5	3.1	0.2	0.4
1	5.1	4.0	4.2	2.2	0.1	0.3

*Récurrence en années des événements de vagues de tempête basée sur l'énergie cumulée pendant 72 heures

Les résultats en termes de recul suivent la tendance des valeurs de volume. Pour un événement de période de récurrence de 15 ans sous un niveau d'eau de 16,5 pieds, un recul d'environ 5,5 m est obtenu. Le même événement pris sous un niveau de 15,5 pieds conduit à un volume 20% moindre et à un recul de l'ordre de 4,5 m de la ligne à 15,5 pieds, alors que la ligne de côte à 16,5 pieds accuse un recul de 1,5 m. Avec la pente raide de la plage (10%), la largeur supplémentaire consécutive à l'abaissement du niveau d'eau d'un pied est d'environ 3 m, ce qui laisse une marge limitée, en particulier dans la zone de la borne 1 à 3, où le transport longitudinal est érosif. Dans ce cas, l'érosion de la barre formée suite à l'érosion transversale est à son tour érodée par transport longitudinal laissant alors le profil exposé aux tempêtes suivantes.

Il est toutefois important de souligner qu'à l'instar du secteur de Chambord (Domaine du Marais), le secteur de Chambord (Pointe) a fait l'objet d'un rechargement au cours de l'hiver 2014. Ainsi, dans sa partie supérieure, le profil, extrait des mesures réalisées durant l'automne 2014, présente une morphologie en cours d'ajustement aux conditions hydrodynamiques locales.

Les volumes plus importants obtenus dans la gamme des niveaux hauts sont vraisemblablement surestimés par rapport à un profil ayant bénéficié d’une plus longue période de stabilisation.

9.12 Résultats pour le site de Mashteuiatsh

9.12.1 Caractérisation du site

Une vue rapprochée du secteur de Mashteuiatsh est illustrée à la figure 9.36. La zone modélisée s’étend de la borne 14 jusqu’à la borne 2 pour une distance totale de 1 300 m. Ce secteur contient plusieurs épis, dont cinq construits en 1989 et 1991 à l’intérieur de la zone modélisée.



Figure 9.36 : Secteur de Mashteuiatsh

La figure 9.37 illustre les roses des vagues vis-à-vis des bornes 11 et 4 du site de Mashteuiatsh. Compte tenu de la configuration bathymétrique générale du secteur (voir figure 9.6), les vagues incidentes à l’approche du site utilisées pour l’analyse et les fins de modélisation ont dû être extraites relativement près de la côte (500 m), dans une zone peu profonde. Partiellement réfractées, les vagues de la figure 9.37 présentent ainsi des hauteurs de vagues généralement plus faibles que celles des autres sites étudiés.

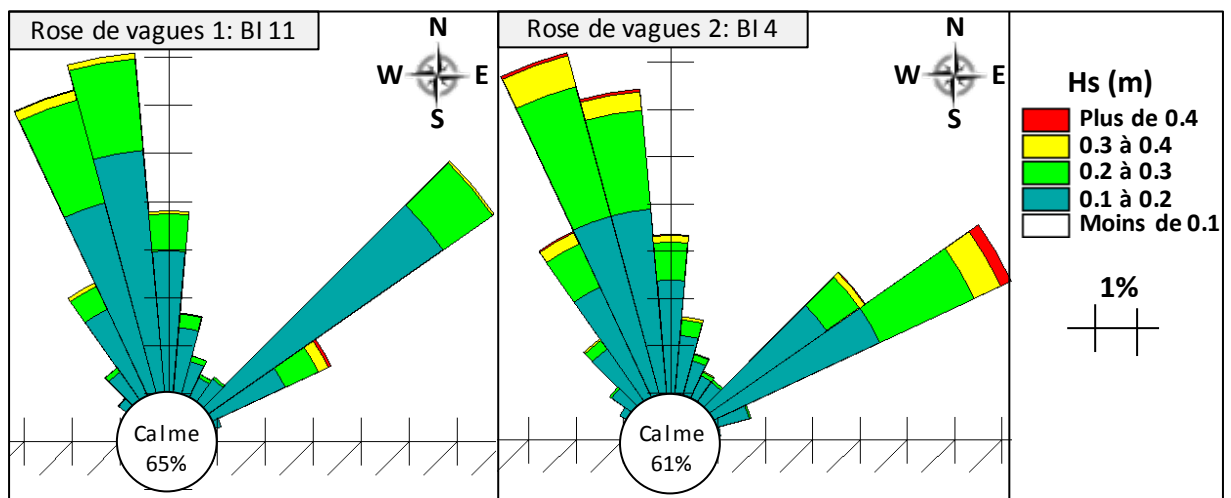


Figure 9.37: Roses des vagues pour Mashteuiatsh

Les roses de vagues présentées à la figure 9.37 mettent en évidence deux directions dominantes des vagues à Mashteuiatsh, soit le nord-nord-ouest et l'est-nord-est. Les vagues en provenance du nord-nord-ouest sont engendrés par les vents soufflant de la même direction. En revanche, les vagues provenant de l'est-nord-est sont engendrées par les vents de direction sud-est. Ce type de vent provoque des vagues au large en provenance du sud-est qui sont ensuite réfractées vers l'est-nord-est à mesure qu'elles se rapprochent du secteur de Mashteuiatsh.

Les courants littoraux qui se développent au site de Mashteuiatsh sont donc susceptibles d'alterner régulièrement leur direction.

9.12.2 Évolution du trait de côte à long terme - Transport longitudinal

Les figures 9.38 et C5 (présentée à l'annexe C) présentent les résultats de simulation de l'état de référence (à partir de l'état 2014) et de la simulation sans aucun ouvrage (à partir de l'état 1986) pour le site de Mashteuiatsh. La simulation sans ouvrage montre effectivement un transport marqué vers la gauche (ouest), en particulier dans la portion est du site. La présence des épis contribue à réduire drastiquement le transport net qui devient pratiquement nul entre les bornes 6 et 12. Les épis permettent donc de contrôler le transport et de réduire significativement les effets érosifs dans la portion est.

Les variations de la position de la ligne de côte obtenues par le modèle d'évolution du trait de côte dans les zones situées entre les épis sont relativement faibles. Les mesures d'arpentage des plages indiquent des variations importantes d'une année à l'autre qui peuvent s'expliquer par les mécanismes de transport transversal à niveau haut (voir section 9.12.3).

Avant la mise en place des épis, les résultats montrent que la zone de la borne 13 était relativement stable, voire en légère accretion, alors qu'actuellement, cette zone est plutôt en érosion puisque l'épi de la borne 12 bloque les apports en provenance de la droite (est). Les photos montrent également une plage étroite en face de cette borne.

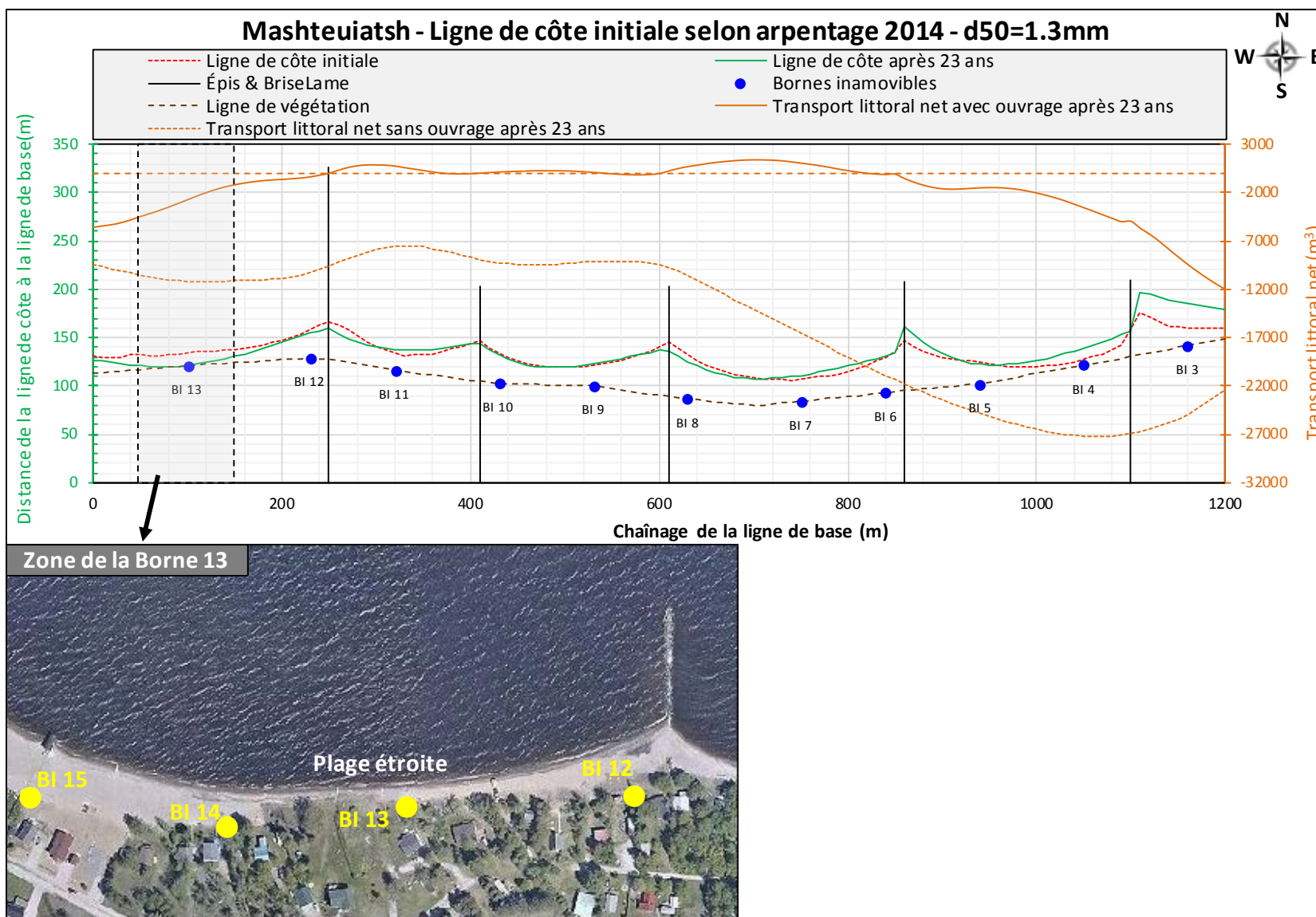


Figure 9.38: Résultats de simulations de l'évolution du trait de côte à long terme pour Mashteuiatsh

La zone en érosion étant relativement courte, celle-ci pourrait bénéficier d'un rechargement. Les résultats de simulation montrent que la ligne de végétation n'est atteinte qu'au terme de la période de 23 ans à partir de la ligne de côte arpentée en 2014, ce qui indique qu'un rechargement correctement dimensionné permettrait une protection durable de cette zone. Une variante faisant intervenir des épis supplémentaires, bien que plus lourde à mettre en œuvre, viendrait compléter le champ d'épis existant et permettrait également de résoudre la problématique.

9.12.3 Transport transversal

La matrice de volume érodé par transport transversal au site de Mashteuiatsh pour des événements de courte durée est présentée au tableau 9.12.

Tableau 9.12: Secteur de Mashteuiatsh - Matrice de volume érodé vers le large

Période de récurrence*	Volume érodé vers le large (m ³ /m)					
	Niveau d'eau en pieds					
	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	4.3	3.5	2.9	1.9	0.1	0.2
10	3.7	3.1	2.4	1.5	0.1	0.1
5	3.7	3.2	3.0	1.4	0.2	0.0
2	3.7	3.1	2.5	1.4	0.2	0.1
1	1.7	1.7	1.6	1.1	0.1	0.1

*Récurrence en années des événements de vagues de tempête à Mashteuiatsh, basé sur l'énergie cumulée pendant 72 heures

Le secteur de Mashteuiatsh (dans la zone de Pointe Bleue) présente un profil qui est globalement comparable aux profils des sites de Saint-Félicien ou Dolbeau-Mistassini, soit une pente raide (10%) suivie d'une pente très douce (0,5%) vers le large (figure 9.7). Toutefois, la pente raide à Mashteuiatsh se poursuit jusqu'à l'élévation 99,5 m, soit environ 1 m plus bas que le point de changement de pente aux sites de Saint-Félicien et Dolbeau-Mistassini. La figure 9.7 montre que sur une distance de 40 m vers le large à partir de la ligne de côte, le profil du secteur de Mashteuiatsh se compare plutôt à celui du secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix. Ainsi la section en pente raide est plus exposée aux vagues à niveau bas, ce qui explique les volumes d'érosion plus importants entre 14 pieds et 15,5 pieds en période de tempête.

Les résultats indiquent des reculs de 2 à 3 m pour un niveau d'eau de 16,5 pieds. Pour un niveau d'eau de 15,5 pieds, le recul est réduit d'environ la moitié pour la ligne à 15,5 pieds et négligeable pour des niveaux inférieurs. Le recul de la ligne à 16,5 pi est nul pour des niveaux d'eau de 15,5 pieds et moins.

En termes d'indice d'érosion, le secteur de Mashteuiatsh donne lieu à une valeur de 0,61, ce qui est plus élevé qu'à Saint-Félicien (voir section 9.13) ou Dolbeau-Mistassini (voir section 9.14). Cette valeur semble plutôt caractériser un site ayant un comportement intermédiaire entre les sites à pente raide et les sites à pente douce, face à l'action des vagues en période de tempête. Cela indique également qu'une plus grande partie du profil est sujette à l'érosion selon le niveau d'eau.

9.13 Résultats pour le site de Saint-Félicien

9.13.1 Caractérisation du site

La localisation du tronçon de plage étudié dans le secteur de Saint-Félicien est illustrée à la figure 9.39. La zone modélisée est comprise entre les bornes inamovibles 21 et 53 pour une distance totale de 3 500 m. Ce secteur contient plusieurs structures dont un brise-lames et plusieurs épis construits entre les années 1990 et 1999. La zone modélisée contient 7 épis ainsi qu'un brise-lames concentrés dans le quart sud du tronçon étudié.

La figure 9.40 présente les roses des vagues pour le secteur de Saint-Félicien. Celles-ci ont été extraites vis-à-vis des bornes 26 et 47 à une distance approximative de 4 km de la ligne de côte afin de rencontrer des profondeurs de l'ordre de 5 m. Ces roses des vagues montrent que la direction dominante est du sud-est. Cette direction offre un fetch de 35 km, soit l'un des plus longs du lac. La bathymétrie peu profonde de cette zone permet de dissiper l'énergie des vagues lorsque celles-ci se rapprochent de la côte. Pour cette raison, le secteur de Saint-Félicien est soumis à peu de vagues supérieures à 1 m et ce, malgré son exposition à des vents dominants soufflant sur un fetch de 35 km.

9.13.2 Évolution du trait de côte à long terme - Transport longitudinal

Les figures 9.41 et C6 (présentée à l'annexe C) illustrent les résultats de modélisation de la simulation de référence (à partir de l'état 2014) et de la simulation sans aucun ouvrage (à partir de l'état 1986). Ces résultats montrent que la construction des épis entre les bornes 45 et 49 a permis d'éliminer le fort gradient de transport responsable de l'érosion dans ce secteur et de réduire le transport littoral vers la gauche (direction nord).

Deux zones problématiques ont été identifiées à l'aide des résultats de modélisation et du positionnement des rechargements granulaires au cours des 20 dernières années : la zone de la borne 31 et la zone de la borne 45.

La zone de la borne 31 est caractérisée par de nombreux rechargements entre les années 1988 et 2014. Une zone d'accumulation est également visible sur les photos aériennes en face de la borne 30. Ainsi, les sédiments érodés en face de la borne 31 sont emportés par le courant vers la gauche (nord) pour ensuite se déposer en face de la borne 30. Ces observations concordent également avec les résultats des simulations. L'érosion plus importante de la plage à cet endroit est causée par la forme légèrement saillante de la ligne de côte vis-à-vis de la borne 31.

La construction d'un champ d'épis près de la borne 31 pourrait s'avérer efficace pour déplacer l'érosion vers une zone où la largeur de la plage serait plus importante. Une attention particulière devrait cependant être portée au positionnement de ces épis afin de s'assurer de ne pas déplacer la problématique d'érosion.



Figure 9.39 : Secteur de Saint-Félicien

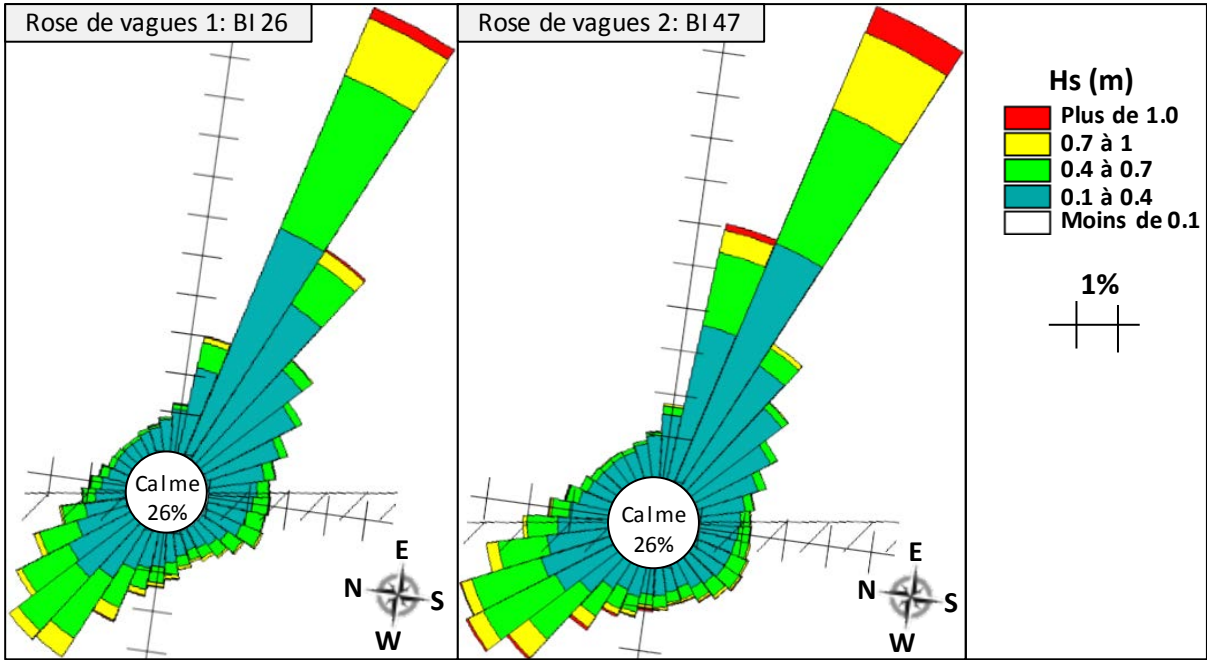


Figure 9.40: Roses des vagues pour Saint-Félicien

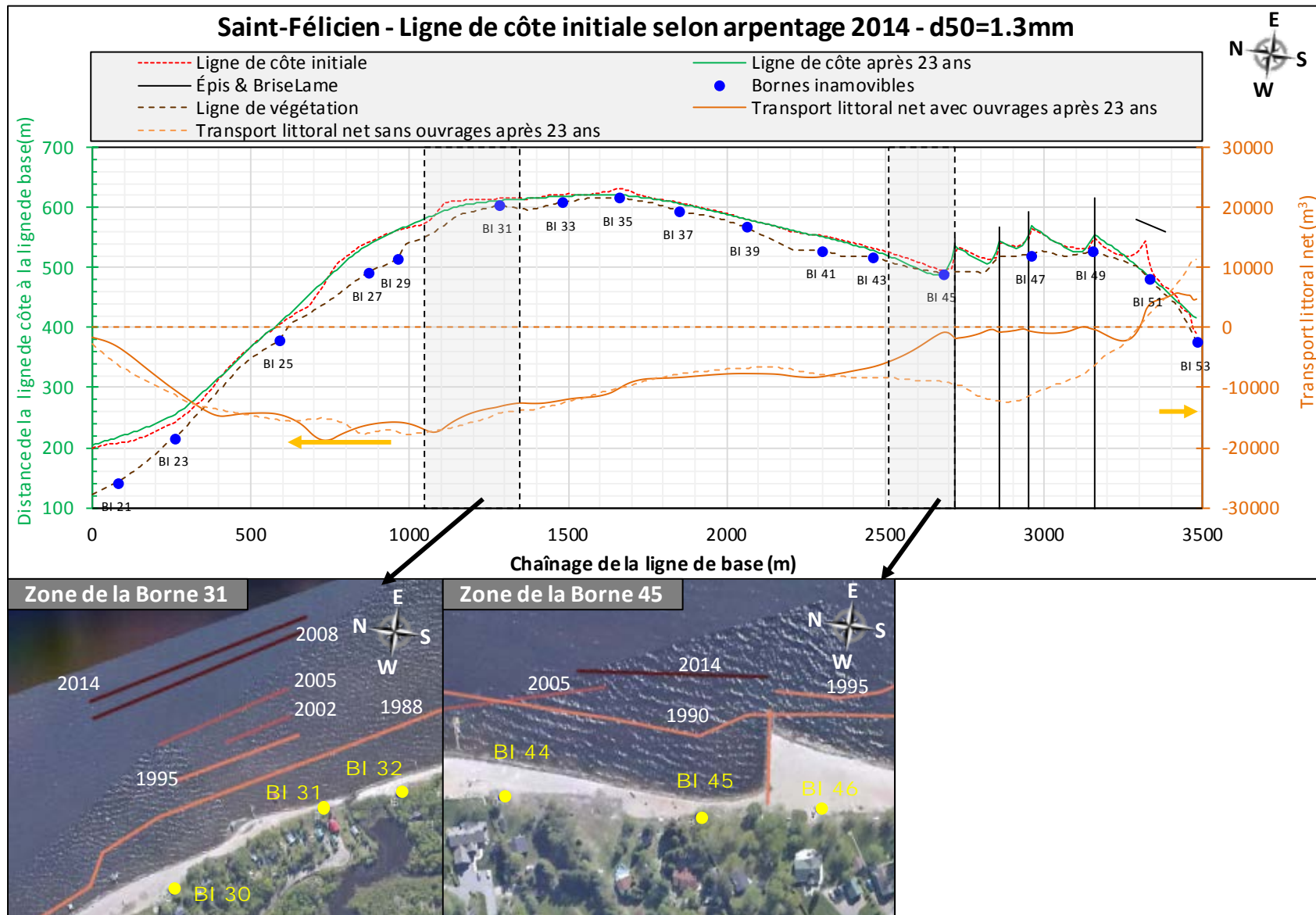


Figure 9.41: Résultats de simulations de l'évolution du trait de côte à long terme pour Saint-Félicien

Les résultats montrent que la zone de la borne 45 est caractérisée par une érosion marquée causée par l'interception de l'apport sédimentaire en provenance de la droite (sud) par le champ d'épis entre les bornes 45 et 49. Puisque la fréquence des rechargements est plutôt faible, il n'est pas recommandé de modifier l'allure de l'épi de la borne 45 ou même d'étendre le champ d'épis vers le nord. Puisqu'il n'y a pas de zone d'accrétion en aval de la borne 45, la construction d'épis supplémentaires ne ferait que déplacer le problème vers la gauche (nord) de la zone en question.

Lorsque les événements de vagues se produisent à niveau haut, le transport transversal contribue à éroder le haut de plage (voir section 9.13.3) et le transport longitudinal, qui a un gradient positif entre les bornes 30 et 45, contribue à entretenir en partie cette érosion, notamment au droit des bornes 45 et 31 où des rechargements ont eu lieu à plusieurs reprises. À long terme, le volume net de sédiments emporté par transport longitudinal caractérise l'érosion du site.

9.13.3 Transport transversal

Le tableau 9.13 présente la matrice de volume érodé par transport transversal lors d'événements de courte durée au site de Saint-Félicien.

Tableau 9.13: Secteur de Saint-Félicien – Matrice de volume érodé vers le large

Période de récurrence*	Volume érodé vers le large (m ³ /m)					
	Niveau d'eau en pieds					
	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	6.3	3.8	1.3	0.0	0.3	0.0
10	5.6	3.5	1.1	0.1	0.2	0.0
5	6.0	3.3	0.7	0.1	0.2	0.0
2	4.6	2.6	1.0	0.1	0.3	0.1
1	3.4	1.8	0.8	0.1	0.2	0.0

*Récurrence en années des événements de vagues de tempête basée sur l'énergie cumulée pendant 72 heures

Le site de Saint-Félicien est situé dans un secteur dont la bathymétrie est comparable au site de Dolbeau-Mistassini. La figure 9.7 illustrant les différents profils met en évidence les points communs, soit une pente raide sur une courte distance dans la partie supérieure du profil, suivie d'une pente très douce (de l'ordre de 0,5% et moins) sur une longue distance vers le large. Ainsi, la réponse aux tempêtes en termes de volume érodé est très similaire à ce qui est obtenu à Dolbeau-Mistassini (voir section 9.14). Par conséquent, l'indice d'érosion résultant atteint une valeur également faible, de 0,26, pour les conditions historiques de vagues et de niveaux d'eau.

Pour un événement de période de récurrence 15 ans et pour un niveau d'eau de 16,5 pieds, la ligne de côte à 16,5 pieds subit un recul de l'ordre de 5,5 m. Lorsque le niveau d'eau est à 15,5 pieds, le recul devient 3,5 m et la ligne à 16,5 pieds ne subit aucun recul. Le volume érodé est quant à lui pratiquement divisé par trois. Pour des niveaux d'eau inférieurs à 14 pieds, le recul est négligeable. En augmentant la

dissipation de l'énergie des vagues et la largeur de plage d'environ 5 m, l'abaissement du niveau d'eau d'un pied permet de réduire significativement l'érosion lors d'une tempête importante.

9.14 Résultats pour le site de Dolbeau-Mistassini

9.14.1 Caractérisation du site

La figure 9.42 présente une vue rapprochée du tronçon de plage étudié dans le secteur de Dolbeau-Mistassini. Le tronçon modélisé s'étend de la borne inamovible 25 (pointe Vauvert) jusqu'à 2 km à l'ouest de la borne 108, pour une longueur totale de 10 km. Aucune structure n'est présente dans cette zone. On note la présence d'embouchures de plusieurs ruisseaux le long du tronçon à l'étude, notamment à proximité des bornes 52, 69, 94 et 108, donnant lieu à des singularités dans la ligne de côte (surtout des zones d'accrétion).

La figure 9.43 illustre les roses des vagues aux deux extrémités de la zone modélisée à Dolbeau-Mistassini. Ces roses des vagues ont été extraites à une distance approximative de 3 500 m de la ligne de côte afin de rencontrer des profondeurs de l'ordre de 5 m.

À l'est du site, la direction sud-ouest apparaît dominante alors qu'à l'ouest du site, la direction sud-est domine. La bathymétrie peu profonde du secteur de Dolbeau-Mistassini lui donne une certaine protection naturelle contre les vagues puisque leur énergie subit une certaine dissipation à mesure qu'elles se rapprochent du site. Cela explique l'occurrence relativement faible des vagues supérieures à 1 m pour le secteur de Dolbeau-Mistassini et ce, malgré son exposition à des vents dominants soufflant sur un fetch de 40 km.

9.14.2 Évolution du trait de côte à long terme - Transport longitudinal

Les figures 9.44 et C7 (annexe C), qui présentent les résultats de la simulation de l'état de référence, indique la direction du transport sédimentaire en tout point du secteur d'intérêt qui s'étend sur près de 10 km.

Selon les résultats de la simulation de l'état actuel, il est possible d'identifier trois sites particulièrement en érosion à Dolbeau-Mistassini, soit les zones de la borne 100 (BI 99 à BI 108), 60 (BI 59 à BI 66) et 40 (BI 34 à BI 46). Ces trois sites sont caractérisés par un fort gradient positif du transport littoral, indicatif de conditions érosives importantes. L'ensemble des données disponibles présentées à la figure 9.44, soit les images satellites, la fréquence des rechargements et l'arpentage des plages, mettent également en évidence les tendances érosives des trois zones identifiées.

Les zones des bornes 100 et 40 sont caractérisées par un transport net unidirectionnel (vers l'ouest pour la borne 100 et vers l'est pour la borne 40) alors que la zone de la borne 60 est caractérisée par un transport divergent au niveau de la borne 62.



Figure 9.42: Secteur du Dolbeau-Mistassini

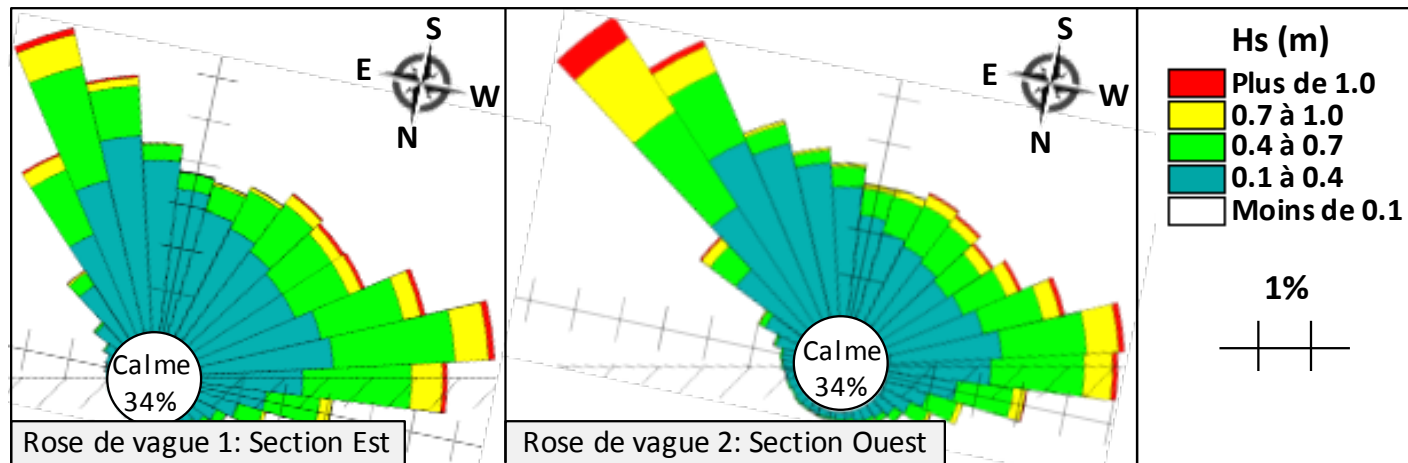


Figure 9.43: Roses des vagues pour Dolbeau-Mistassini

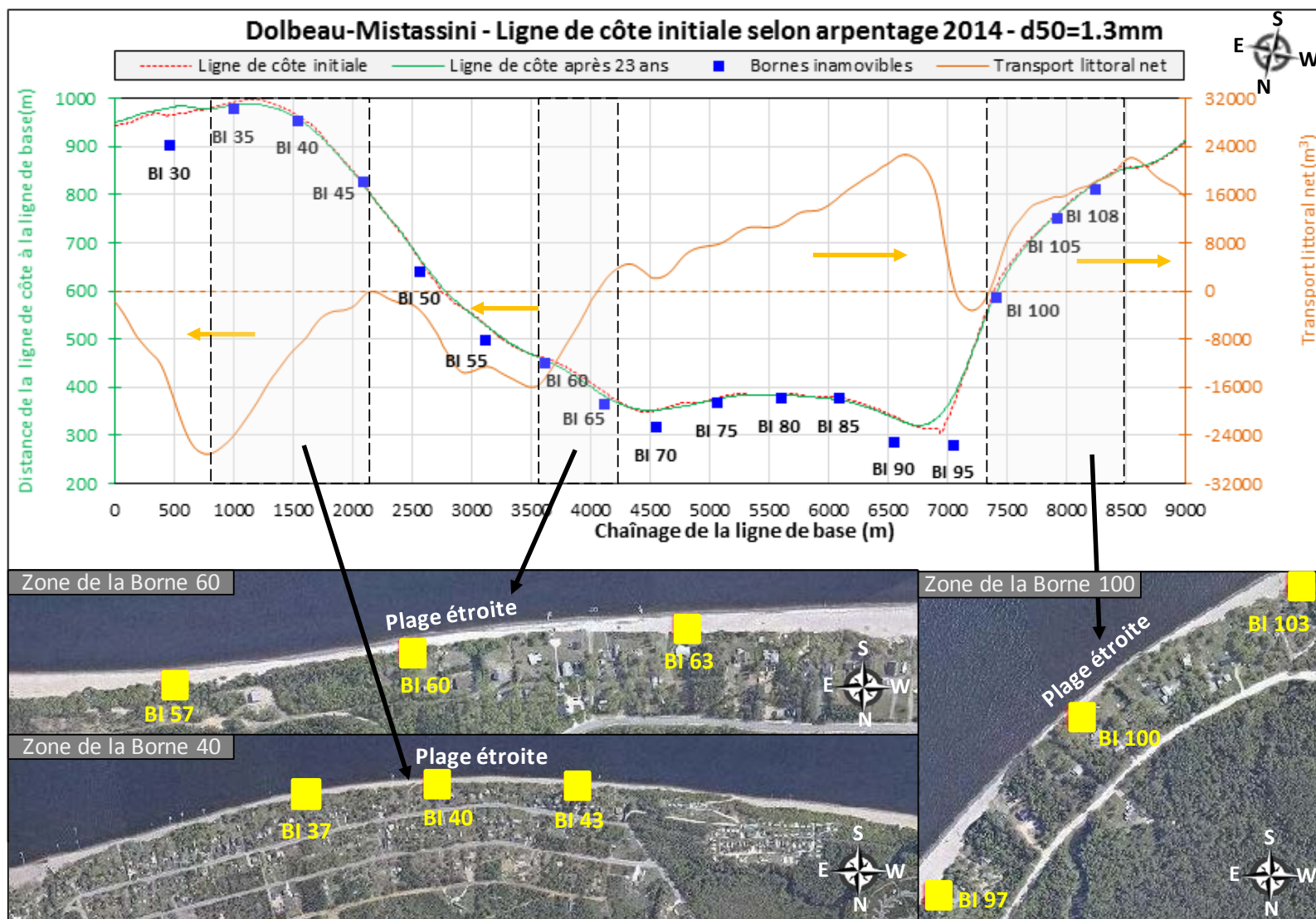


Figure 9.44: Résultats de simulations de l'évolution du trait de côte à long terme pour Dolbeau-Mistassini

Rappelons que l'érosion transversale peut accentuer le bilan érosif ponctuellement lors de tempêtes. Cet aspect relié aux variations saisonnières n'est pas pris en compte par le modèle d'évolution du trait de côte puisqu'on considère, de manière schématique, qu'à long terme, une partie des sédiments érodés vers le large est éventuellement reprise par les courants littoraux (transport longitudinal) et que l'autre partie demeure disponible pour les processus de reconstruction. Ainsi les résultats du modèle d'évolution du trait de côte sont représentatifs du bilan à long terme du secteur. La section 9.14.4 traite du transport transversal à court terme du secteur Dolbeau-Mistassini.

L'impact du transport longitudinal à long terme sur l'érosion au site de Dolbeau-Mistassini indique que les trois zones identifiées pourraient bénéficier d'interventions permettant de réduire l'érosion.

9.14.3 Analyse des variantes proposées

Des variantes d'aménagement ont été proposées par la firme WSP. Ces variantes d'aménagement ont été simulées à l'aide du modèle d'évolution du trait de côte à long terme (transport longitudinal).

Zone des bornes 100 et 40

Les problématiques identifiées dans les secteurs des bornes inamovibles 100 et 40 sont relativement analogues et peuvent trouver des mesures de mitigation similaires. Ces mesures se traduisent par la mise en œuvre de champs d'épis ayant pour objectif de réduire le transport littoral responsable de l'érosion. Pour chacun de ces deux secteurs, deux variantes de champs d'épis proposées par WSP ont été simulées. Une troisième variante, impliquant plutôt un rechargement de 100 t/m sur 600 m, a été comparée aux deux premières. Le tableau 9.14 présente brièvement les caractéristiques des variantes et résume les résultats obtenus en termes de volume érodé depuis la ligne de côte initiale.

Parmi les variantes d'épis proposées par WSP, celle présentant un plus grand nombre d'épis plus courts et davantage rapprochés (variante 2) offre une meilleure protection du trait de côte. Les épis, étant plus courts, permettent plus de transit, ce qui atténue l'ampleur des figures sédimentaires entre les épis (érosion et accrétion). La figure 9.45 illustre la position de la ligne de côte au terme des 23 ans de simulation pour les deux zones d'intérêt.

À l'extrémité ouest du secteur de la borne 100, les résultats indiquent une érosion marquée typique de l'aval d'un champ d'épis soumis à un transport important. En effet le secteur situé à l'aval du champ d'épis étant toujours soumis à un transport relativement important (voir figure 9.45), le gradient de transport devient alors plus marqué puisque l'apport de matériaux est en grande partie bloqué par les épis. Ces derniers conduisent donc à déplacer l'érosion vers une zone a priori moins problématique.

Actuellement, dans le secteur de la borne 40, la zone en aval (à l'est) des épis proposés est une zone d'accrétion présentant un transport relativement faible (vers la borne 30). Ainsi, la présence des épis conduit à une érosion moins marquée que dans le secteur de la borne 100. Cela explique en partie la réduction plus importante du volume érodé dans la zone de la borne 40 par rapport à celle de la borne 100.

Tableau 9.14: Comparaison des variantes d'aménagements pour les zones des bornes 100 et 40

Zone de la borne 100							
	Rechargement total (m ³)	Longueur cumulée des épis (m)	Longueur cumulée des brise-lames (m)	Nombre d'épis	Nombre de brise-lames	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m ³)	Écart par rapport à la référence
Référence	-	-	-	-	-	26 000	-
Variante 1	33 000	620	0	7	0	27 000	+4%
Variante 2	37 000	570	0	10	0	21 000	-19%
Variante 3	38 000	0	0	0	0	6 000	-77%
Zone de la borne 40							
	Rechargement total (m ³)	Longueur cumulée des épis (m)	Longueur cumulée des brise-lames (m)	Nombre d'épis	Nombre de brise-lames	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m ³)	Écart par rapport à la référence
Référence	-	-	-	-	-	28 000	-
Variante 1	35 000	620	0	7	0	17 000	-39%
Variante 2	44 000	570	0	10	0	15 000	-46%
Variante 3	38 000	0	0	0	0	6 000	-79%

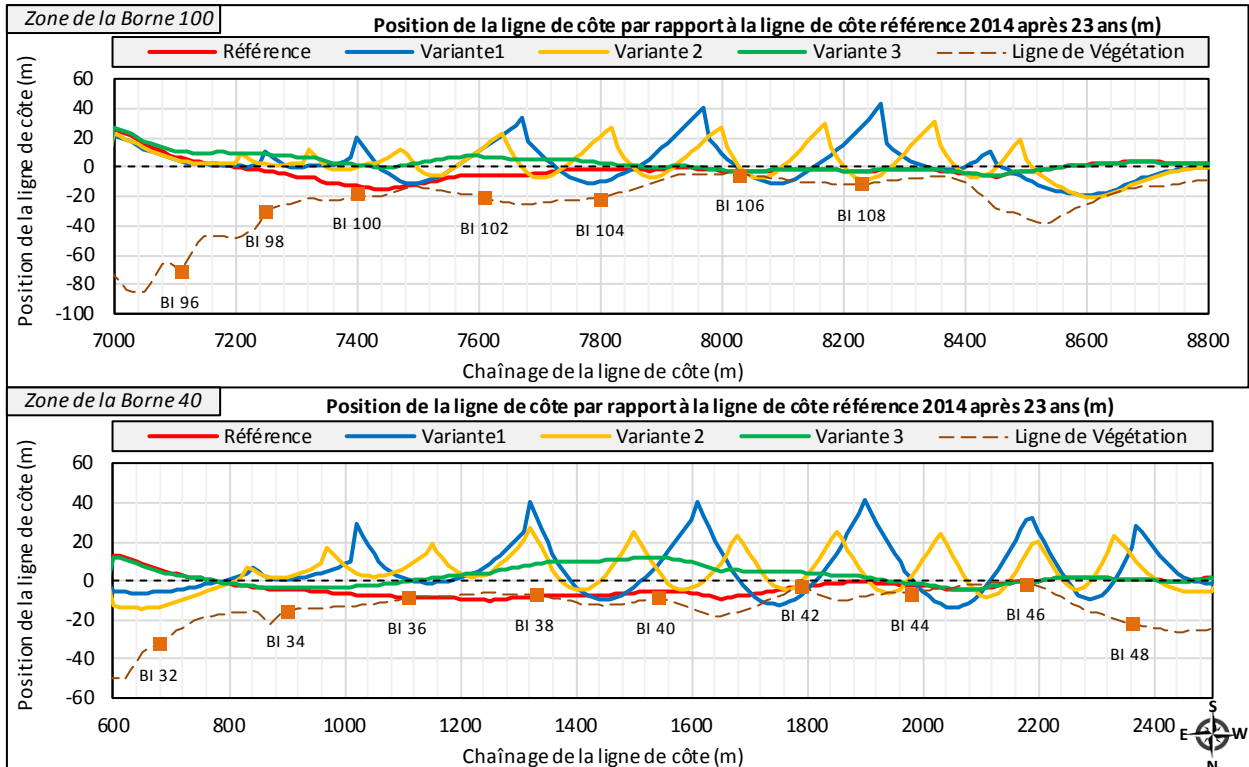


Figure 9.45: Efficacité des interventions proposées - Zones des bornes 100 et 40 de Dolbeau-Mistassini

Les résultats obtenus avec la variante de rechargement sans épis (variante 3) montrent que la ligne de côte peut être relativement bien protégée dans la zone en érosion au terme de la période de référence de 23 ans. Contrairement aux champs d'épis, le régime de transport longitudinal n'est pratiquement pas influencé par le rechargement et il n'y a ainsi pas de zone d'érosion importante à l'une ou l'autre des extrémités de la zone d'intérêt. Toutefois, le rechargement simulé a été étalé sur 600 m centré autour du point le plus problématique de chacune des deux zones (soit vis-à-vis de la borne 101 dans un cas et vis-à-vis de la borne 38 dans l'autre), ce qui ne permet pas de protéger adéquatement les zones adjacentes de plage étroite, comme par exemple aux abords des bornes 106 ou 44 à 46. À volume égal, il pourrait être judicieux d'étaler le rechargement sur une plus grande distance. Soulignons finalement que ce type de variante offre un profil longitudinal de plage plus uniforme que les variantes présentant des épis.

Zone de la borne 60

La zone de la borne 60 est caractérisée par un transport longitudinal divergent conduisant à une érosion notable. Dans ce cas, des variantes de rechargement impliquant différents volumes et différentes répartitions ont été simulées. Le tableau 9.15 présente brièvement ces variantes et résume les résultats des simulations.

Tableau 9.15: Variantes d'aménagements pour la zone de la borne 60 de Dolbeau-Mistassini

	Rechargement total	Longueur cumulée des épis (m)	Longueur cumulée des brise-lames (m)	Nombre d'épis	Nombre de brise-lames	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m ³)	Écart par rapport à la référence
Référence	-	-	-	-	-	20 000	-
Variante 1	16 000 m ³ Sur 500 m	0	0	0	0	4 000	-80%
Variante 2	32 000 m ³ Sur 1000 m	0	0	0	0	≈0	-100%
Variante 3	16 000 m ³ Sur 250 m	0	0	0	0	5 000	-75%

Le tableau 9.15 montre que la variante 2 offre une protection supérieure de la plage. Cependant, son volume total de rechargement est le double des deux autres variantes. Ainsi, il devient intéressant d'effectuer une comparaison plus approfondie des variantes 1 et 3 puisque ces variantes possèdent le même volume de matériaux, mais étalé différemment.

Le graphique 1 de la figure 9.46 montre que le rechargement concentré sur la borne 62 (variante 3) offre une protection supérieure de la plage vis-à-vis de cette borne. En revanche, le taux de recul de la plage pour la variante 3 est non-linéaire, contrairement aux deux autres variantes : recul plus rapide en début de période pour se rapprocher du taux de recul de la variante 1 en fin de période. À long terme, il est donc plus judicieux d'étaler le rechargement sur une plus longue distance (variante 1). De plus, les résultats présentés au tableau 9.15 indiquent que la variante 1 conduit à de plus faibles volumes d'érosion. Cette érosion est principalement localisée aux extrémités du rechargement.

Les résultats des simulations montrent que les trois variantes offrent une protection de la plage pour une durée supérieure à 15 ans dans le cas d’une érosion longitudinale. Un rechargement étalé sur une plus longue distance offre un meilleur rendement dans le cas de la zone de la borne 60.

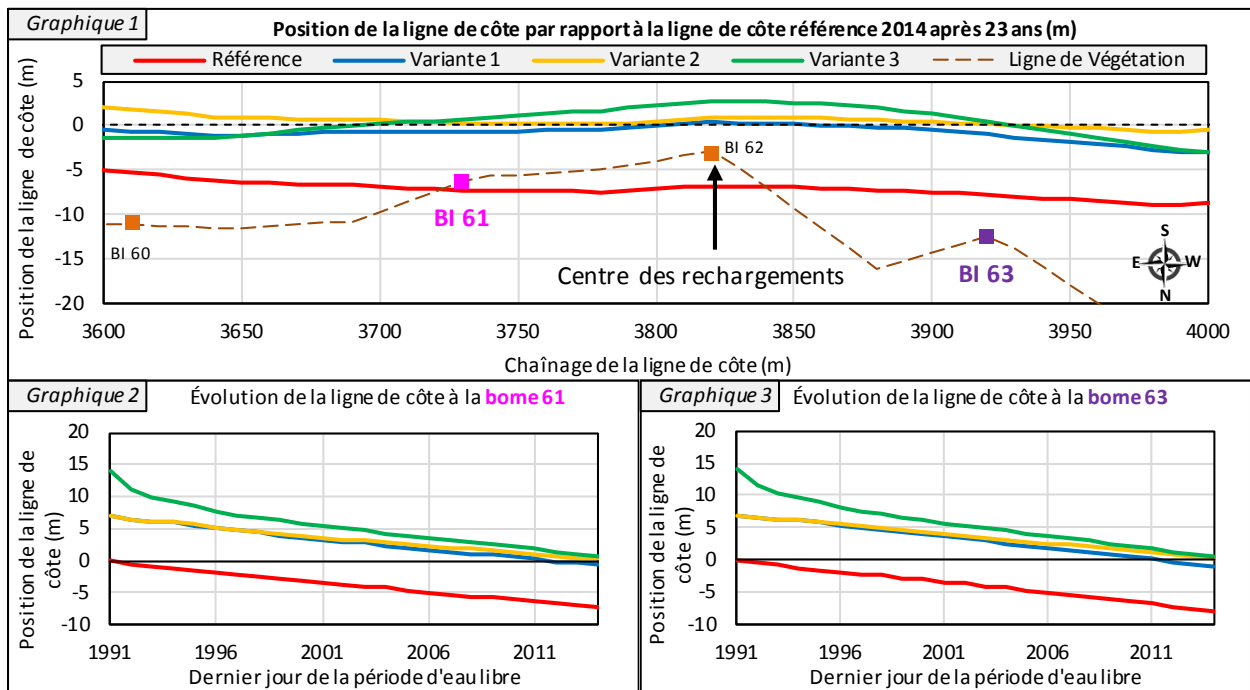


Figure 9.46: Évolution de la position du trait de côte des rechargements à la zone de la borne 60

9.14.4 Transport transversal

Le tableau 9.16 présente la matrice de volume érodé par transport transversal lors d’événements de courte durée au site de Dolbeau-Mistassini.

Les résultats du tableau 9.16 montrent que l’érosion due au transport transversal devient significative au site de Dolbeau-Mistassini pour des niveaux d’eau supérieurs à 14 pieds (100,78 m). Cela peut effectivement s’expliquer par la configuration du profil typique du secteur qui est caractérisée par une pente relativement raide, de 6,5% en moyenne entre les élévations 101,55 m et 100,5 m, mais qui s’adoucit ensuite rapidement pour atteindre une moyenne de 0,5% jusqu’à une élévation de 98,3 m. La pente s’adoucit davantage en deçà de cette élévation (voir figure 9.7, section 9.3.1). Ainsi, les pentes sont telles que pour des niveaux d’eau inférieurs à 14 pieds, le transport n’est pas significatif, comme en attestent les valeurs portées au tableau 9.16.

Pour un évènement de période de récurrence 15 ans et pour un niveau d’eau de 16,5 pieds, la ligne de côte à 16,5 pi subit un recul de l’ordre de 4 m. Lorsque le niveau d’eau est à 15,5 pieds, le recul diminue à environ 2,5 m et la ligne de niveau à 16,5 pieds ne subit qu’un faible recul, de moins d’un mètre typiquement. Le volume érodé est quant à lui pratiquement divisé par deux. Pour des niveaux d’eau inférieurs à 14 pieds, le recul est négligeable.

Ainsi un niveau d'eau abaissé d'un pied permet de combiner les effets positifs d'une augmentation de la dissipation de l'énergie des vagues et d'une largeur de plage supplémentaire d'environ 5 m, contribuant à une réduction significative de l'érosion lors d'une importante tempête.

À Dolbeau-Mistassini, l'indice d'érosion est l'un des plus faibles des sites étudiés (le tableau 10.4 au chapitre 10 présente un comparatif des indices d'érosion pour les conditions historiques de vagues et de niveaux d'eau) et traduit une configuration en pente douce combinée à des vagues de tempête moins fréquentes que dans la partie est du lac. Avec une valeur de 0,26, cet indice d'érosion est environ 4 fois inférieur à la valeur obtenue à Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, 2,5 fois inférieur à la valeur obtenue à Saint-Henri-de-Taillon Nord 1 et environ 3,5 fois inférieur à celle obtenue à Saint-Henri-de-Taillon Nord 2.

Tableau 9.16: Secteur de Dolbeau-Mistassini – Matrice de volume érodé vers le large

Période de récurrence*	Volume érodé vers le large (m ³ /m)					
	Niveau d'eau en pieds					
	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	6.3	4.1	2.2	0.4	0.0	0.0
10	5.7	3.5	1.9	0.4	0.0	0.0
5	6.3	3.6	2.0	0.3	0.1	0.0
2	5.3	3.5	2.0	0.5	0.1	0.0
1	4.6	3.3	1.9	0.4	0.0	0.0

*Récurrence en années des événements de vagues de tempête basée sur l'énergie cumulée pendant 72 heures

9.15 Résultats pour le site de Saint-Henri-de-Taillon Nord

9.15.1 Caractérisation du site

La figure 9.47 illustre l'ensemble du site de Saint-Henri-de-Taillon Nord qui s'étend de la borne inamovible 27 jusqu'à 600 m au nord-ouest de la borne 1. Le site est caractérisé par une bathymétrie complexe qui tend à dépasser les hypothèses de quasi-uniformité des modèles utilisés (figure 9.48). Pour cette raison, il a été décidé de séparer le site en deux sous-secteurs indépendants séparés par une pointe rocheuse : Saint-Henri-de-Taillon Nord 1 et Saint-Henri-de-Taillon Nord 2. Les longueurs de ces sous-secteurs sont respectivement de 2 400 m et 1 400 m.

La figure 9.48 présente les roses des vagues du secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord. Ces roses des vagues ont été extraites vis-à-vis des bornes 21, 15 et 1 à des distances de 1 200 m, 1 600 m et 1 700 m respectivement.

Les vagues dominantes à Saint-Henri-de-Taillon Nord sont en provenance de la direction sud-ouest. Même si le secteur n'est pas soumis aux vents dominants, le secteur est tout de même victime d'une occurrence relativement élevée de vagues supérieures à 1 m en raison de la bathymétrie profonde de la zone.

Dans le modèle, la présence d'avancées rocheuses a dû être schématisée par des épis puisque ceux-ci bloquent l'apport sédimentaire en provenance du sud-est. De même, les rochers au large de Saint-Henri-de-Taillon Nord 2 ont été représentés par des brise-lames. Cette schématisation est illustrée à la figure 9.49.



Figure 9.47 : Secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord

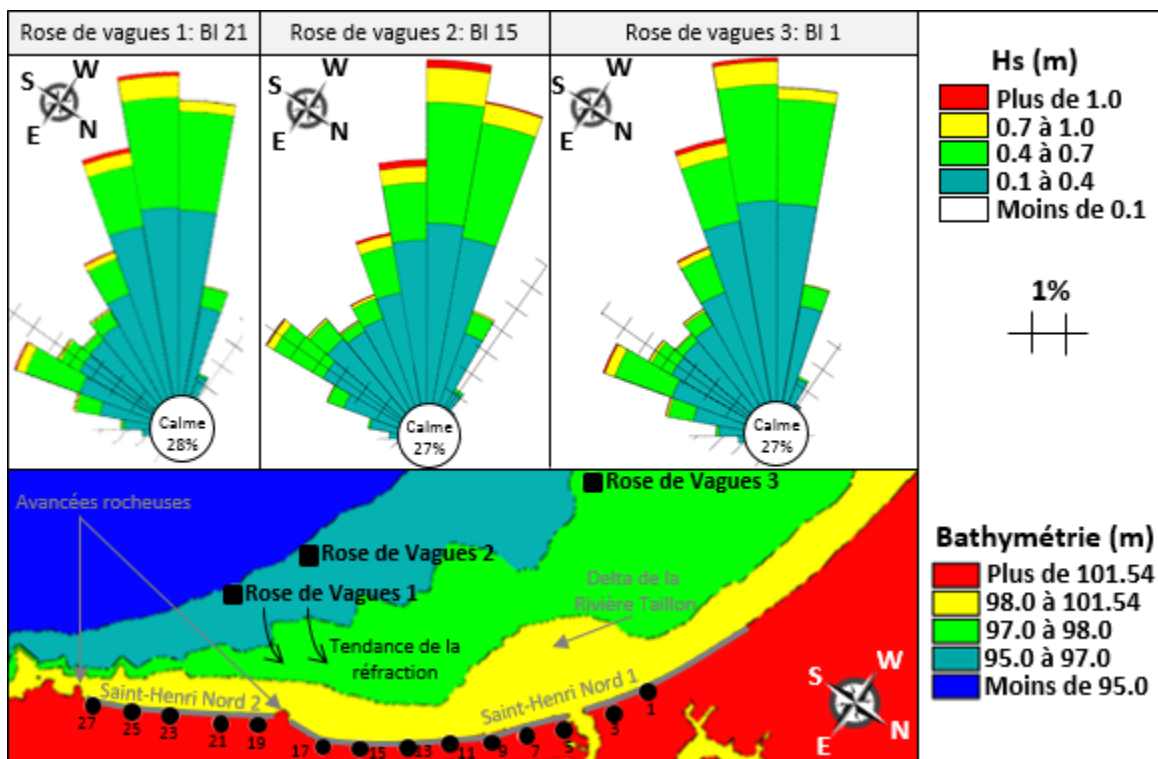


Figure 9.48: Roses des vagues pour Saint-Henri-de-Taillon Nord

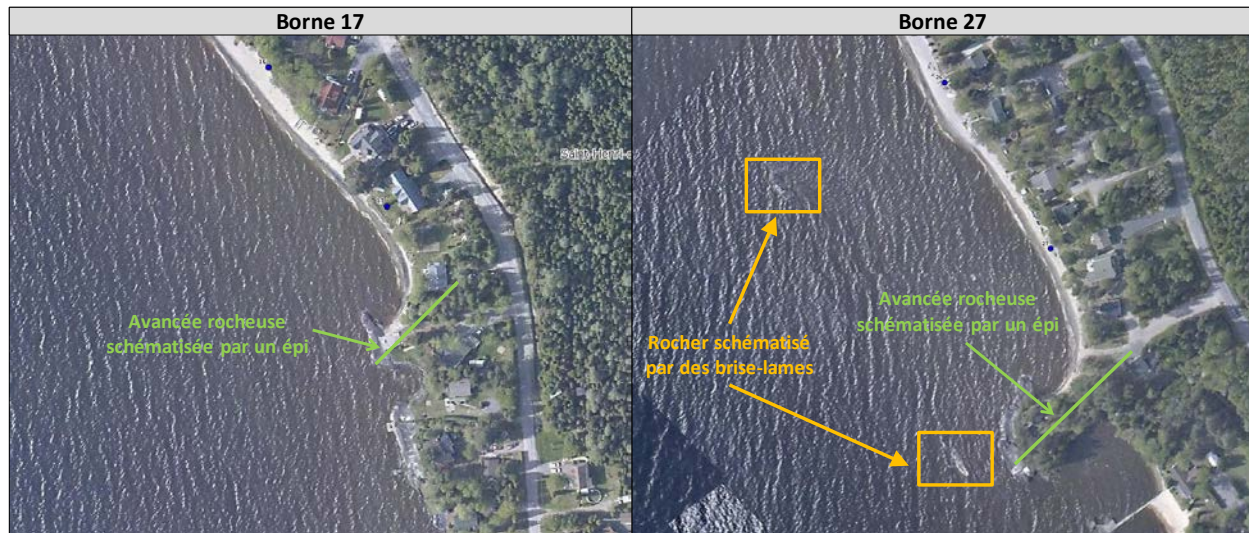


Figure 9.49: Schématisation du site de Saint-Henri-de-Taillon Nord 2 aux bornes 17 et 27

9.15.2 Évolution du trait de côte à long terme - Transport longitudinal

Les résultats des simulations présentés à la figure 9.50 indiquent que la direction dominante du transport sédimentaire est vers le nord-ouest pour l'ensemble du secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord 2. Ces résultats mettent en évidence la problématique d'érosion dans la zone de la borne 26 (BI 23 à BI 27), où les reculs de plage récurrents contraignent Rio Tinto Alcan à procéder à des rechargements fréquents.

Bien que le processus de transport longitudinal apparaisse à long terme comme représentatif de l'érosion dans la zone de la borne 26, il faut également souligner que le transport transversal vient augmenter le bilan érosif lors des tempêtes, tel qu'observé en novembre 2013. Ces épisodes d'érosion ponctuels ne sont toutefois pas modélisés à long terme (voir principes et hypothèses, section 9.16).

Sur la moitié nord-ouest du secteur Saint-Henri-de-Taillon Nord 2 (entre les bornes 21 et 19), les résultats du modèle indiquent une certaine stabilité de la position de la ligne de côte, et même une accrétion vers la borne 19. Les photos satellites et l'arpentage des plages montrent également une accrétion au nord-ouest de la borne 19. Les sédiments responsables de cette accrétion proviennent fort probablement de la zone de la borne 26, compte tenu de la direction dominante du transport sédimentaire.

Les résultats des simulations du secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord 1 indiquent que le transport sédimentaire a tendance à converger vers l'embouchure de la rivière Taillon, située entre les bornes 3 et 5. La section de la plage entre les bornes 1 et 11 a tendance à sédimenter, alors qu'au sud-est de la borne 11, la plage est plutôt en érosion. Les résultats du modèle démontrent une érosion marquée dans la zone de la borne 15. Malgré les nombreux rechargements, la position de la ligne de côte a tout de même tendance à reculer au cours du temps. Les sédiments érodés de cette zone s'accumulent par la suite au nord-ouest de la borne 11, dans la zone de l'embouchure de la rivière Taillon.

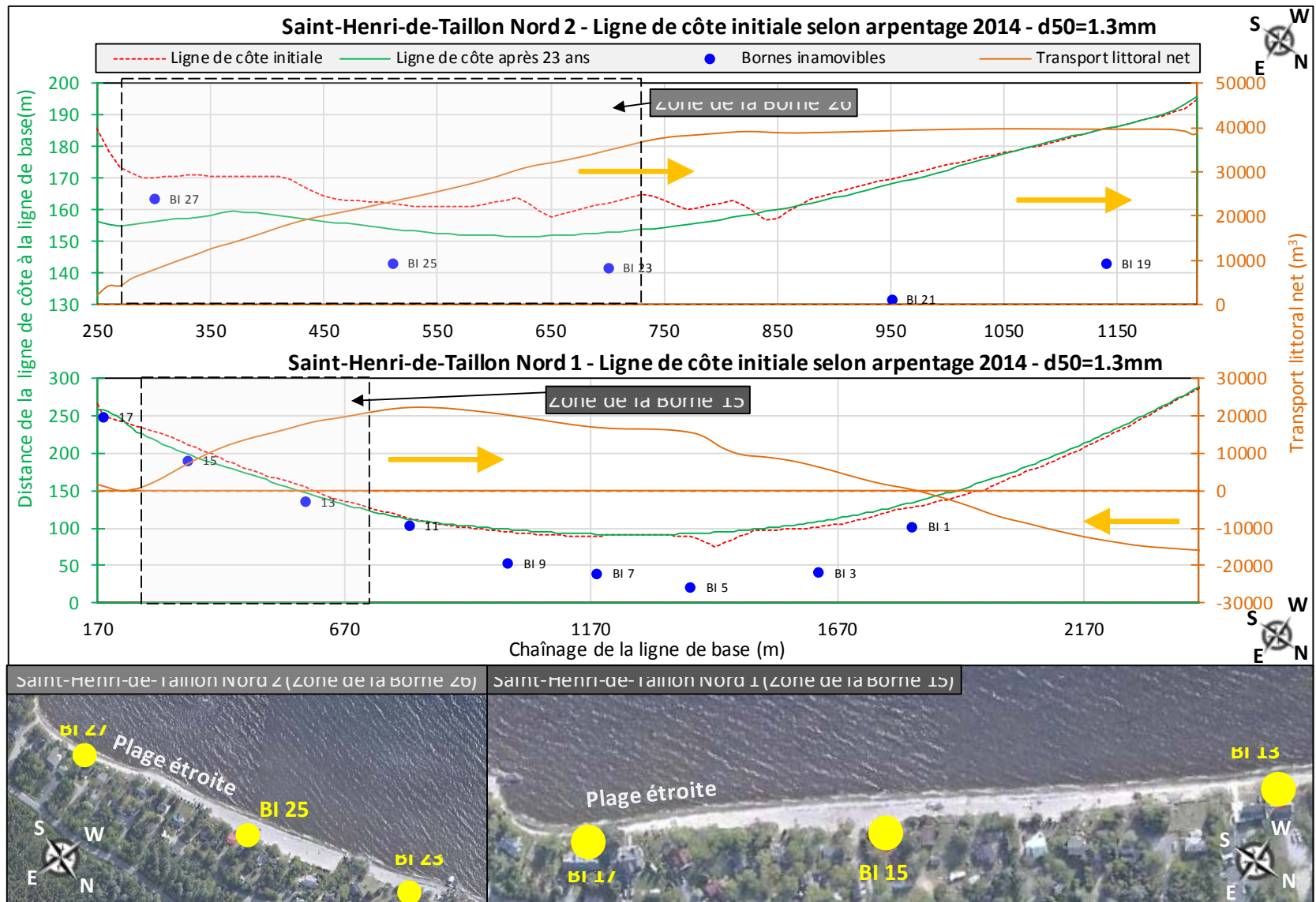


Figure 9.50: Résultats de simulations de l'évolution du trait de côte à long terme pour Saint-Henri-de-Taillon Nord

Bien que les tendances obtenues avec ce modèle se comparent bien à celles extraites des données d’arpentage des plages, le degré de schématisation et les hypothèses intrinsèques au modèle conduisent à une limitation de la représentativité des phénomènes aux abords immédiats des bornes 17 et 27, soit aux pieds des avancées rocheuses. De plus, l’exutoire de la rivière Taillon, localisé au centre du secteur Saint-Henri-de-Taillon Nord 1, provoque la formation d’une zone d’accumulation qui ne peut être modélisée en détails du fait des hypothèses relatives à la définition de la bathymétrie.

La section suivante présente des variantes d’aménagement proposées par la firme WSP afin de limiter la perte de sédiments par dérive littorale vers le nord-ouest dans les deux secteurs de Saint-Henri-de-Taillon Nord.

9.15.3 Analyse des variantes proposées

Zone de la borne 15

Les interventions potentielles dans la zone de la borne 15 se traduisent par l’aménagement de champs d’épis. Deux variantes de ce type ont été proposées par la firme WSP. Le tableau 9.17 présente brièvement les caractéristiques des variantes et résume les résultats obtenus en termes de volume érodé. La figure 9.51 présente les résultats sous forme graphique.

Tableau 9.17: Comparaison des variantes pour la zone de la borne 15

	Rechargement total (m³)	Longueur cumulée des épis (m)	Longueur cumulée des brise-lames (m)	Nombre d'épis	Nombre de brise-lames	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m³)	Écart par rapport à la référence
Référence	-	-	-	-	-	23 000	-
Variante 1	30 000	240	0	3	0	13 000	-43%
Variante 2	30 000	180	75	2	1	13 000	-43%

Les résultats indiquent que l’érosion dans la zone de la borne 15 peut être contrôlée efficacement à l’aide des variantes présentant des épis. Le transport sédimentaire vers la droite (nord-ouest) du site de Saint-Henri-de-Taillon Nord 1 est fortement réduit ce qui, en contrepartie, conduit à une érosion entre les bornes 10 et 5. La largeur de la plage importante à cet endroit laisse toutefois une marge confortable à long terme.

Il est important de noter que les volumes de rechargement proposés aux variantes 1 et 2 sont requis lors de la mise en place des épis. Les matériaux sont disposés entre les épis, soit dans l’actuelle zone en érosion. Dans le cas des variantes 1 et 2, les volumes érodés obtenus par simulations se situent à l’ouest du champ d’épis et résultent du recul de la ligne de côte initiale, qui est protégée par le champ d’épis dans le secteur est (figure 9.51).

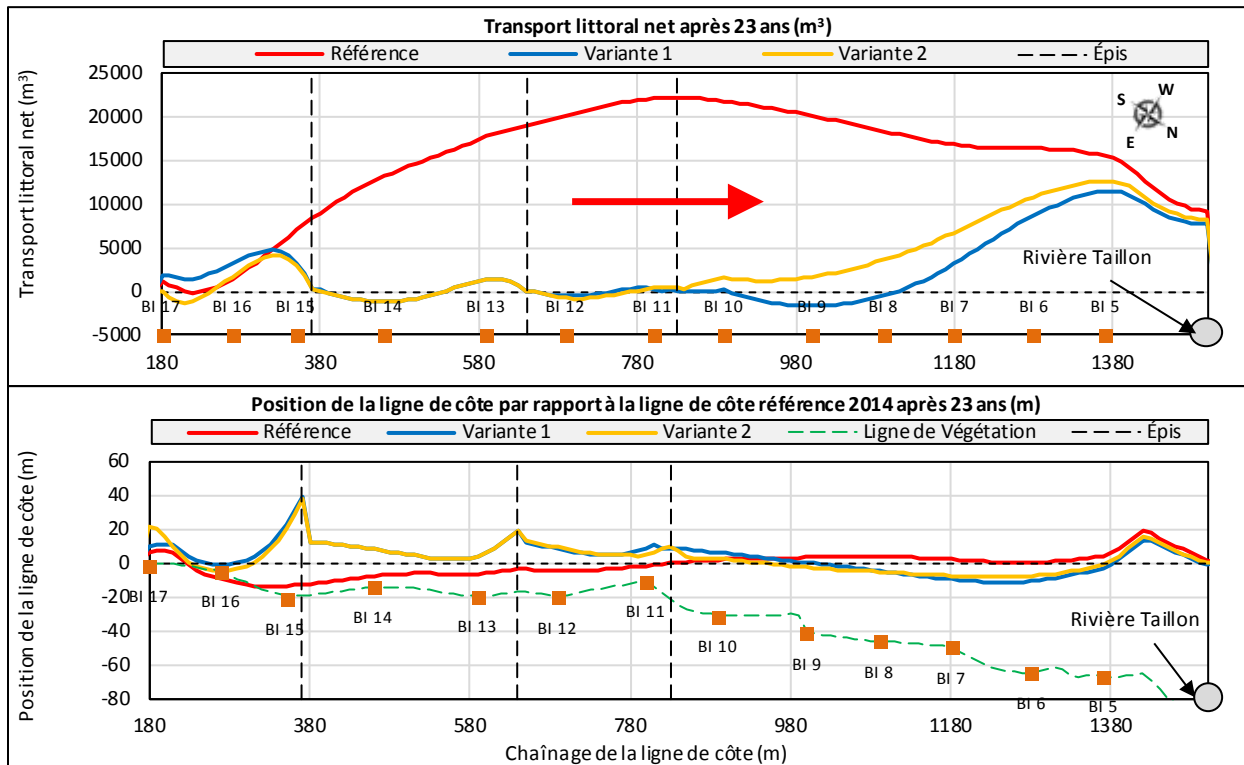


Figure 9.51: Efficacité des variantes dans la zone de la borne 15 de Saint-Henri-de-Taillon Nord

Zone de la borne 26

Les interventions proposées dans la zone de la borne 26 consistent en un champ d'épis (variante 1) et une série de brise-lames (variante 2). Le tableau 9.18 présente brièvement les caractéristiques des variantes ainsi que les résultats obtenus suite aux simulations. Ces derniers sont également illustrés à la figure 9.52.

Tableau 9.18: Comparaison des aménagements entre les variantes pour la zone de la borne 26

	Rechargement total (m³)	Longueur cumulée des épis (m)	Longueur cumulée des brise-lames (m)	Nombre d'épis	Nombre de brise-lames	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m³)	Écart par rapport à la référence
Référence	-	-	-	-	-	40 000	-
Variante 1	19 000	180	0	2	0	33 000	-18%
Variante 2	19 000	0	150	0	2	26 000	-35%

Bien que les résultats indiquent une réduction plus marquée du volume érodé au-delà de la ligne de côte initiale, la série de brise-lames (variante 2) semble moins efficace pour protéger la plage en face de la borne 27 car une partie du volume érodé comptabilisé se situe dans la zone initialement en érosion devant être protégée.

En revanche, la variante 1 (champ d'épis) conduit à un patron d'érosion/accrétion analogue à ce qui a été obtenu dans le secteur de la borne 15. La zone en érosion identifiée au sud-est de la borne 23 est largement réduite. Le secteur nord-ouest, offrant des largeurs de plage plus importantes, subit quant à lui une érosion. Les résultats indiquent toutefois qu'au terme de 23 ans, il est possible de maintenir des largeurs de plages acceptables. La variante 1 semble donc être préférable.

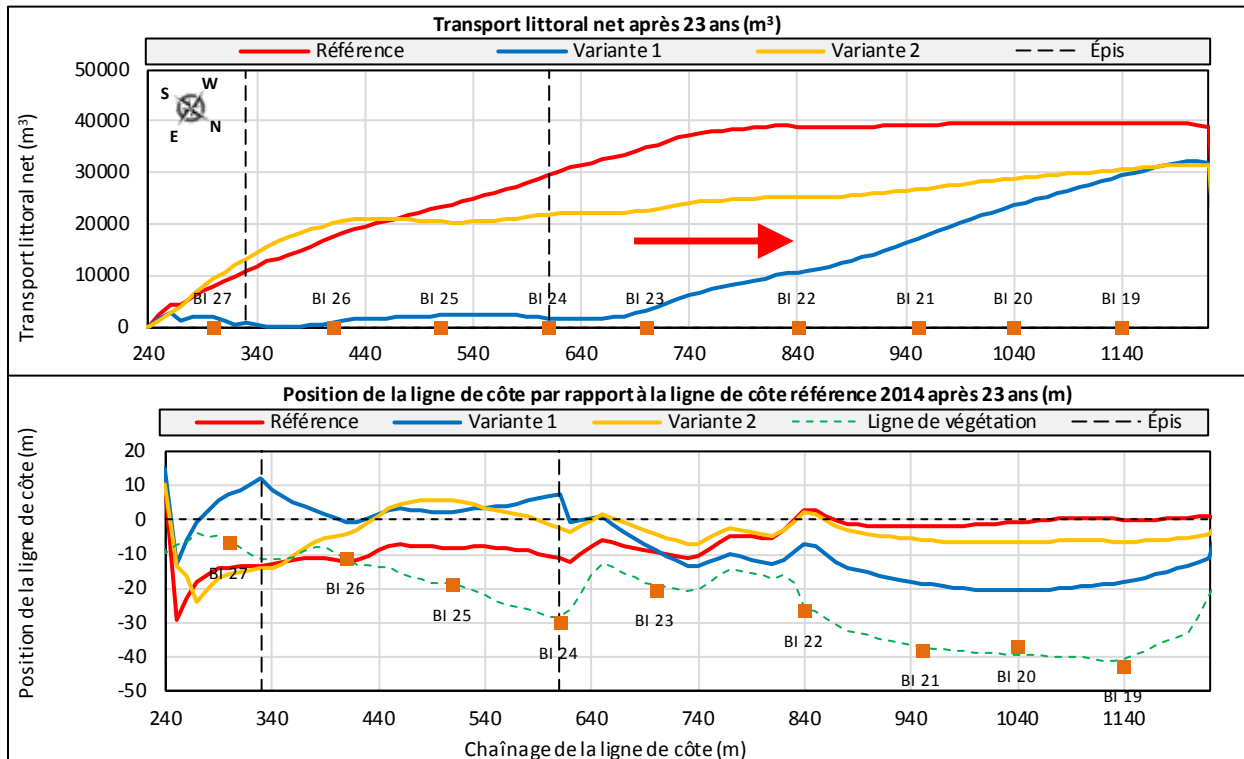


Figure 9.52: Efficacité des variantes dans la zone de la borne 26 de Saint-Henri-de-Taillon Nord

9.15.4 Transport transversal

Les tableaux 9.19 et 9.20 présentent les matrices de volumes érodés par transport transversal obtenues pour les secteurs de Saint-Henri-de-Taillon Nord 1 et Saint-Henri-de-Taillon Nord 2 respectivement.

Pour le secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord 1, les résultats indiquent que les volumes d'érosion tendent à décroître avec le niveau d'eau. Le volume d'érosion passe toutefois par un minimum lorsque le niveau d'eau est aux alentours de 12 pieds (100,17 m). En effet le profil typique (figure 9.7) présente une pente relativement raide, de 8% en moyenne entre 101,5 m et 100,5 m, propice à l'érosion lors de tempêtes. Celle-ci est suivie d'un plateau de pente inférieure à 1%, entre 100 m et 99 m, zone dans laquelle l'impact des tempêtes est moins prononcé, ce qui se traduit par une érosion limitée. En deçà du niveau de 99,0 m, la pente du profil augmente pour atteindre près de 4%, ce qui explique que les volumes d'érosion augmentent à nouveau à niveau très bas.

À l'aide des séries chronologiques de vagues et de niveaux d'eau ainsi que du tableau 9.19, l'indice d'érosion a été calculé pour les conditions historiques, donnant une valeur de 0,67. Cette valeur est de

l'ordre de 2,5 fois celle obtenue au secteur de Dolbeau-Mistassini, et environ les deux-tiers de celle obtenue à Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, ce qui traduit une exposition modérée du secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord 1 à l'érosion transversale.

Tableau 9.19: Secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord 1 – Matrice de volume érodé vers le large

Période de récurrence*	Volume érodé vers le large (m ³ /m)					
	Niveau d'eau en pieds					
	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	7.1	4.8	3.8	2.4	0.2	1.7
10	6.1	4.5	3.1	2.0	0.1	1.5
5	6.5	5.0	3.7	1.9	0.3	1.4
2	5.8	4.7	2.9	1.5	0.1	1.5
1	4.4	3.7	2.8	1.5	0.1	1.1

*Récurrence en années des événements de vagues de tempête basée sur l'énergie cumulée pendant 72 heures

En ce qui concerne le secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord 2, le profil utilisé présente une pente qui est dans l'ensemble plus raide que celle du secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord 1, et qui conduit à des volumes d'érosion plus importants. En effet, tel qu'illustré à la figure 9.7, le profil est caractérisé par une pente moyenne de près de 10% entre les élévations 101,5 m et 100,5 m, suivi d'un court plateau puis d'une pente relativement raide d'environ 5% entre les élévations 100,3 m et 98,7 m. La pente est à nouveau interrompue par un plateau, voire une petite barre sableuse, pour augmenter à nouveau à environ 5% jusqu'à l'élévation 97,8 m. Ensuite, la pente diminue progressivement jusqu'à 0,2% à l'élévation 96,4 m.

Tableau 9.20: Secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord 2 – Matrice de volume érodé vers le large

Période de récurrence*	Volume érodé vers le large (m ³ /m)					
	Niveau d'eau en pieds					
	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	7.0	5.2	6.0	8.3	7.1	6.2
10	6.0	5.5	3.6	6.6	7.0	5.0
5	8.0	5.8	3.4	4.1	6.8	3.0
2	6.4	4.8	2.6	5.0	6.1	3.6
1	5.2	3.9	2.5	3.1	5.3	1.9

*Récurrence en années des événements de vagues de tempête basée sur l'énergie cumulée pendant 72 heures

La morphologie du profil de ce secteur apparaît alors plus propice à l'érosion en période de tempête, tel qu'indiqué au tableau 9.20, par rapport au secteur plus au nord. En effet, les volumes d'érosion calculés sont généralement plus élevés que pour le secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord 1, notamment pour les

niveaux d'eau inférieurs à 15,5 pieds. De plus les résultats ne montrent pas de tendance claire en fonction du niveau d'eau considéré, ce qui indique que le fait d'abaisser le niveau d'eau a peu d'effet sur les volumes d'érosion. Une telle conclusion était également atteinte pour le site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix (section 9.9.4).

L'indice d'érosion annuel s'élève à 0,88 à Saint-Henri-de-Taillon Nord 2, soit une valeur environ 30% plus élevée que dans le cas du secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord 1. Cette valeur est environ 15% inférieure à celle obtenue pour le secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, ce qui indique que ce site est relativement exposé à l'érosion transversale induite par les tempêtes.

9.16 Synthèse sur l'interprétation conceptuelle des résultats

9.16.1 Interprétation des résultats

Tel qu'abordé à la section 9.1, qui introduit les principes et hypothèses de modélisation, il est important de rappeler sous quel angle les résultats présentés ici doivent être interprétés. Les mécanismes de transport sédimentaire conduisant à l'érosion des plages sont complexes et agissent selon des échelles de temps différentes. Ainsi, certaines hypothèses inhérentes à ces échelles de temps conditionnent le choix des modèles et l'interprétation des résultats de modèles utilisés, en particulier par rapport à certaines données de terrain comme les volumes de rechargement.

Rappelons ici que le mécanisme simulé par le module d'évolution du trait de côte combine globalement le transport vers le large et le transport longitudinal, et donne alors la tendance à long terme en considérant un profil à l'équilibre constant, c'est-à-dire en faisant l'hypothèse d'un profil dont les variations saisonnières se compensent.

L'exemple suivant permet d'illustrer ces propos : une vague de direction parfaitement perpendiculaire à un tronçon de côte conduira à un transport longitudinal nul mais à un transport érosif transversal important, mais de manière ponctuelle. Toutefois, le modèle d'évolution du trait de côte ne calculera aucun transport ni mouvement de la ligne de côte puisque l'hypothèse de base considère que les sédiments érodés transversalement restent disponibles pour les processus de reconstruction par temps plus calmes et donc à long terme l'érosion résultante est théoriquement nulle. En revanche lorsqu'un gradient positif de transport longitudinal se développe le long du tronçon, le débit de sédiments entraînés hors du tronçon est plus important que le débit entrant et il se crée alors un déficit de sédiments dont le volume restant ne peut plus compenser celui qui a été érodé de la plage vers le large. Cela se traduit par une érosion et l'ensemble du profil recule. À long terme les résultats obtenus avec le modèle d'évolution du trait de côte reflète donc l'ensemble des mécanismes érosifs.

La comparaison des valeurs de volumes obtenues à long terme par simulation (module d'évolution du trait de côte avec un profil initial constant) avec les valeurs des volumes de rechargement peut induire en erreur puisqu'un massif de rechargement présente un profil qui est très loin d'un profil d'équilibre, et l'érosion due aux premières tempêtes s'inscrit dans une phase transitoire au cours de laquelle le processus de reconstruction est faible. À titre indicatif, les simulations pour le site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix ont montré qu'à niveau haut, jusqu'à 30% du volume rechargé peut être mobilisé par les premières

tempêtes d'importance. Cette phase transitoire ne peut être simulée dans le cadre de l'approche à long terme.

Toujours dans l'exemple du site de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, on est confronté à un site dont la configuration simulée est relativement différente de la configuration réelle au cours de la période de simulation de 23 ans. C'est un site qui, outre sa complexité due à une multitude d'ouvrages, a subi beaucoup de variations telles que des constructions d'ouvrages et des rechargements très fréquents. Il est donc dans ce cas peu réaliste de comparer précisément les volumes rechargés aux volumes érodés calculés.

Ainsi, considérant que sur le long terme les mécanismes sont correctement reproduits, les valeurs relatives des volumes érodés d'un scénario à l'autre obtenues à l'aide des simulations du modèle d'évolution du trait de côte pour un site donné sont représentatives des efforts d'intervention à prévoir.

Dans la réalité, un profil, même à l'équilibre, subit des périodes d'érosion lors des tempêtes, soit une échelle de temps à court terme. Tel que décrit plus haut, cette érosion peut être compensée à long terme par le processus de reconstruction, mais à court terme, un recul avec un volume érodé vers le large est observé. Les résultats du modèle de transport transversal permettent donc d'évaluer cette érosion à court terme en fonction des caractéristiques propres aux différents sites. Cette approche permet de compléter le portrait de la dynamique sédimentaire des sites à l'étude.

L'indice d'érosion, tel que défini à la section 9.1.3, permet à l'aide d'un seul paramètre global (intégrant la variabilité des conditions de vagues et de niveaux d'eau ainsi que les spécificités du profil du site) de qualifier la vulnérabilité d'un secteur. Les valeurs des volumes et reculs obtenues pour les couples {événement, niveau d'eau} permettent plutôt de quantifier la réponse à un type d'événement particulier, pour une analyse locale plus détaillée (conception des rechargements, etc.).

9.16.2 Limitation des modèles

Transport longitudinal – modèle d'évolution du trait de côte

Tel qu'indiqué à la section 9.1.2, dans le modèle d'évolution du trait de côte à long terme (transport longitudinal), les secteurs modélisés doivent répondre à certaines hypothèses de quasi-uniformité, notamment en ce qui concerne la bathymétrie. Les secteurs s'écartant trop de ces hypothèses de modélisation, comme par exemple l'embouchure d'une rivière formant un chenal d'écoulement ou un delta dans la bathymétrie, les baies encaissées, les pointes prononcées, les lignes de côte présentant une sinuosité marquée ou des variations brusques, ne peuvent être modélisés adéquatement. Dans le cas où les singularités sont de faible étendue, cela peut se traduire par une réponse locale erronée sans incidence notable sur les résultats de l'ensemble du secteur (les tendances générales du site s'accordent avec les observations). En revanche, lorsque les singularités sont de plus grande envergure, il est préférable de subdiviser le site et d'écarter la zone problématique. Il faut tout de même souligner que tout a été mis en œuvre pour minimiser le nombre de secteurs à écarter comme l'en atteste le tableau 9.1 indiquant que près de 75% de la longueur cumulée de plage a pu être modélisé.

Le modèle d'évolution du trait de côte est conçu pour une analyse du bilan sédimentaire à moyen ou long terme. La formulation permet de combiner globalement le transport vers le large et le transport

longitudinal, et donne alors la tendance à long terme en considérant un profil à l'équilibre constant, c'est-à-dire en faisant l'hypothèse d'un profil dont les variations saisonnières se compensent. Ce modèle utilisé dans le cas d'un évènement de tempête fournirait des volumes d'érosion et des reculs sous-estimés qui ne seraient pas représentatifs de la réalité observée puisque le mécanisme transversal est dominant en période de tempête, ce qui s'écarte des hypothèses de modélisation. La formulation intégrant l'ensemble des mécanismes sur une période prolongée ne permet pas de les simuler individuellement sur de courtes périodes (voir section 9.16.1).

Il faut noter également que la réponse du modèle à la présence d'un brise-lames à proximité des épis ne semble pas adéquate, notamment en sous-estimant l'effet d'accrétion derrière l'ouvrage. Le bilan dans la zone d'influence du brise-lames surestime donc l'érosion. Dans le cas d'une obliquité restreinte des vagues incidentes dominantes par rapport à l'ouvrage, cela conduit à une représentation erronée des courants locaux et donc à sous-estimer l'accumulation.

Le cas échéant, les secteurs pour lesquels les résultats de modélisation sont affectés par certaines limitations du modèle sont identifiés dans les sections traitant des résultats.

Transport transversal

Il est important de noter que la base de calcul de l'indice d'érosion annuel correspond à un potentiel d'érosion brut, typique des zones de plage les plus uniformes (présentant des caractéristiques répondant aux hypothèses de modélisation) plutôt qu'un volume résultant d'un bilan net à long terme uniformément applicable sur l'ensemble du tronçon de plage à l'étude. En effet, ce paramètre est basé sur le calcul du volume brut déplacé vers le large au cours d'évènements significatifs de 72 heures incluant au moins une tempête, et ne tient pas compte des effets de reconstruction post-tempête, ni des périodes prolongées plus calmes ou du transport longitudinal qui pourraient avoir un effet sur le bilan total du profil, notamment au niveau de la formation d'une éventuelle barre sableuse au large. De plus, les effets locaux des structures en place ou des avancées de terre, comme dans les secteurs de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix ou Saint-Henri-de-Taillon Nord, ne sont pas pris en compte dans la modélisation du transport transversal. Cette valeur ne traduit donc pas directement le recul de plage qui pourrait être observé au terme d'une année ou à plus long terme.

En revanche, tel qu'indiqué à la section 9.1.3, les résultats des simulations du modèle de transport transversal peuvent être interprétés de deux points de vue :

- Réponse à des évènements de courte durée, en l'occurrence des évènements de 72 heures caractérisés par un niveau d'énergie élevé des vagues incidentes (période de tempête). Les volumes et les reculs calculés reflètent dans ce cas l'impact de ces évènements sur le profil bathymétrique définissant le site.
- L'indice d'érosion quant à lui doit être utilisé dans sa forme adimensionnelle et d'un point de vue relatif puisqu'il permet essentiellement de comparer de manière globale (intégration de la variabilité des conditions de vagues et de niveaux d'eau) la sensibilité des sites à l'érosion transversale. De la même manière, cet indice permet d'évaluer l'effet relatif des scénarios de gestion du niveau d'eau.

Finalement, il faut souligner que bien que Rio Tinto Alcan fasse effectuer des relevés bathymétriques locaux dans le cadre de certains travaux d'aménagement, aucun suivi bathymétrique (sous la forme de profils ou par zone) n'est réalisé de manière systématique, à intervalle régulier ou lors de tempêtes (avant et après l'événement) permettant d'évaluer l'évolution morphologique des profils de plages et de réaliser des bilans sédimentaires spécifiques à des événements de tempête ou à long terme. Mentionnons également que les relevés locaux ne sont pas tous géoréférencés, ce qui limite l'exploitation des données. Les données disponibles se révèlent donc incomplètes pour un exercice de calibrage ou de validation optimal des modèles de transport sédimentaire.

10 ANALYSE DES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS DE GESTION DU NIVEAU D'EAU

Dans le cadre de l'étude 2017-2026, Rio Tinto Alcan a cherché à identifier le meilleur scénario de gestion du niveau du lac permettant de concilier différents impératifs (techniques, sociaux, environnementaux, économiques). L'impact du niveau d'eau sur l'érosion revêtant un caractère important, des simulations du transport longitudinal et transversal ont été réalisées afin d'évaluer cet impact.

Six scénarios alternatifs de gestion du niveau d'eau résultant de simulations réalisées par Rio Tinto Alcan ont été définis. Les principales contraintes en termes de niveau d'eau maximum sont résumées au tableau 10.1. La figure 10.1, quant à elle, reprend l'information de la figure 8.16 et présente le niveau d'eau médian sur la période d'eau libre considérée pour chaque scénario.

Les séries chronologiques de ces scénarios en période d'eau libre future (établie suite à l'analyse des changements climatiques) ont été traitées pour servir d'intrant aux modèles pour les simulations. Deux aspects distincts ont été étudiés : (1) l'évolution à long terme du trait de côte caractérisant le portrait érosif à long terme et (2) le transport transversal induit par les événements de tempêtes. Les tableaux 10.2 à 10.4 et la figure 10.2 permettent de faire la synthèse des résultats relatifs à l'impact des scénarios de gestion du niveau d'eau sur l'érosion.

Tableau 10.1: Contraintes en termes de niveaux d'eau maximums

	Contraintes niveaux (pi.) [Él. pi = Él. (m)/0.3048 - 316.635]				
	PRINTEMPS	ÉTÉ	SEPTEMBRE	OCTOBRE À DÉCEMBRE	HIVER
Nom	Max	Max	Max	Max	Max
A	16.50	16.00	16.50	16.50	16.50
B	16.50	16.00	15.50	15.50	15.50
C	15.50	15.50	15.50	15.50	15.50
D	16.50	15.50	15.50	15.50	15.00
E	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00
F*	17.50	16.00	15.50	15.50	15.50

*le scenario F2 présenté dans le rapport d'étude d'impact de WSP n'a pas été modélisé car la différence n'était pas significative.

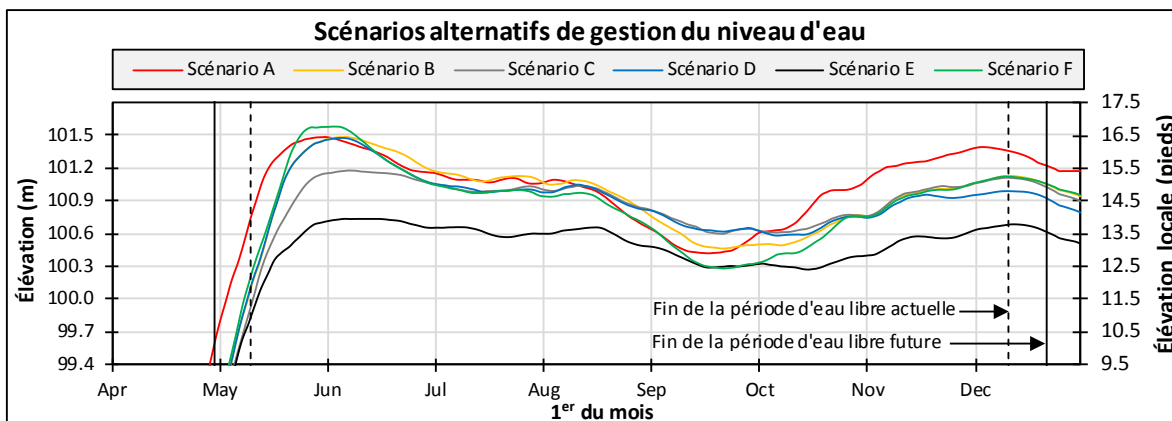


Figure 10.1: Scénarios alternatifs de gestion du niveau d'eau

10.1 Érosion à long terme - Transport longitudinal

Les tableaux 10.2 à 10.4 présentent les résultats de volumes érodés à long terme obtenus avec le module de transport longitudinal pour les scénarios de gestion A, B, C, E et F. Le scénario D, très similaire au scénario C, n'a finalement pas été modélisé.

Tableau 10.2: Effet du scénario de gestion du niveau d'eau sur l'érosion à long terme (23 ans)

Saint-Gédéon Sud: Calcul sur 2000m de distance		
Scénario	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m ³)	Écart par rapport au Scénario A
Scénario A	43 000	-
Scénario B	45 000	5%
Scénario C	47 000	9%
Scénario E	56 000	30%
Scénario F	47 000	9%
Métabetchouan-Lac-à-la-Croix : Calcul sur 7000m de distance		
Scénario	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m ³)	Écart par rapport au Scénario A
Scénario A	58 000	-
Scénario B	58 000	≈ 0%
Scénario C	58 000	≈ 0%
Scénario E	65 000	12%
Scénario F	58 000	≈ 0%
Chambord (Domaine du Marais): Calcul sur 1300m de distance		
Scénario	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m ³)	Écart par rapport au Scénario A
Scénario A	92 000	-
Scénario B	102 000	11%
Scénario C	105 000	14%
Scénario E	131 000	42%
Scénario F	103 000	12%
Chambord (Pointe): Calcul sur 500m de distance		
Scénario	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m ³)	Écart par rapport au Scénario A
Scénario A	12 000	-
Scénario B	13 000	8%
Scénario C	13 000	8%
Scénario E	15 000	25%
Scénario F	13 000	8%

Tableau 10.3: Effet du scénario de gestion du niveau d'eau sur l'érosion à long terme (23 ans) (suite)

Mashteuiatsh: Calcul sur 1100m de distance		
Scénario	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m ³)	Écart par rapport au Scénario A
Scénario A	8 000	-
Scénario B	8 000	0%
Scénario C	7 000	-13%
Scénario E	5 000	-38%
Scénario F	8 000	≈ 0%
Saint-Félicien: Calcul sur 3200m de distance		
Scénario	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m ³)	Écart par rapport au Scénario A
Scénario A	23 000	-
Scénario B	21 000	-9%
Scénario C	19 000	-17%
Scénario E	10 000	-57%
Scénario F	21 000	-9%
Dolbeau-Mistassini : Calcul sur 9300m de distance		
Scénario	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m ³)	Écart par rapport au Scénario A
Scénario A	105 000	-
Scénario B	92 000	-12%
Scénario C	91 000	-13%
Scénario E	58 000	-45%
Scénario F	91 000	-13%
Saint-Henri Nord 1: Calcul sur 1700m de distance		
Scénario	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m ³)	Écart par rapport au Scénario A
Scénario A	14 000	-
Scénario B	12 000	-14%
Scénario C	12 000	-14%
Scénario E	8 000	-43%
Scénario F	13 000	-7%

Tableau 10.4: Effet du scénario de gestion du niveau d'eau sur l'érosion à long terme (23 ans) (moyenne)

Moyenne des secteurs		
Scénario	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m ³)	Écart par rapport au Scénario A
Scénario A	44 375	-
Scénario B	43 875	-1%
Scénario C	44 000	-1%
Scénario E	43 500	-2%
Scénario F	44 250	0%

Dans le cas d'un abaissement du niveau d'eau, les variations du volume d'érosion à long terme par transport longitudinal peuvent être conditionnées par différents mécanismes qui dépendent des caractéristiques des secteurs considérés :

- Zones de profil présentant une pente douce : En abaissant le niveau d'eau maximum à 14 pieds, la majorité du transport sédimentaire se produit beaucoup plus au large qu'en présence d'un niveau d'eau plus élevé, ce qui tend à réduire significativement l'activité sédimentaire ayant un impact direct sur la plage et la ligne de côte. Un écart relatif de l'ordre de 40% a été obtenu dans ce type de secteur (Dolbeau-Mistassini, Saint-Félicien, Mashteuiatsh);
- Lors d'un abaissement du niveau d'eau, la bathymétrie au large de la plage a une influence plus marquée sur la réfraction des vagues à l'approche de la côte, résultant dans certains cas en une augmentation de l'angle d'incidence au moment du déferlement. Dans les secteurs de Saint-Gédéon Sud (zone de la borne 29), Chambord (Pointe) et Chambord (Domaine du Marais), un abaissement d'un pied (ou 0,30 m, scénarios B, C et F) donne lieu à une faible variation des volumes érodés à long terme alors qu'un abaissement important de 2,5 pieds (ou 0,75 m, scénario E) conduit à une augmentation plus marquée des volumes mis en jeu. Soulignons que dans le modèle, cette bathymétrie est décrite par une isobathe unique (voir description section 9.3.3), ce qui permet certes de reproduire cet effet, mais de manière schématique limitée;
- Les zones caractérisées par un transport longitudinal net faible sont plus sensibles aux variations de niveaux, puisqu'un léger changement dans la direction d'attaque des vagues peut faire en sorte de rompre l'équilibre et favoriser une direction significativement dominante;
- Zones de profil présentant une pente moyenne à raide et présence d'épis : le transport sédimentaire longitudinal se produit à une distance comparable de la plage à niveau haut et à niveau bas mais avec une limite au large étant plus éloignée à niveau bas. Dans ce cas, l'effet des épis est plus limité et leur efficacité d'interception du transport est réduite. Une augmentation des volumes érodés peut alors se produire à long terme. Cette variation demeure faible dans le cas de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, mais est plus significative dans le cas de Saint-Gédéon Sud pour le scénario E. En outre, il est important de noter qu'avec un niveau très bas (scénario E), la base des épis devient plus exposée à l'action des vagues, ce qui à long terme pourrait conduire au développement de zones d'affouillement pouvant compromettre la stabilité des ouvrages.

Les résultats de modélisation à long terme du transport longitudinal montrent donc qu'un abaissement du niveau d'eau ne conduit pas nécessairement à une réduction des volumes érodés, mais peut même, selon les sites, mener à une augmentation. D'une manière générale, si la variation de niveau d'eau est limitée (0,30 m ou 1 pied), l'effet sur les volumes d'érosion est faible (de l'ordre de $\pm 10\%$) alors qu'un abaissement plus important (0,75 m ou 2,5 pieds) conduit à des variations plus marquées.

Finalement, il importe de souligner qu'un abaissement du niveau d'eau n'a pas d'effet bénéfique à long terme dans certains des secteurs les plus vulnérables à l'érosion, comme Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, Saint-Gédéon Sud ou Chambord (Pointe et Domaine du Marais), mais a plutôt tendance à accentuer l'érosion, impliquant alors une augmentation de la fréquence des interventions ou du volume de recharge.

10.2 Transport transversal

Alors que les résultats des simulations de l'évolution du trait de côte permettent de dresser un portrait à long terme de l'impact des scénarios de niveau d'eau sur les volumes érodés, l'étude du transport transversal permet plutôt d'évaluer la réponse aux tempêtes en fonction des niveaux d'eau. L'analyse révèle une influence plus variable des scénarios de gestion du niveau d'eau sur les volumes érodés selon les secteurs. Le tableau 10.5 présente les résultats obtenus sur la base des résultats des simulations réalisées avec le module de transport transversal, selon la méthode résumée à la section 9.1.3, pour l'ensemble des scénarios (A, B, C, E et F).

Les résultats montrent en premier lieu que le scénario A conduit à des valeurs comparables à celles obtenues pour les conditions historiques et mettent en évidence le fait que les secteurs les plus exposés, présentant une problématique d'érosion importante en période de tempête, se trouvent principalement du côté est du lac et sont caractérisés par des profils-types ayant une pente relativement raide (5 à 10%) jusqu'à une élévation de l'ordre de 97,5 m. À l'inverse, les secteurs moins exposés à l'érosion par transport transversal en période de tempête se situent du côté ouest du lac et sont caractérisés par des profils présentant une pente très douce (1% et moins) au pied de la pente de la face de la plage. Les figures 9.6 et 9.7 à la section 9.2 illustre les profils utilisés dans la présente analyse.

Les résultats des simulations d'événements de tempêtes sous différents niveaux d'eau ont été traités afin de calculer l'indice d'érosion, intégrant la variabilité des conditions de vagues et de niveaux d'eau sur la période de référence de 23 ans. La synthèse de la comparaison de la réponse aux tempêtes des différents sites peut alors être faite à l'aide de ce paramètre intégré. Il est donc intéressant de constater que l'écart entre les valeurs des indices d'érosion obtenus pour deux scénarios différents est généralement comparable à l'écart entre les volumes érodés obtenus pour un même événement de tempête se produisant aux niveaux d'eau maximums caractéristiques des deux scénarios considérés.

Les tableaux de matrices d'érosion présentés aux sections 9.8 à 9.15 permettent quant à eux d'évaluer les cas particuliers plus en détails. Tel que mentionné à la section 9.17, l'analyse des valeurs obtenues doit être réalisée dans un contexte de tempête (événements ponctuels).

Les résultats, synthétisés à la figure 10.2 et au tableau 10.6, tendent à montrer que le fait d'abaisser le niveau maximum d'un pied (0,30 m) permet de réduire l'exposition à l'érosion de manière significative (moyenne de l'ordre de 45% de réduction de l'indice d'érosion par rapport au statu quo du scénario A) dans les zones peu exposées du côté ouest du lac alors que l'effet est beaucoup plus limité (moyenne de l'ordre de 15% de réduction par rapport au statu quo du scénario A) dans les secteurs exposés de l'est du lac. Les écarts obtenus dans les secteurs exposés restent d'un ordre qui peut être qualifié de faible compte tenu du degré de schématisation des modèles utilisés et des incertitudes inhérentes au calcul du transport sédimentaire. En termes de recul du trait de côte suite à une tempête, les résultats donnent lieu à une tendance analogue, les ordres de grandeur des reculs sont comparables dans le cas des profils raides alors qu'une réduction significative est obtenue dans le cas de profils présentant une pente douce en milieu peu profond.

Tableau 10.5: Effet du scénario de gestion du niveau d'eau sur le transport transversal lors des événements de tempêtes

Scénario	Indice d'érosion					
	Condition historiques 1992-2014	Scénario A 2015-2037	Scénario B 2015-2037	Scénario C 2015-2037	Scénario F 2015-2037	Scénario E 2015-2037
Saint-Gédéon Sud (BI 29)	0.73	0.8	0.63	0.63	0.63	0.54
Saint-Gédéon Sud (BI 18)	0.31	0.34	0.16	0.15	0.15	0.04
Métabetchouan-Lac-à-la-Croix	1	1.13	0.88	0.88	0.88	0.67
Chambord (Domaine du marais)	1.45	1.72	1.69	1.65	1.74	1.79
Chambord (Pointe)	0.76	0.77	0.66	0.64	0.69	0.3
Mashteuiatsh	0.61	0.63	0.52	0.5	0.53	0.25
Saint Félicien	0.26	0.25	0.17	0.14	0.19	0.05
Dolbeau-Mistassini	0.26	0.26	0.18	0.17	0.18	0.05
Saint-Henri-de-Taillon Nord1 (BI 15)	0.67	0.75	0.54	0.54	0.54	0.25
Saint-Henri-de-Taillon Nord2 (BI 25)	0.88	1.04	0.96	0.96	1	1

Scénario	Écart relatif de l'indice d'érosion par rapport au scénario A (statuquo)					
	Condition historiques 1992-2014	Scénario A 2015-2037	Scénario B 2015-2037	Scénario C 2015-2037	Scénario F 2015-2037	Scénario E 2015-2037
Saint-Gédéon Sud (BI 29)	-9%	0%	-21%	-21%	-21%	-33%
Saint-Gédéon Sud (BI 18)	-9%	0%	-53%	-56%	-56%	-88%
Métabetchouan-Lac-à-la-Croix	-12%	0%	-22%	-22%	-22%	-41%
Chambord (Domaine du marais)	-16%	0%	-2%	-4%	1%	4%
Chambord (Pointe)	-1%	0%	-14%	-17%	-10%	-61%
Mashteuiatsh	-3%	0%	-17%	-21%	-16%	-60%
Saint Félicien	4%	0%	-32%	-44%	-24%	-80%
Dolbeau-Mistassini	0%	0%	-31%	-35%	-31%	-81%
Saint-Henri-de-Taillon Nord1 (BI 15)	-11%	0%	-28%	-28%	-28%	-67%
Saint-Henri-de-Taillon Nord2 (BI 25)	-15%	0%	-8%	-8%	-4%	-4%

Moyenne tous les secteurs	-7%	0%	-23%	-26%	-21%	-51%
Moyenne des secteurs exposés	-11%	0%	-13%	-14%	-11%	-27%
Moyenne des secteurs peu exposés	-2%	0%	-39%	-45%	-37%	-83%

L'étude de cas du scénario E, soit un abaissement de 0,75 m (2,5 pieds) du niveau d'eau maximum, montre que la réduction des taux d'érosion est généralement plus importante. Une moyenne de l'ordre de 30% est obtenue pour les secteurs exposés (pentes raides) et une moyenne de 80% est obtenue pour les secteurs peu exposés (pentes douces). Cependant, dans les secteurs présentant les pentes de profil les plus raides, comme au secteur Chambord (Domaine du Marais) ou à Saint-Henri-de-Taillon Nord 2, l'effet demeure marginal.

La variation de l'indice d'érosion en fonction du niveau d'eau s'explique par la nature des pentes du profil et la notion de profil d'équilibre. Tel qu'illustré à la figure 9.7, les profils présentent généralement une section raide dans leur partie supérieure suivie d'une section en pente significativement plus douce vers le large. La notion de profil d'équilibre réfère à la morphologie moyenne que pourrait atteindre un profil à long terme. Ce type de profil donne lieu à une érosion minimale en période de tempête compensée par la reconstruction en période de temps calme. Ainsi, lorsque la pente du profil considéré est douce (de l'ordre de ou inférieure à la pente d'équilibre) dans la zone de déferlement, le comportement se rapproche de celui d'un profil d'équilibre, ce qui conduit à de faibles volumes d'érosion lors d'une tempête. Cela est généralement observé à niveau bas. À l'inverse, lorsque la pente du profil dans la zone d'action de vague est plus raide, l'érosion est importante. En d'autres termes, en présence de pentes plus douces (mais pas encore à l'équilibre) dans la zone d'action de vagues, le volume à éroder pour tendre vers le profil d'équilibre est moins important que pour une pente raide.

L'analyse du transport transversal tend donc à montrer qu'un léger abaissement du niveau d'eau (0,3 m ou 1 pied) ne conduit pas à une réduction des taux d'érosion permettant d'apporter une solution systématique et durable dans les secteurs les plus problématiques. À court terme, toutefois, l'élargissement de la plage dû à l'abaissement du niveau d'eau offre une zone tampon supplémentaire permettant de retarder la problématique. La figure 10.3 illustre cette zone tampon pour chacun des secteurs. Dans les zones de profils raides, une marge d'environ 3 m est disponible alors que dans les zones à pente plus douce, une marge pouvant atteindre 5 m est obtenue. Un abaissement plus important (0,75 m ou 2,5 pieds) ne permet pas non plus d'apporter une solution uniforme à tous les secteurs vulnérables puisque certains secteurs, comme Saint-Henri-de-Taillon Nord 2 ou Chambord (Domaine du Marais), présentent une variation marginale de l'indice d'érosion.

10.3 Résumé

En résumé, l'analyse des mécanismes de transport sédimentaires selon deux échelles de temps permet de montrer qu'à cause de la spécificité de chacun des sites de plage du lac Saint-Jean, la réponse à un abaissement du niveau du lac en termes de volumes d'érosion est variable. Ainsi, une telle intervention à l'échelle globale du lac aura une performance hétérogène qui ne semble pas apporter une solution systématique aux problématiques rencontrées dans les secteurs vulnérables.

De plus, outre l'aspect d'érosion des berges et des plages du lac, un abaissement important du niveau d'eau du lac (typiquement de 0,75 m ou plus) pourrait conduire notamment à des problématiques liées aux modifications de la dynamique sédimentaire et de la morphologie des embouchures et deltas de rivières dans le lac à long terme. Ces aspects font l'objet d'une étude d'impact réalisée par la firme WSP pour le compte de Rio Tinto Alcan dans le cadre du PSBLSJ (réf. [17]).

Les interventions locales conçues spécifiquement en fonction du comportement des différents sites semblent donc être une approche à privilégier afin de minimiser d'éventuels impacts. Les résultats présentés aux sections 9.8 à 9.15 de ce rapport montrent qu'une étude ciblée avec les outils adéquats permet d'évaluer et d'optimiser l'efficacité de scénarios d'intervention locale.

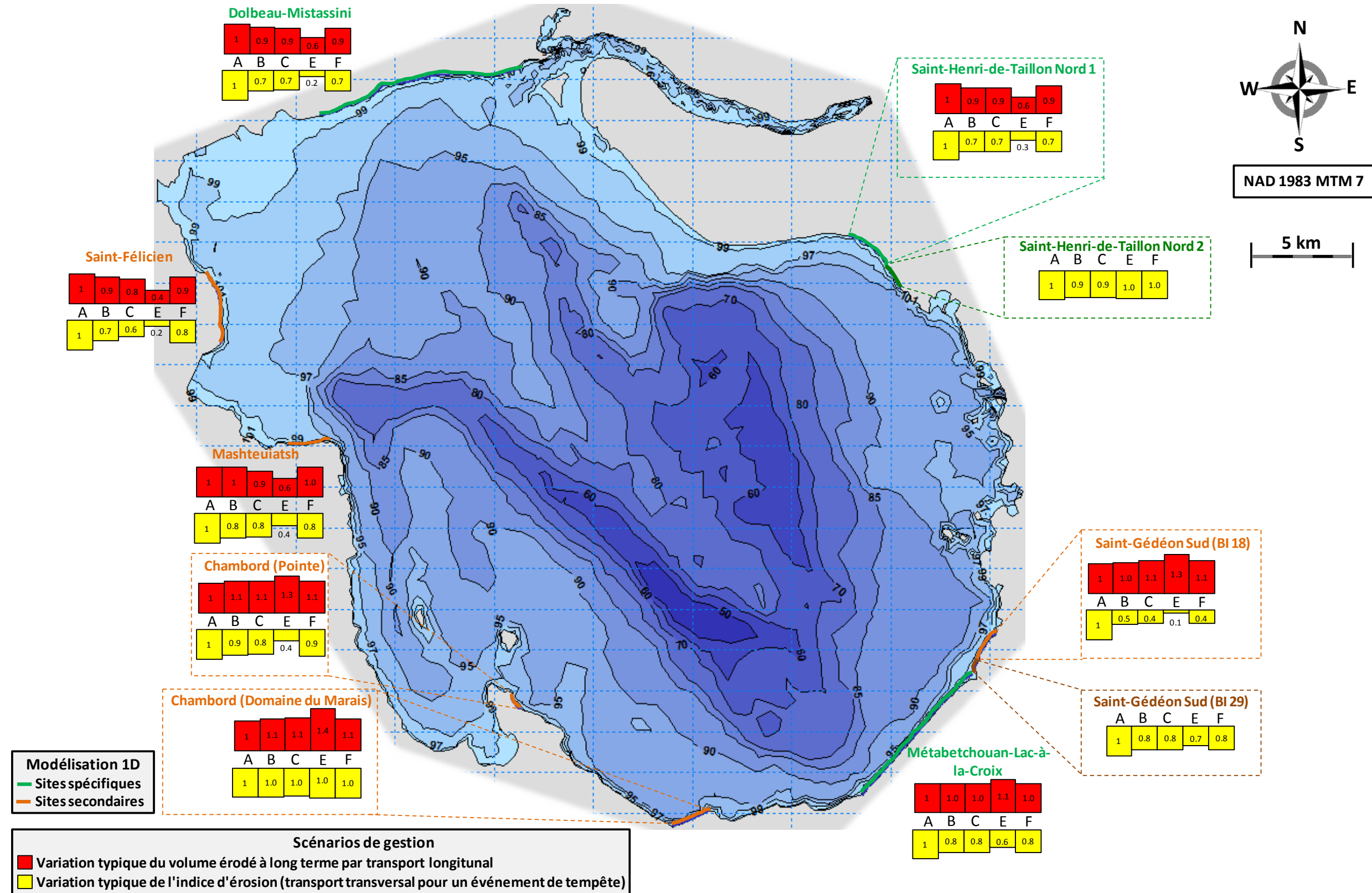


Figure 10.2 : Synthèse des résultats pour les différents scénarios de gestion du niveau d'eau

Tableau 10.6: Synthèse des résultats pour les différents scénarios de gestion du niveau d'eau

Érosion en transport littoral (écart relatif par rapport au Scénario A)					
Secteur	Scénario A	Scénario B	Scénario C	Scénario E	Scénario F
Saint Gédéon Sud	1	1.05	1.09	1.30	1.09
Métabetchouan-Lac-à-la-Croix	1	1.00	1.00	1.12	1.00
Chambord (Domaine du Marais)	1	1.10	1.13	1.43	1.10
Chambord (Pointe)	1	1.08	1.08	1.25	1.08
Saint-Félicien	1	0.91	0.83	0.43	0.91
Mashteuiatsh	1	1.00	0.88	0.63	1.00
Dolbeau-Mistassini	1	0.88	0.87	0.55	0.87
Saint Henri-de-Taillon Nord	1	0.86	0.86	0.57	0.93
Indice d'érosion en transport transversal (écart relatif par rapport au Scénario A)					
Secteur	Scénario A	Scénario B	Scénario C	Scénario E	Scénario F
Saint-Gédéon Sud faible	1	0.47	0.44	0.12	0.44
Saint-Gédéon Sud raide	1	0.79	0.79	0.68	0.79
Métabetchouan-Lac-à-la-Croix	1	0.78	0.78	0.59	0.78
Chambord (Domaine du Marais)	1	0.98	0.96	1.04	1.01
Chambord (Pointe)	1	0.86	0.83	0.39	0.90
Saint-Félicien	1	0.68	0.56	0.20	0.76
Mashteuiatsh	1	0.83	0.79	0.40	0.84
Dolbeau-Mistassini	1	0.69	0.65	0.19	0.69
Saint Henri-de-Taillon Nord 1	1	0.72	0.72	0.33	0.72
Saint Henri-de-Taillon Nord 2	1	0.92	0.92	0.96	0.96

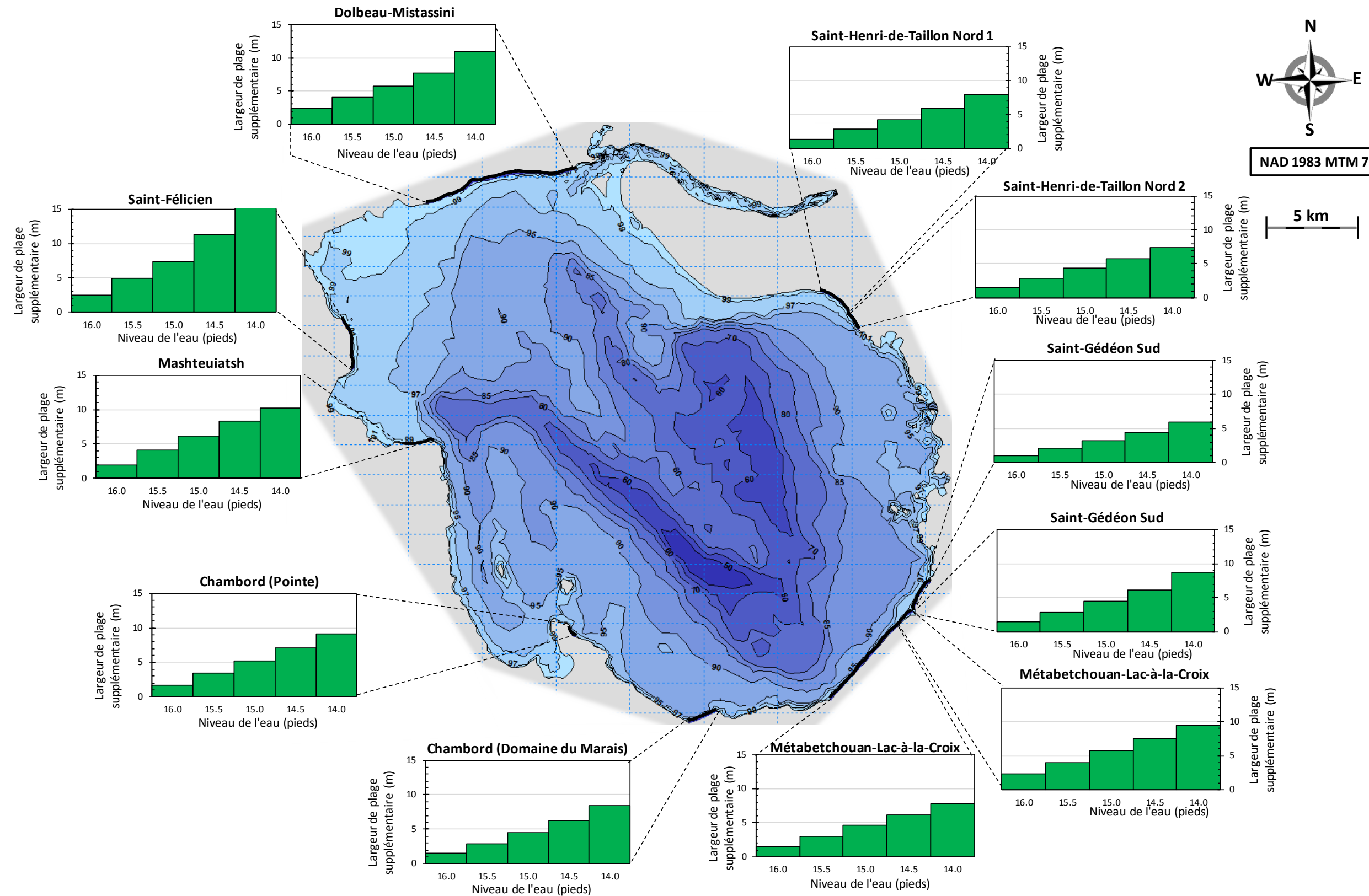


Figure 10.3: Largeur de plage supplémentaire pour différents niveaux d'eau

11 ANALYSE DU PROLONGEMENT DE LA PÉRIODE D'EAU LIBRE ENGENDRÉ PAR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Une analyse de sensibilité a été effectuée sur la durée de la période d'eau libre. Pour ce faire, l'état de référence modélisé en utilisant la période d'eau libre historique (1992 à 2014) a été comparé à la même séquence de vagues et de niveaux d'eau étendue à la période d'eau libre future obtenue à l'aide des résultats de simulation de modèles climatiques. Le prolongement de cette période d'eau libre est estimé en moyenne à 17 jours par année : 7 jours au printemps et 10 jours en automne. Le nombre moyen annuel de jours durant lequel le lac est en eau libre est :

- 219 jours pour les conditions historiques de 1992 à 2014;
- 236 jours pour les conditions futures de 2015 à 2037.

Les résultats de modélisation indiquent qu'un allongement de la période d'eau libre engendre une augmentation du volume érodé à long terme par transport longitudinal de 7% en moyenne sur l'ensemble des secteurs (tableau 11.1). En ne considérant que les 10 jours de plus en automne sur 23 ans, cela équivaut à 230 jours de plus au terme de la période de référence, soit environ une année d'eau libre supplémentaire à niveau haut. Par ailleurs, si le volume érodé était équitablement réparti sur les 23 ans, chaque année contribuerait à hauteur de 4,3% du volume érodé. Or le prolongement de la période d'eau libre induit une augmentation moyenne de 7%, soit un peu plus de 1,5 fois la contribution d'une année moyenne. Ainsi, à long terme, l'impact du prolongement de la période d'eau libre est tout de même notable de ce point de vue.

En ce qui concerne le transport transversal, la comparaison des indices d'érosion obtenus pour la période d'eau libre prolongée avec ceux obtenus pour les conditions historiques (période d'eau libre actuelle) indique une augmentation de l'ordre de 7% en moyenne sur l'ensemble des secteurs étudiés (tableau 11.2). Rapporté à l'échelle de temps d'un événement de tempête, une augmentation de 7% du volume érodé reste marginale.

Dans les secteurs de l'ouest du lac, comme Saint-Félicien et Dolbeau-Mistassini, le prolongement de la période d'eau libre au printemps n'a pas d'effet puisqu'il coïncide avec des niveaux d'eau très bas conduisant à une érosion pratiquement nulle. À l'automne, malgré des niveaux hauts, le nombre de tempêtes pouvant affecter ces secteurs n'augmente pas de manière suffisante pour induire une augmentation notable de l'indice d'érosion. L'effet de l'allongement de la période d'eau libre demeure donc très limité.

Dans l'ensemble, l'accroissement des volumes d'érosion dû à l'allongement de la période d'eau libre est comparable à l'augmentation relative de l'énergie totale cumulée des vagues incidentes suite à l'allongement de la période d'eau libre.

Tableau 11.1: Effet du prolongement de la période d'eau libre sur l'érosion longitudinale

Saint-Gédéon Sud : Calcul sur 2000m de distance		
Période d'eau libre	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m ³)	Écart par rapport à l'historique
Historique	35 000	-
Future	40 000	14%
Métabetchouan-Lac-à-la-Croix : Calcul sur 7000m de distance		
Période d'eau libre	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m ³)	Écart par rapport à l'historique
Historique	48 000	-
Future	52 000	8%
Chambord (Domaine du Marais) : Calcul sur 1300m de distance		
Période d'eau libre	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m ³)	Écart par rapport à l'historique
Historique	79 000	-
Future	86 000	9%
Chambord (Pointe) : Calcul sur 500m de distance		
Période d'eau libre	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m ³)	Écart par rapport à l'historique
Historique	11 000	-
Future	12 000	9%
Saint-Félicien : Calcul sur 3200m de distance		
Période d'eau libre	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m ³)	Écart par rapport à l'historique
Historique	25 000	-
Future	25 000	≈ 0%
Mashteuiatsh : Calcul sur 1100m de distance		
Période d'eau libre	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m ³)	Écart par rapport à l'historique
Historique	9 000	-
Future	9 000	≈ 0%
Dolbeau-Mistassini : Calcul sur 9300m de distance		
Période d'eau libre	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m ³)	Écart par rapport à l'historique
Historique	98 000	-
Future	105 000	7%
Saint-Henri-de-Taillon Nord : Calcul sur 1700m de distance		
Période d'eau libre	Volume érodé en 23 ans depuis la ligne de côte 2014 (m ³)	Écart par rapport à l'historique
Historique	23 000	-
Future	25 000	9%

Tableau 11.2 : Effet du prolongement de la période d'eau libre sur l'érosion transversale

Site	Indice d'érosion		
	Période d'eau libre historique 1992-2014	Période d'eau libre future 2015-2037	Écart relatif
Saint-Gédéon Sud (BI 29)	0.73	0.82	13%
Saint-Gédéon Sud (BI 18)	0.31	0.34	10%
Métabetchouan-Lac-à-la-Croix	1	1.06	6%
Chambord (Domaine du marais)	1.45	1.62	12%
Chambord (Pointe)	0.76	0.85	12%
Mashteuiatsh	0.61	0.66	7%
Saint Félicien	0.26	0.26	2%
Dolbeau-Mistassini	0.26	0.26	0%
Saint-Henri-de-Taillon Nord1 (BI 15)	0.67	0.71	6%
Saint-Henri-de-Taillon Nord2 (BI 25)	0.88	0.93	6%
Moyenne de l'écart relatif			7%

12 ÉROSION SAISONNIÈRE

12.1 Variation saisonnière du climat de vagues

La variation saisonnière des vagues a été analysée en se basant sur les résultats du modèle numérique de génération de vagues, présenté à la section 8, pour une période de 23 ans, soit les périodes d'eau libre de 1992 à 2014.

Il est important de préciser qu'en raison de la présence du couvert de glace, les mois de mai et décembre ne sont pas en eau libre pour la totalité de leur durée. De même, du fait d'un départ hâtif des glaces, il arrive certaines années que le mois d'avril présente quelques jours d'eau libre. En moyenne, le nombre de jours en eau libre pour les mois d'avril, mai et décembre sont respectivement de 1, 24 et 12 jours par année.

La figure 12.1 montre que les tempêtes responsables des vagues supérieures à 70 cm sont plus fréquentes à la fin de la saison d'automne, soit durant les mois d'octobre et novembre. Ces tempêtes sont également légèrement plus fréquentes à la fin du printemps (mai et juin) comparativement à l'été (juillet et août). Les deux tiers des vagues de plus de 70 cm sont générées entre septembre et décembre.

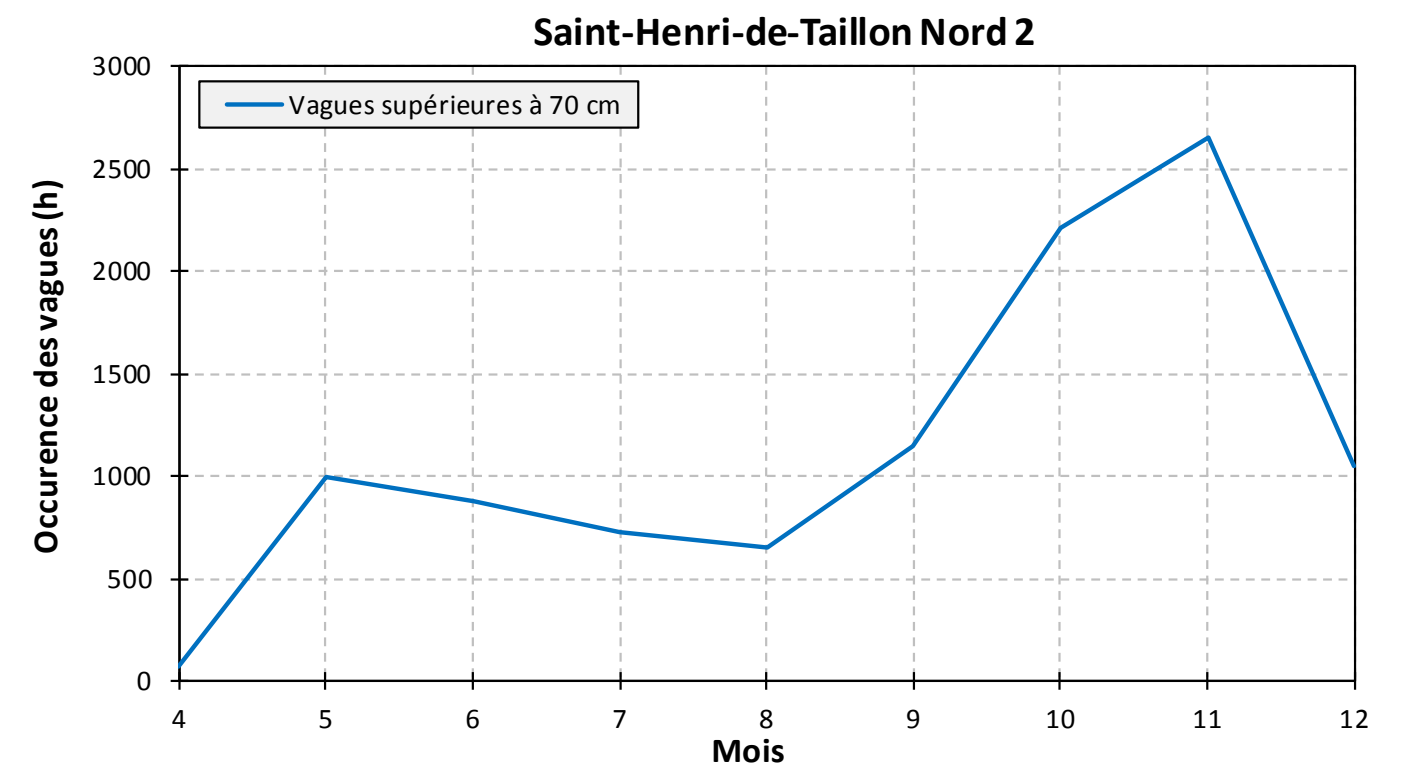
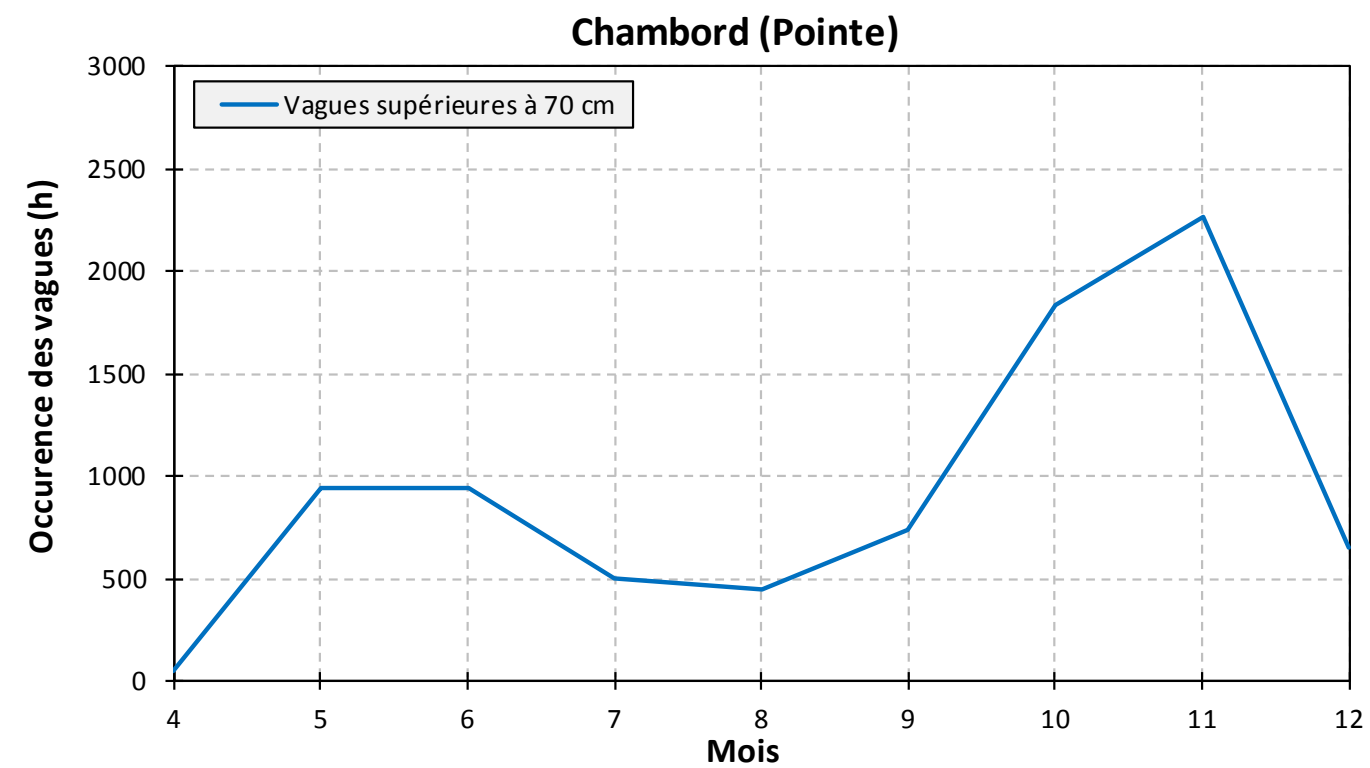
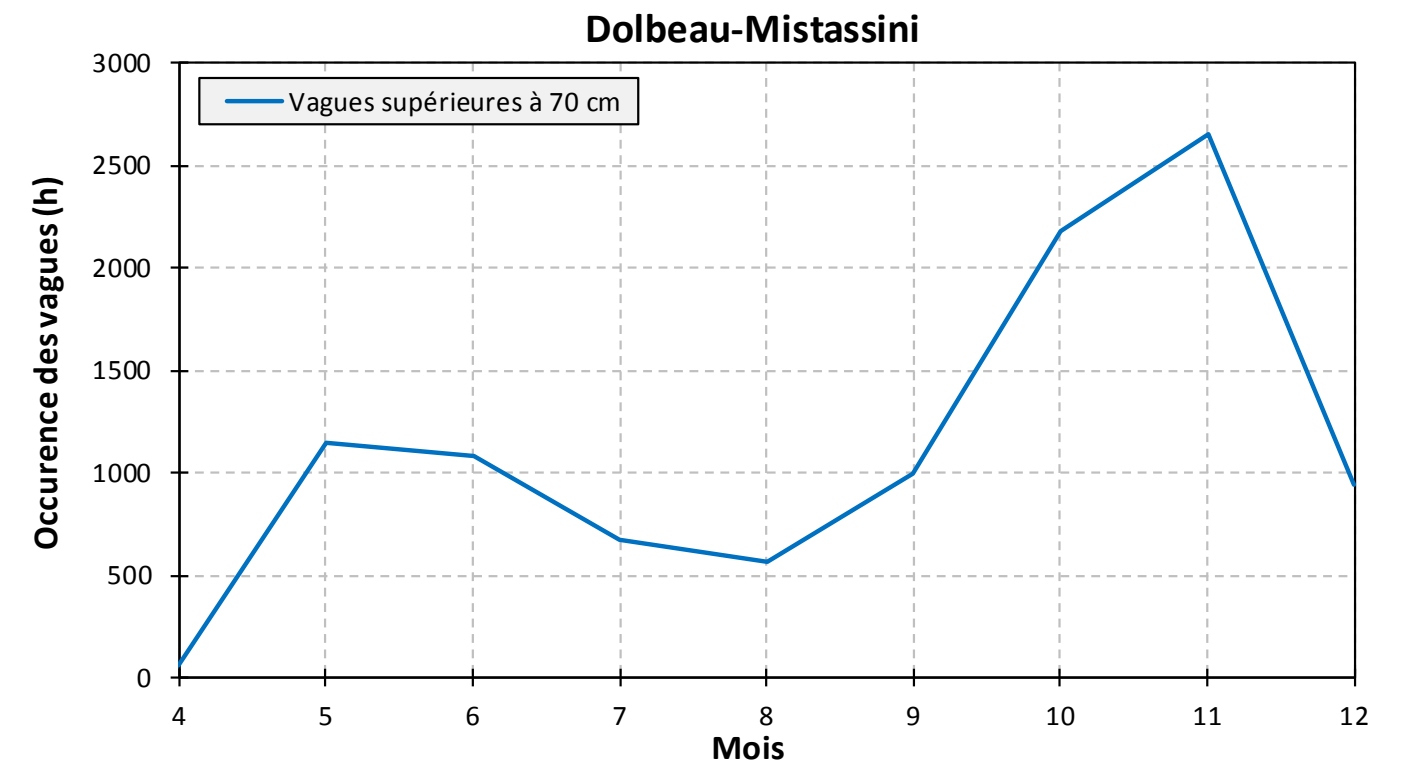
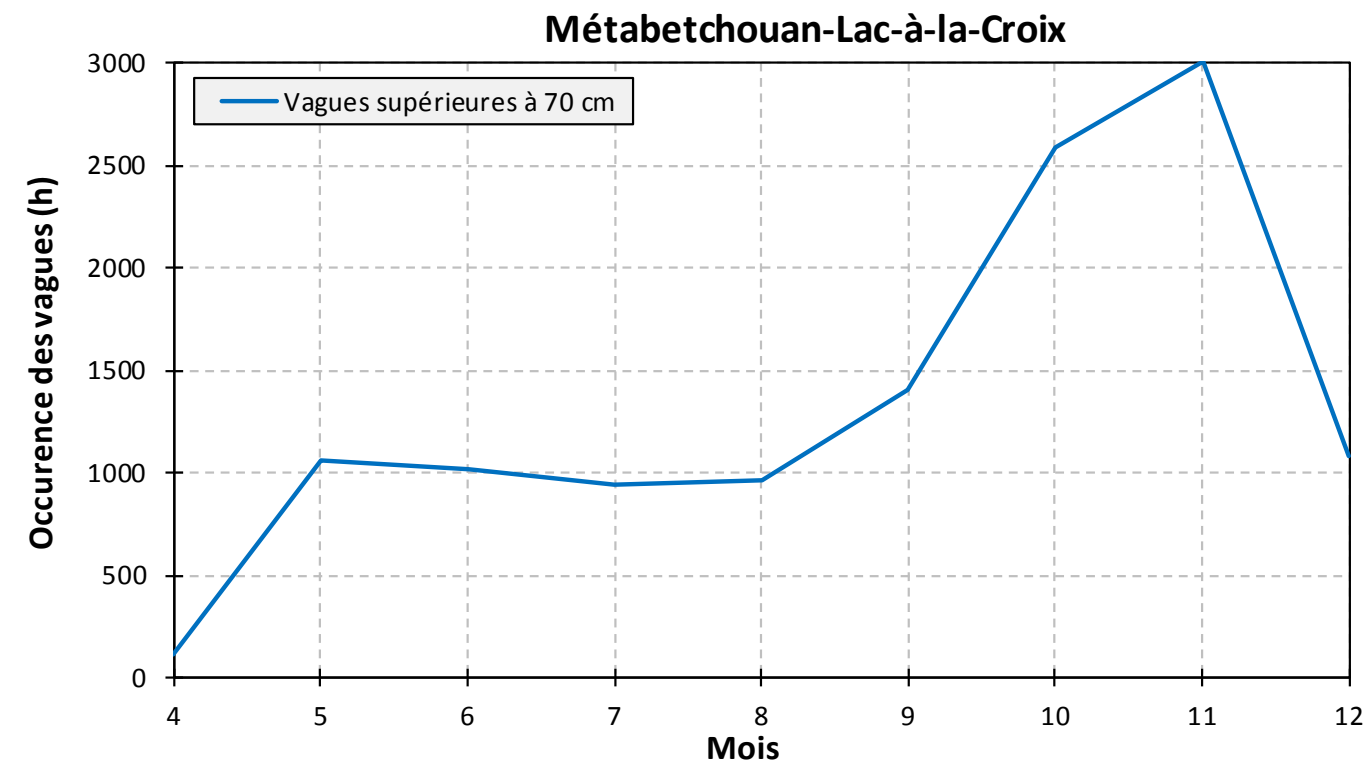


Figure 12.1: Distribution saisonnière des vagues sur une période de 23 ans

12.2 Distribution saisonnière des volumes érodés

Une analyse de la distribution mensuelle des volumes érodés à long terme a été réalisée afin de dresser un portrait des variations saisonnières de la problématique d'érosion des berges du lac Saint-Jean. Pour procéder à ce type d'analyse, les résultats des simulations de référence des conditions historiques de 1992 à 2014, présentés à la section 9, ont été traités. Pour chacun des mois de la période d'eau libre, les volumes de sédiments érodés ont été cumulés sur 23 ans et comparés au volume total dans le but de mettre en évidence la contribution relative de chacun de ces mois. La figure 12.2 illustre les résultats obtenus.

La figure 12.2 montre que les volumes érodés sont les plus élevés durant la saison d'automne (octobre et novembre) avec plus de 50% du volume total. Aux mois d'octobre et de novembre, les volumes érodés sont environ 2 à 3 fois supérieurs aux volumes érodés durant les autres mois d'eau libre. L'importance relative des volumes érodés en automne s'explique principalement par la fréquence accrue des tempêtes durant cette saison, tel qu'illustré à la figure 12.1.

Soulignons que durant la saison d'automne, la fréquence élevée des tempêtes coïncide avec une période de niveau haut du lac, ce qui a tendance à accentuer les effets d'érosion, et notamment l'érosion transversale rapide lors des tempêtes.

Une légère augmentation des volumes érodés peut également être observée durant la fin du printemps (mai et juin) comparativement à l'été (juillet et août). La fréquence légèrement plus élevée des tempêtes durant la fin du printemps en est la cause. Les niveaux d'eau sont également plus hauts à la fin du printemps, mais les résultats montrent que la combinaison de fréquence et d'intensité des tempêtes est le facteur dominant.

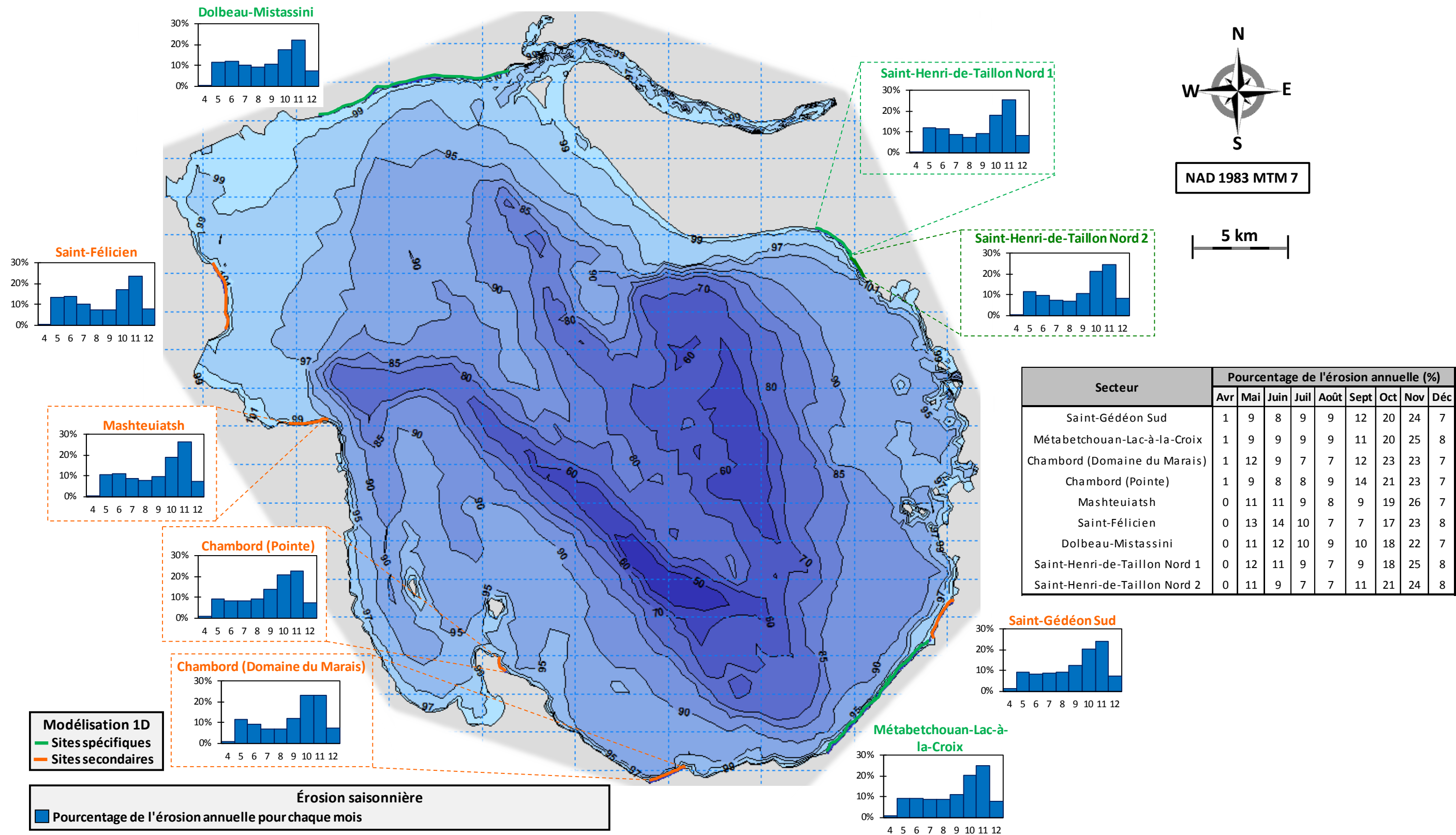


Figure 12.2: Synthèse des résultats de l'analyse de l'érosion saisonnière

13 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Dans le cadre du renouvellement du Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean (PSBLSJ), Rio Tinto Alcan a confié à Lasalle | NHC le mandat de réaliser une importante étude de modélisation des berges du lac. L'étude visait à développer différents modèles numériques afin de représenter adéquatement les phénomènes associés aux processus d'érosion et d'intégrer les données pertinentes recueillies au fil des ans.

La mise en œuvre des modèles numériques calibrés a permis d'évaluer l'impact potentiel des changements climatiques sur l'érosion, l'ampleur des surcotes dues aux vents sur le lac, l'influence de la gestion des niveaux d'eau du lac sur l'érosion à long terme pour huit secteurs critiques et les interventions ayant le meilleur potentiel de protection contre les problèmes d'érosion observés dans certaines zones.

Les principales étapes de l'étude et leurs résultats sont résumés dans les paragraphes suivants.

Analyse des changements climatiques

L'augmentation future des températures de l'air prédite par la plupart des modèles climatiques aura pour effet de retarder la prise des glaces des lacs à l'automne et de devancer leur départ au printemps, augmentant ainsi la période d'eau libre et la durée pendant laquelle les berges seront exposées aux vagues de tempêtes.

Suivant ce raisonnement, la période d'eau libre, liée aux températures de l'air, a été choisie comme indicateur (ou proxy) pour quantifier l'impact des changements climatiques sur l'érosion des berges.

La comparaison des températures de l'air simulées par des modèles climatiques en conditions actuelles et futures a permis d'établir que la période d'eau libre serait allongée en moyenne de 17 jours à l'horizon 2035. Ce changement (ou delta) a été utilisé pour ajuster les séries temporelles des simulations de vagues en conditions futures.

Analyse des niveaux d'eau (surcotes et décotes)

L'analyse des niveaux d'eau historiques mesurés aux trois jauges de mesures du lac a permis d'évaluer les gammes de surcotes et décotes dues aux vents actuellement observées sur le lac. Pour près de 98% du temps, celles-ci sont de l'ordre de +/- 10 cm. Pour les tempêtes très fortes, les écarts de niveaux entre les trois jauges peuvent parfois atteindre des maximums de l'ordre de 25-30 cm, avec quelques rares extrêmes supérieurs à 40 cm.

Pour élargir l'étude des surcotes à l'ensemble du lac, un modèle numérique hydrodynamique a été mis en œuvre pour simuler le soulèvement de la masse d'eau sous différentes tempêtes de vents, historiques et synthétiques.

Cette analyse a d'abord permis de constater que, selon la direction des vents, les surcotes maximales ne sont pas forcément capturées par les mesures de niveau d'eau des trois jauges installées sur le lac.

Elle a également permis d'établir une nouvelle pondération des mesures de niveau pour calculer un niveau moyen reflétant mieux le niveau moyen réel du lac.

Modélisation des vagues

Un modèle numérique de simulation des vagues générées par le vent a été mis en œuvre pour simuler différents régimes de vagues sur le lac. Calibré sur des mesures effectuées à l'automne 2014, ce modèle a été utilisé pour simuler le régime actuel (1992-2014) et différents régimes futurs (2015-2037).

Le régime actuel a été simulé avec les données historiques des niveaux du lac, les données historiques de vents mesurées à la station météorologique de Mistook et les périodes d'eau libre déterminées à partir des températures de l'air historiques mesurées à la station météorologique de Roberval. En conditions futures, cinq scénarios de niveaux d'eau ont été testés, en maintenant les vents constants mais en modifiant les périodes d'eau libre par un delta de 17 jours.

Les changements apportés par les différents scénarios de gestion du niveau d'eau et l'allongement de la période d'eau libre ont par la suite été évalués en utilisant les différents régimes de vagues pour modéliser l'érosion des berges à long terme.

Analyse des problèmes d'érosion

La simulation de l'érosion des berges à l'aide de deux principaux modèles numériques a permis de mettre en évidence les mécanismes donnant lieu au développement de zones d'érosion problématiques, se traduisant par un recul important du trait de côte. L'analyse de l'évolution du trait de côte par transport longitudinal donne le portrait érosif à long terme (23 ans) alors que l'étude du transport transversal permet d'évaluer la réponse aux événements de tempêtes (court terme, 72 heures).

Parmi les huit grands secteurs de plage, trois ont fait l'objet d'une étude détaillée d'interventions potentielles visant à contrôler l'érosion à long terme due aux gradients de transport longitudinal. Ces trois sites sont les sites spécifiques identifiés par Rio Tinto Alcan, soit Dolbeau-Mistassini, le secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix et Saint-Henri-de-Taillon Nord. Les conclusions présentées ci-après rendent compte uniquement de la comparaison des variantes entre elles et de leur efficacité quant à corriger la problématique identifiée dans chaque secteur :

- Dolbeau-Mistassini : Les résultats montrent que la mise en place de champs d'épis dans les zones des bornes 40 et 100 permet de protéger les tronçons de plage en érosion. Parmi les variantes testées, la variante présentant des épis plus courts (45 à 60 m), mais plus nombreux et plus rapprochés, s'est révélée être la plus performante. Des simulations avec un rechargement sans épis dans ces deux secteurs montrent qu'il est possible de protéger localement la ligne de côte à long terme de cette façon. Cette avenue pourrait donc s'avérer moins coûteuse que la mise en place d'épis. Quant à la zone de la borne 60, les résultats montrent qu'à volume donné, un rechargement plus étalé offre de meilleures performances;
- Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, zone de la borne 3 : les résultats des simulations indiquent que les épis construits durant l'hiver 2014 dans la zone de la borne 3 permettent une protection de la

plage en érosion. Le troisième épi contribue à réduire considérablement l'apport de sédiments vers l'embouchure de la rivière Belle-Rivière, auparavant soumise à un ensablement notable.

- Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, zone de la borne 19 : dans la zone de la borne 19, les variantes de rechargement suffiraient à protéger le tronçon de plage contre l'érosion longitudinale. La variante présentant des épis, elle-même accompagnée de rechargements, est également efficace mais semble plus complexe à mettre en œuvre;
- Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, zone de la borne 35 : les résultats des simulations indiquent que les épis construits en 2012 dans la zone de la borne 35 permettent une protection de la plage en érosion vis-à-vis de la borne et plus à l'est. À la borne 36, la situation connaît une certaine amélioration mais cette zone demeure exposée;
- Saint-Henri-de-Taillon Nord : les résultats montrent que les deux principales zones en érosion peuvent être adéquatement protégées à l'aide d'épis permettant une forte réduction de la dérive littorale vers le nord-ouest.

Dans le cas des autres sites présentant des ouvrages de contrôle, des simulations à partir d'un état initial pré-construction des ouvrages ont permis d'évaluer l'efficacité des ouvrages ainsi que les éventuels impacts associés.

L'analyse du transport transversal a permis de classer les différents sites en fonction de leur indice d'érosion traduisant leur propension à l'érosion en période de tempête. Ainsi, d'une manière générale, les secteurs situés dans l'ouest du lac (Dolbeau-Mistassini, Saint-Félicien) présentent un indice d'érosion relativement faible par rapport aux sites de l'est du lac (Métabetchouan-Lac-à-la-Croix, Saint-Henri-de-Taillon Nord, Saint-Gédéon Sud ou Chambord (pointe et Domaine du Marais)) du fait de leur morphologie, impliquant une pente douce du profil, combinée à des tempêtes moins fréquentes.

Impact des scénarios de gestion du niveau d'eau sur l'érosion des berges

L'analyse des mécanismes de transport sédimentaire selon différentes échelles de temps (transport longitudinal à long terme et transport transversal à court terme) permet de montrer qu'à cause de la spécificité de chacun des sites de plage du lac Saint-Jean, la réponse à un abaissement du niveau du lac en termes de volumes d'érosion est variable. En réponse à une tempête, donc à court terme, la tendance est généralement à la réduction des volumes d'érosion. Toutefois, ce sont les secteurs les plus sensibles à l'érosion transversale (pente raide du profil) qui conduisent aux variations de volumes les plus faibles alors que les sites les moins sensibles conduisent à une réduction plus marquée des volumes érodés. À long terme, selon les sites, la tendance peut être soit à la baisse soit à la hausse, notamment dans les zones présentant des épis dont l'efficacité est réduite pour des niveaux d'eau inférieurs au niveau de conception. Ainsi, intervenir à l'échelle globale du lac par un abaissement du niveau d'eau n'apporte pas une solution systématique à tous les sites présentant une problématique d'érosion.

De plus, outre l'aspect d'érosion des berges et des plages du lac, un abaissement important du niveau d'eau du lac pourrait conduire à des problématiques connexes liées aux modifications de la dynamique sédimentaire et de la morphologie des embouchures et deltas de rivières dans le lac. Ces aspects n'ont

pas été traités ici puisqu'ils font l'objet d'une étude d'impact réalisée par la firme WSP pour le compte de Rio Tinto Alcan dans le cadre du PSBLSJ (réf. [17]).

Les interventions locales développées spécifiquement en fonction du comportement des différents sites semblent donc être une approche à privilégier afin d'optimiser l'effet local sur l'érosion et de minimiser d'éventuels impacts par ailleurs. Les résultats de l'analyse des variantes d'aménagement dans les sous-secteurs en érosion des sites spécifiques montrent qu'une étude ciblée avec les outils adéquats permet d'évaluer et d'optimiser l'efficacité de scénarios d'intervention locale.

Impact du prolongement de la période d'eau libre sur l'érosion des berges

L'analyse de l'impact du prolongement de 17 jours de la période d'eau libre susceptible de se produire sur la période de 2015 à 2037 (fonte des glaces 7 jours plus tôt au printemps et prise des glaces 10 jours plus tard à la fin de l'automne) sur l'érosion des plages du lac Saint-Jean montre que l'accroissement des volumes d'érosion s'établit à environ 7% en moyenne à long terme (période de 23 ans). Cette augmentation équivaut globalement à l'érosion générée par 1,5 année moyenne, pour les deux modes de transport sédimentaires étudiés (longitudinal et transversal).

Distribution saisonnière de l'érosion

Les volumes érodés sont les plus élevés durant la saison d'automne (octobre et novembre) avec plus de 50% du volume total. Aux mois d'octobre et de novembre, les volumes érodés sont environ 2 à 3 fois supérieurs aux volumes érodés durant les autres mois d'eau libre. L'importance relative des volumes érodés en automne s'explique principalement par la fréquence accrue des tempêtes durant cette saison. La distribution saisonnière de l'érosion est en effet directement reliée à la distribution saisonnière des vagues.

Recommandations

L'ensemble des résultats présentés au cours de cette étude ont été obtenus à l'aide de modèles numériques calibrés sur la base de données caractérisant le milieu physique du lac Saint-Jean. Toutefois, ces données, bien que d'une utilité précieuse, se sont révélées incomplètes pour un exercice optimal de validation des modèles et de caractérisation quantitative des sites étudiés (on note en particulier l'absence de relevés bathymétriques systématiques et fréquents dans certains secteurs). Il nous apparaît alors important de mettre en place un protocole de suivi détaillé, qui pourrait s'en tenir dans un premier temps aux trois sites spécifiques identifiés par Rio Tinto Alcan (Dolbeau-Mistassini, Métabetchouan-Lac-à-la-Croix et Saint-Henri-de-Taillon Nord), qui forment un échantillon représentatif des différents secteurs du lac.

Les grandes lignes d'un tel protocole se traduiraient par des relevés bathymétriques et topographiques des plages réalisés sur une base régulière au cours de l'année avec des relevés supplémentaires immédiatement avant et après un épisode de tempête significatif. Ces relevés permettraient alors d'effectuer des bilans des volumes d'érosion pour différentes échelles de temps (court, moyen et long termes). Il est bien entendu recommandé de poursuivre ce suivi sur plusieurs années afin de pouvoir établir des tendances d'une année à l'autre mais aussi d'identifier les mécanismes saisonniers récurrents.

Un tel suivi effectué sur une zone faisant l'objet d'un rechargement permettrait également d'évaluer le comportement du massif de rechargement et d'éventuellement procéder à des ajustements visant à en augmenter l'efficacité (pente plus douce, mise en place de butée en pied de plage, etc.).

Finalement, une campagne d'échantillonnage granulométrique permettrait d'éliminer, sinon de réduire, les incertitudes liées à ce paramètre.

L'ensemble des données collectées lors de ces campagnes de suivi constituerait une base beaucoup plus solide pour interpréter l'évolution des secteurs de plage du lac, raffiner le choix des paramètres de calibrage des modèles utilisés et mettre au point des interventions de stabilisation optimales.

14 RÉFÉRENCES

- [1] SERVICE HYDROGRAPHIQUE ET OcéANOGRAPHIQUE DE LA MARINE (2015). *Houles, vagues et littoral*. <http://www.shom.fr/les-activites/activites-scientifiques/oceanographie/houle-vagues-et-littoral/>.
- [2] ENVIRONNEMENT CANADA (2015). *Guide de météo marine national - Chapitre 3 : l'état de la mer*. <https://www.ec.gc.ca/meteo-weather/>.
- [3] GEOMORPHIC SOLUTIONS (2010). *Introduction to Erosional Sandy Beach Assessment*. Prepared for the International Joint Commission as part of the International Upper Great Lakes Study. October 2010
- [4] SÉCURITÉ PUBLIQUE QUÉBEC (2015). *Les solutions possibles pour contrer l'érosion des berges*. <http://www.securitepublique.gouv.qc.ca/securite-civile/surveillance-territoriale/erosion-berges/solutions.html>.
- [5] ANDRÉ MARSAN & ASSOCIÉS LAVALIN (1983). *Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean – Étude d'impact sur l'environnement et le milieu social*. Rapport préparé pour Alcan, septembre 1983.
- [6] ROPARS, Y. (2015). *Érosion des berges du lac Saint-Jean – Étude des vents – Rapport technique*. Préparé pour Lasalle|NHC, pour le compte de Rio Tinto Alcan, mars 2015.
- [7] ROPARS, Y. (2015). *Érosion des berges du lac Saint-Jean – Étude des tempêtes – Rapport technique*. Préparé pour Lasalle|NHC, pour le compte de Rio Tinto Alcan, février 2016.
- [8] SAUCET, J.-P. & RENAUT, N. (1996). *La prise et le départ des glaces sur les lacs et réservoirs – Logiciel ÉVOGEL*. Rapport R.1285 du Groupe-Conseil LaSalle, préparé pour Hydro-Québec.
- [9] DENOLAN, M.A. (1982). *The dependence of the aerodynamics drag coefficient on wave parameters, in the First International Conference on Meteorology and Air-Sea Interaction of the Coastal Zone*, Amer. Met. Soc., Boston, 381-387, 1982.
- [10] GRAF, W. H., N. MERZI & C. PERRINJAQUAT (1984). *Aerodynamic drag measured at a nearshore platform on Lake Geneva*. Arch. Met. Geoph. Biocl., Ser. A 33, 151-173, 1984.
- [11] ARCEMENT, G.J. JR. & V.R. SCHNEIDER (1990). *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains*, USGS Water Supply Paper 2339.
- [12] Le Clainche, Y. (2015). *Étude et modélisation de l'érosion des berges du lac Saint-Jean – Campagne automnale de mesure de vagues*. Rapport préparé par Environnement Illimité pour le compte de Lasalle|NHC, janvier 2015.
- [13] KOMEN, G. J., CAVALERI, L., DONELAN, M., HASSELMANN, K., HASSELMANN, S., & JANSSEN, P. A. E. M. (EDS.), (1994). *Dynamics and modelling of ocean waves*. Cambridge University Press.

-
- [14] HOLTHUIJSEN, L. H., BOOIJ, N. & HERBERS, T. H. C. (1989). *A Prediction Model for Stationary, Short-crested Waves in Shallow Water with Ambient Currents*. Coastal Engineering, 13, 23-54.
 - [15] GEERNAERT, G. L. & W.J. PLANT (1990). *Surface waves and fluxes – Volume 1 - Current theory*. Kluwer Academic Publishers, 336 pages.
 - [16] HALLERMEIER, R.J. (1981). *A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate*. Coastal Engineering, 4, 253-277.
 - [17] WSP (2015). *Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean 2017-2026 - Étude d'impacts sur l'environnement*. Rapport produit pour Rio Tinto Alcan. Pagination multiple + annexes.

ANNEXE A

Recueil photographique des images MODIS

LISTE DES FIGURES

Figure A1: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 16, 22, 24 et 26 novembre 2004	A2
Figure A2: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 27, 29 et 30 novembre, et 2 décembre 2004.....	A3
Figure A3: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 5, 6, 7, 9 décembre 2004.....	A4
Figure A4: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 14, 15 et 18 décembre 2004	A5
Figure A5: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 26 et 27 novembre, 1 et 7 décembre 2005.....	A6
Figure A6: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 8, 12, 15 et 19 décembre 2005	A7
Figure A7: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 3, 4, 17 et 22 décembre 2006	A8
Figure A8: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 24, 25, 29 et 31 décembre 2006	A9
Figure A9: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 10, 13, 14 et 16 janvier 2007.....	A10
Figure A10: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 21, 29, 30 novembre et 2 décembre 2008.....	A11
Figure A11: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 5, 10, 11, et 13 décembre 2008	A12
Figure A12: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 16, 18, 19 et 20 décembre 2008	A13
Figure A13: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 2, 5, 7 et 12 décembre 2009	A14
Figure A14: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 14, 16, 18, et 19 décembre 2009	A15
Figure A15: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 25 et 29 décembre 2009	A16
Figure A16 : État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 24 et 27 novembre, 3 et 10 décembre 2010...	A17
Figure A17: État du couvert de glace au lac Saint-Jean, 14, 23 et 24 décembre 2010	A18
Figure A18: État du couvert de glace au lac Saint-Jean, 26 novembre, 1, 5, et 11 décembre 2012.....	A19
Figure A 19: État du couvert de glace au lac Saint-Jean, 12, 15, 16, et 20 décembre 2012	A20
Figure A20: État du couvert de glace au lac Saint-Jean, 23 et 29 novembre, 4 et 6 décembre 2013.....	A21
Figure A21: État du couvert de glace au lac Saint-Jean, 7, 8, 12 et 13 décembre 2013	A22
Figure A22: État du couvert de glace au lac Saint-Jean, 21 novembre, 1, 2 et 5 décembre 2014.....	A23
Figure A23: État du couvert de glace au lac Saint-Jean, 7, 8, 10 et 14 décembre 2014	A24

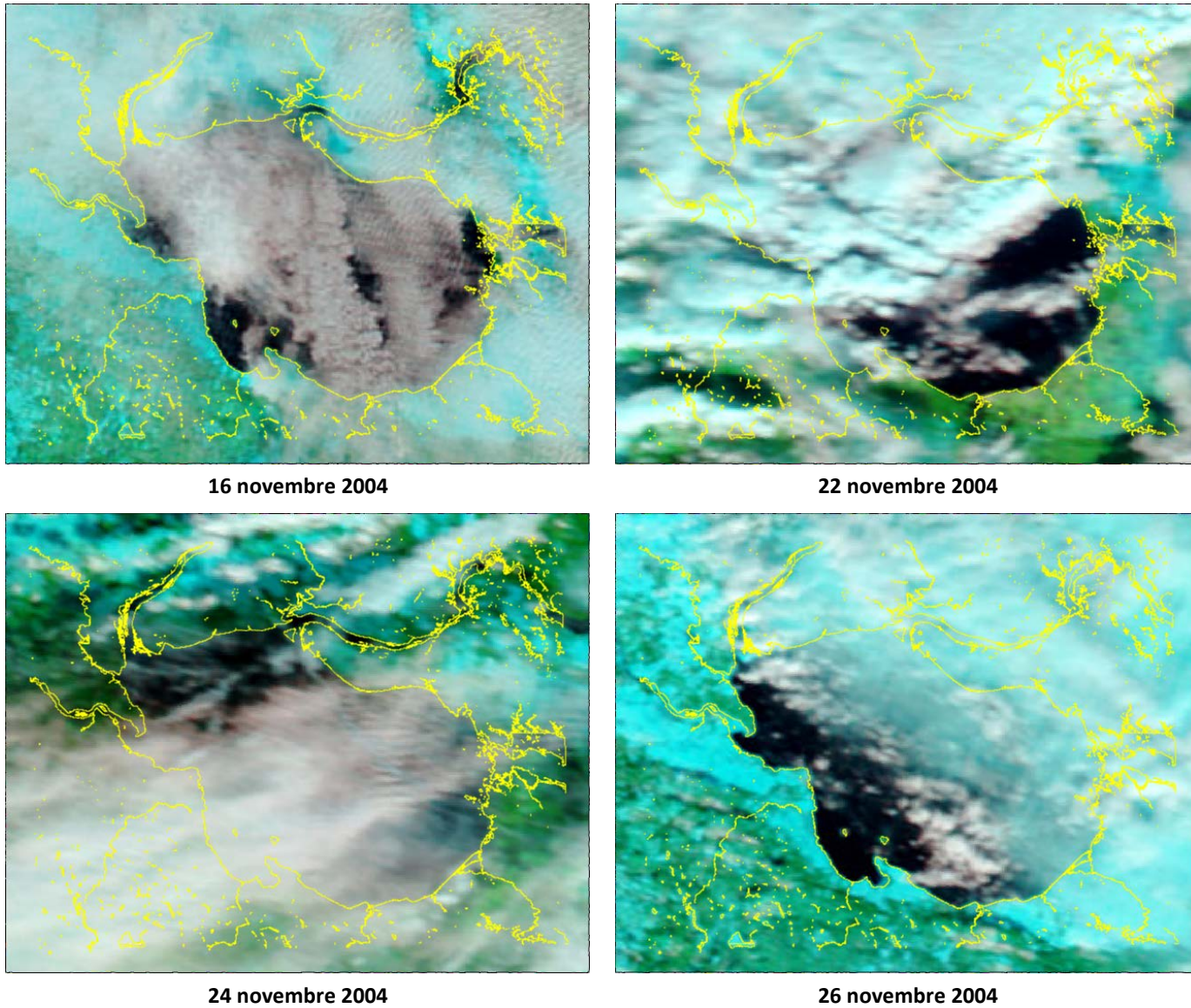
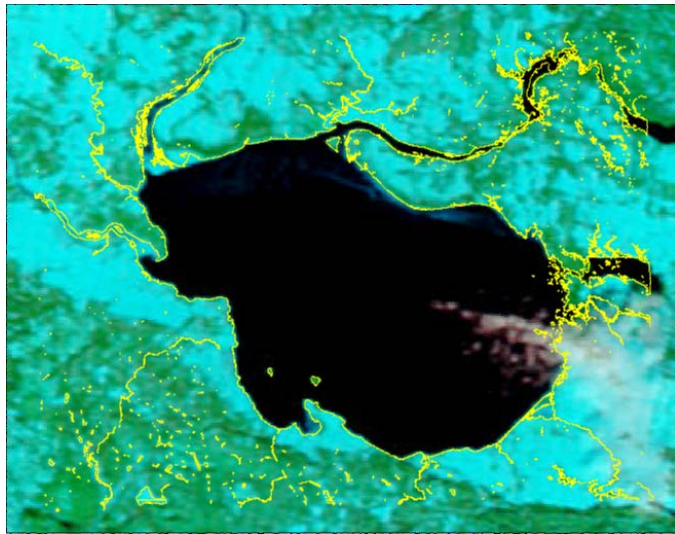
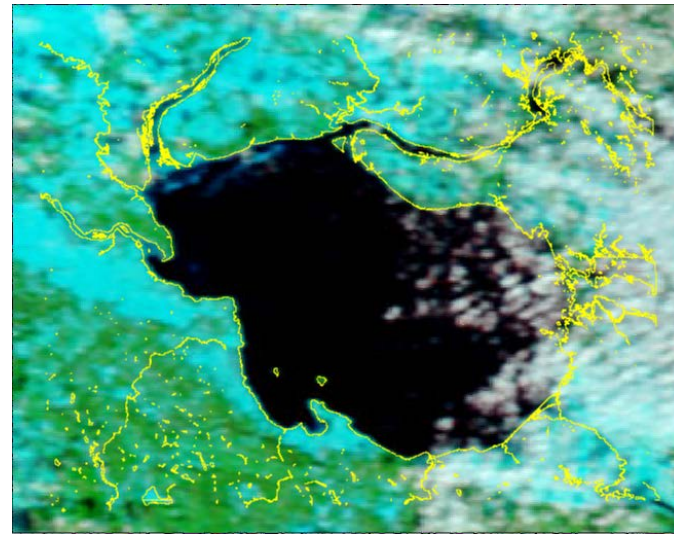


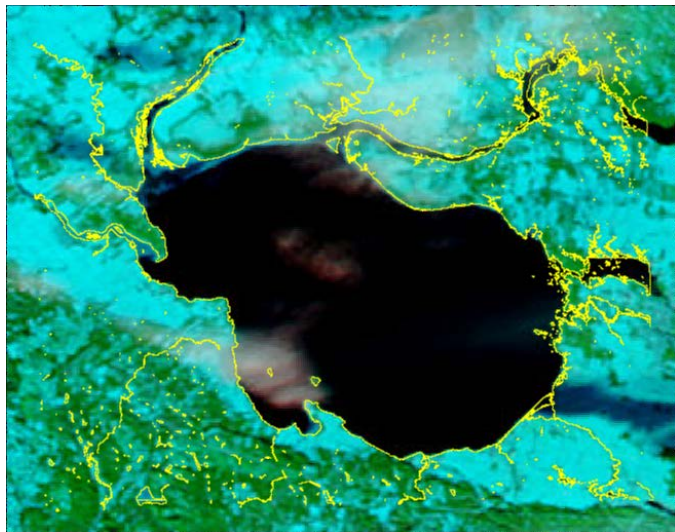
Figure A1: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 16, 22, 24 et 26 novembre 2004



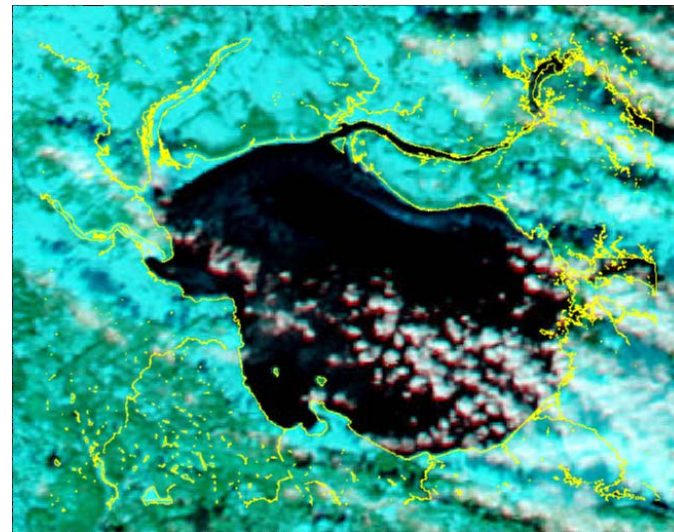
27 novembre 2004



29 novembre 2004

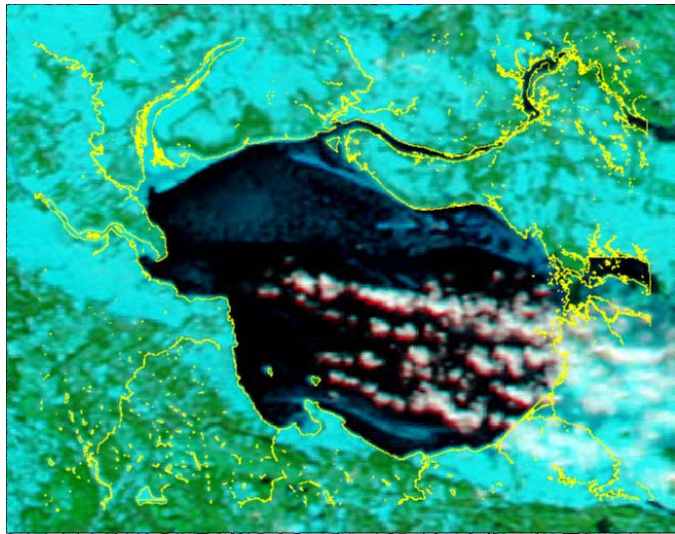


30 novembre 2004

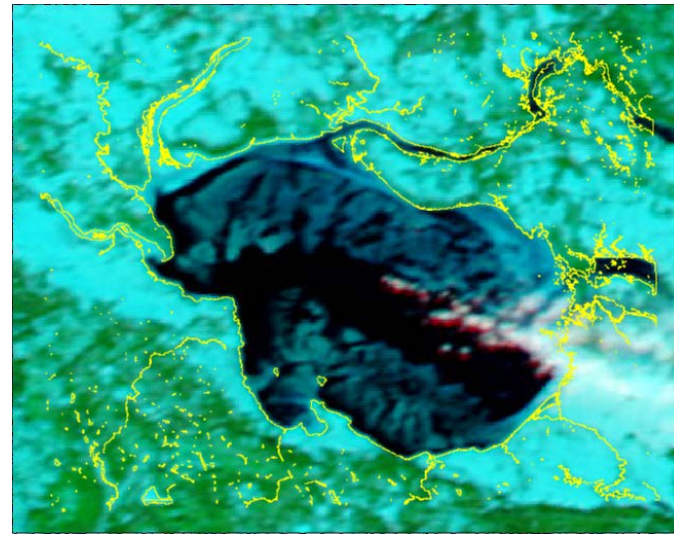


2 décembre 2004

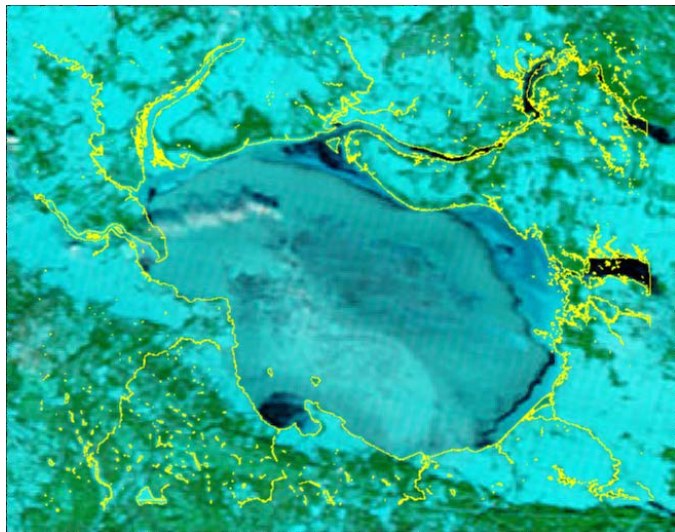
Figure A2: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 27, 29 et 30 novembre, et 2 décembre 2004



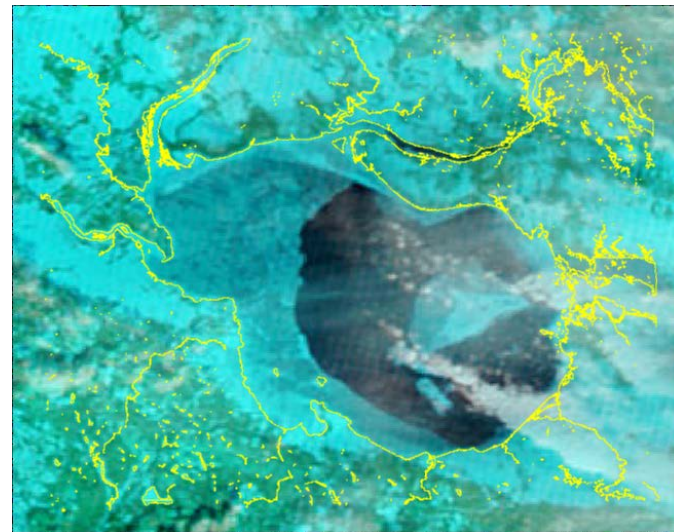
5 décembre 2004



6 décembre 2004

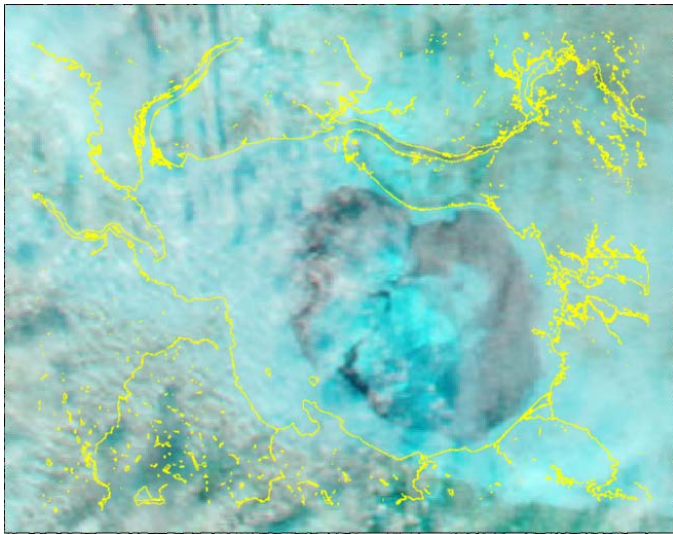


7 décembre 2004

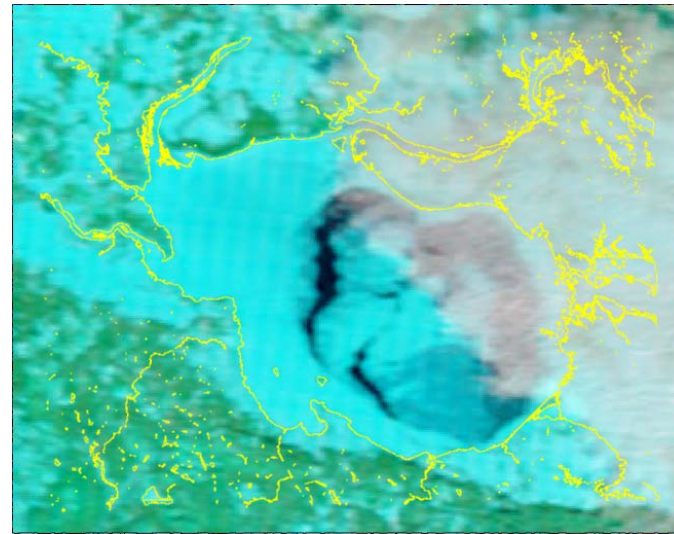


9 décembre 2004

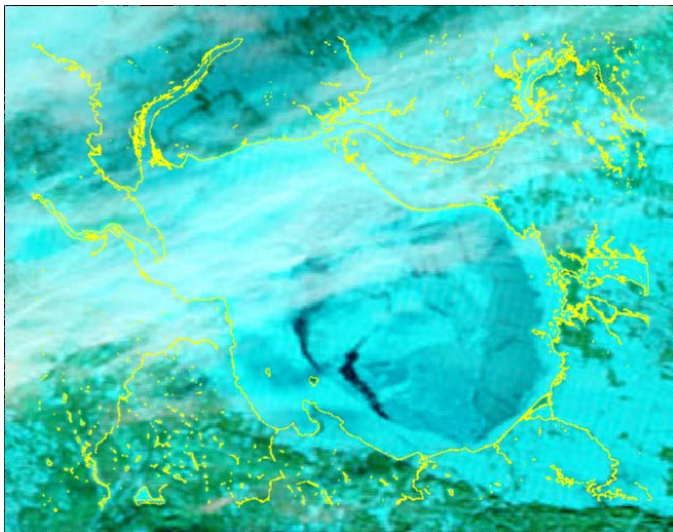
Figure A3: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 5, 6, 7, 9 décembre 2004



14 décembre 2004

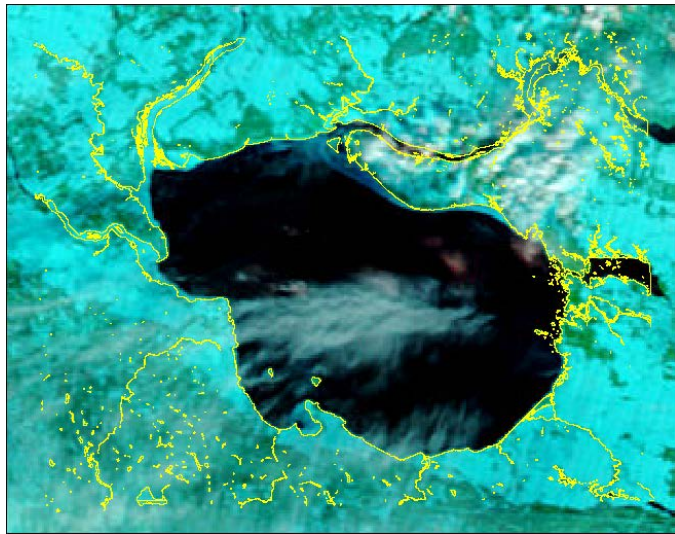


15 décembre 2004

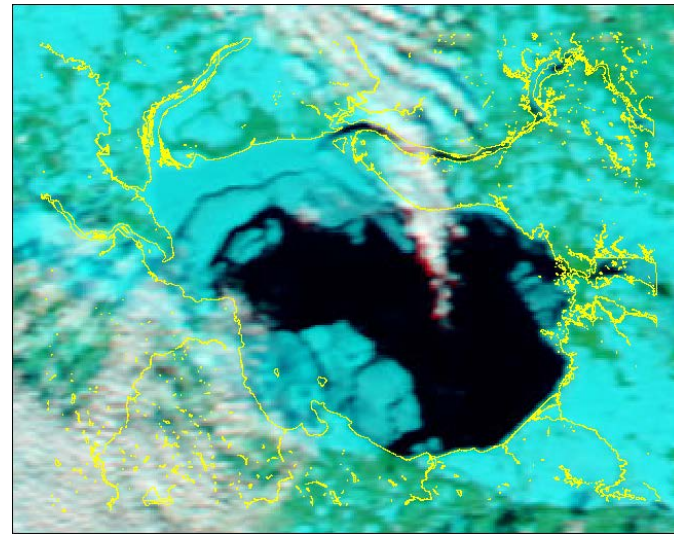


18 décembre 2004

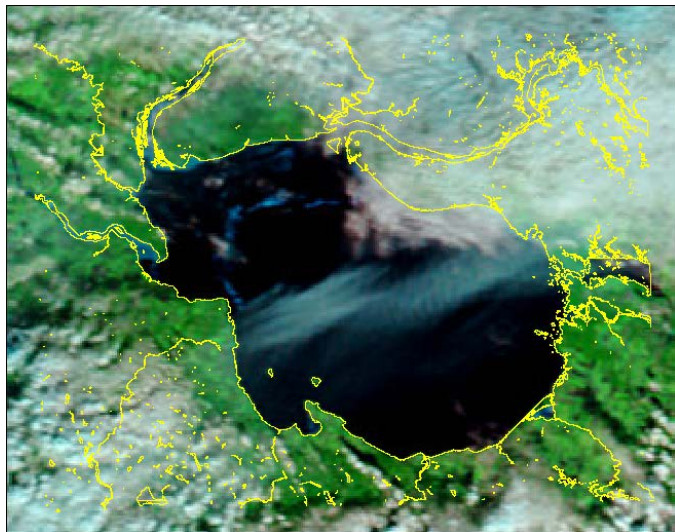
Figure A4: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 14, 15 et 18 décembre 2004



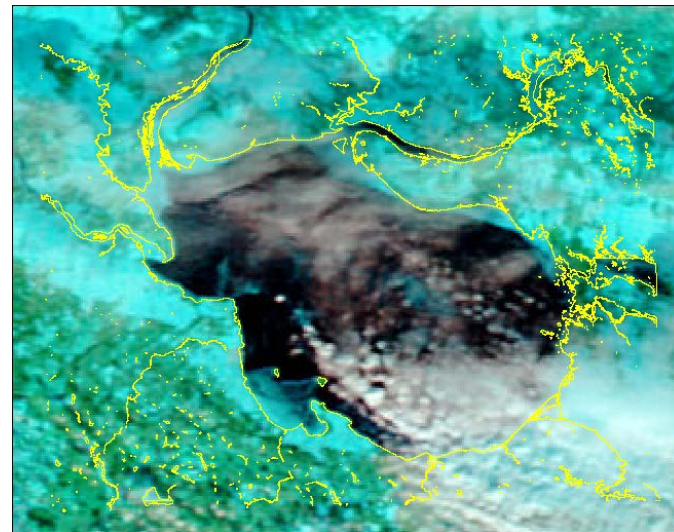
26 novembre 2005



27 novembre 2005

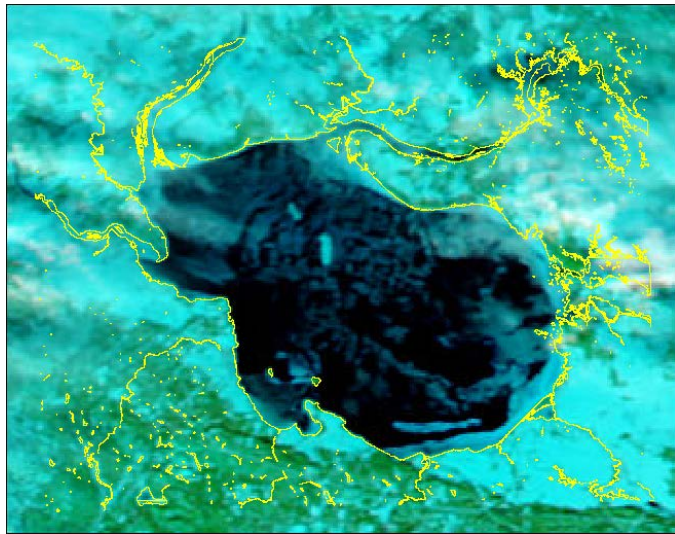


1 décembre 2005

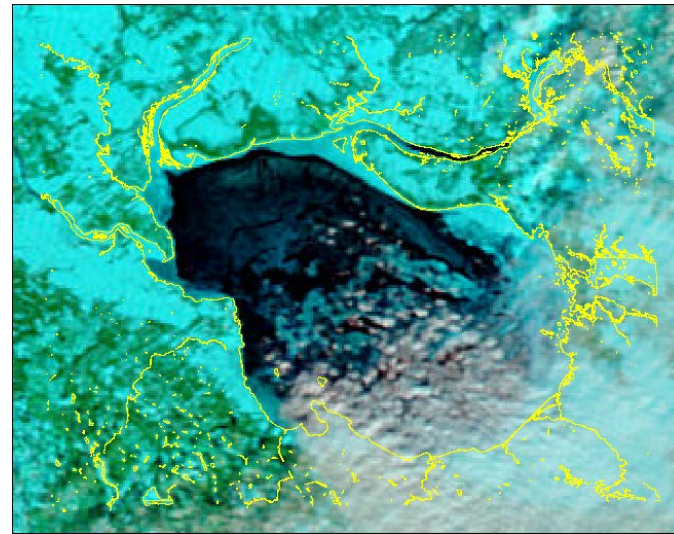


7 décembre 2005

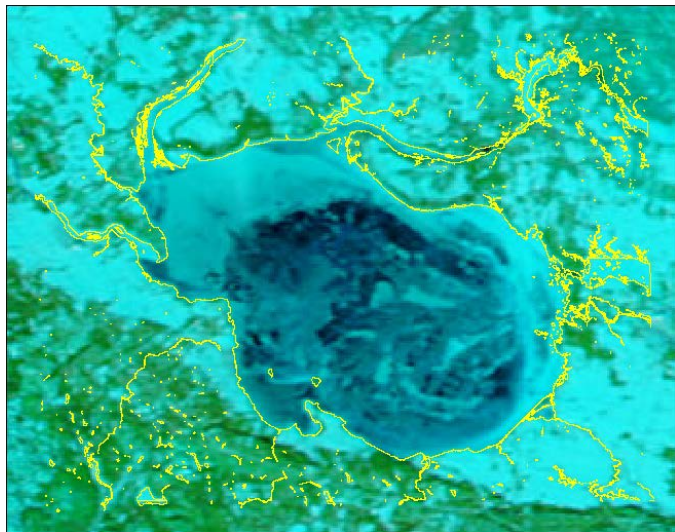
Figure A5: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 26 et 27 novembre, 1 et 7 décembre 2005



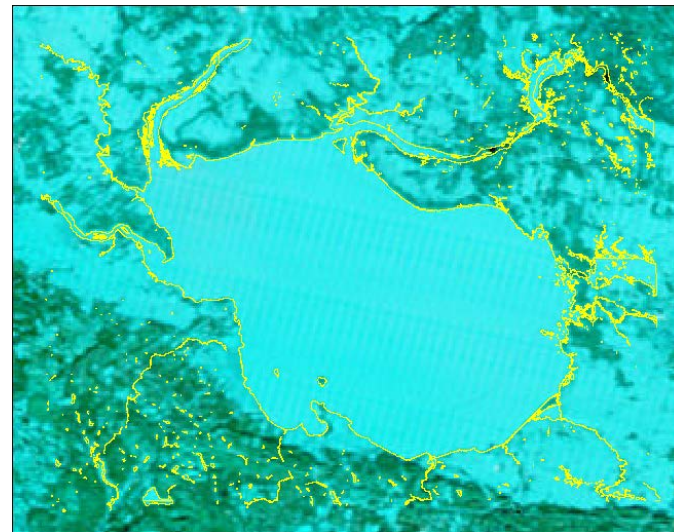
8 décembre 2005



12 décembre 2005

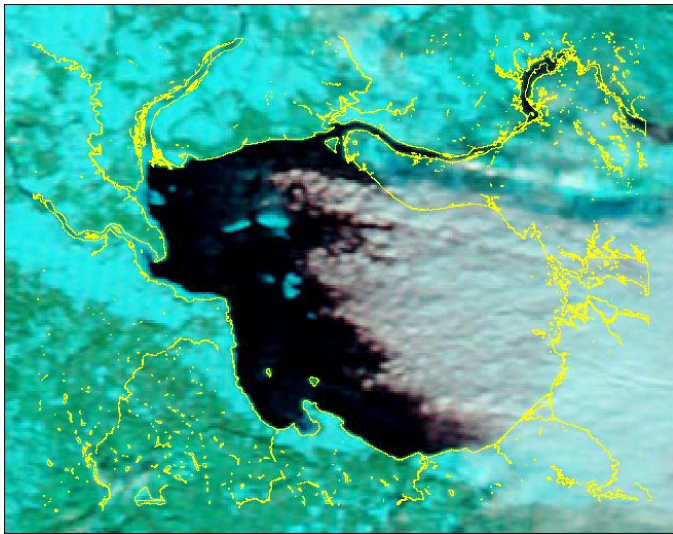


15 décembre 2005

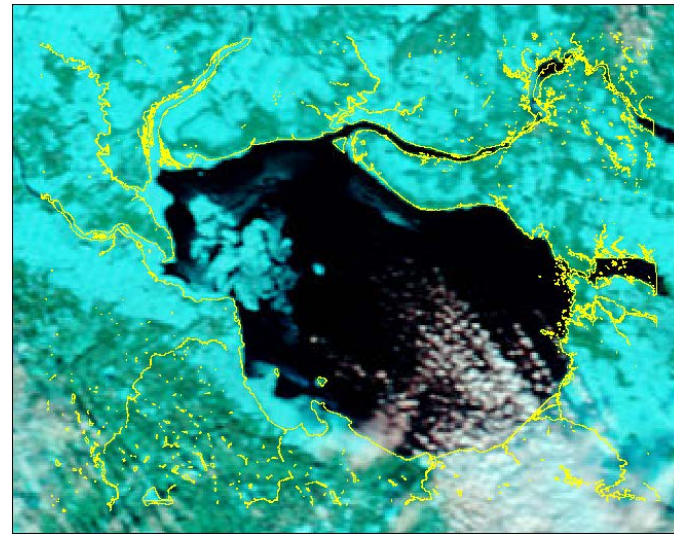


19 décembre 2005

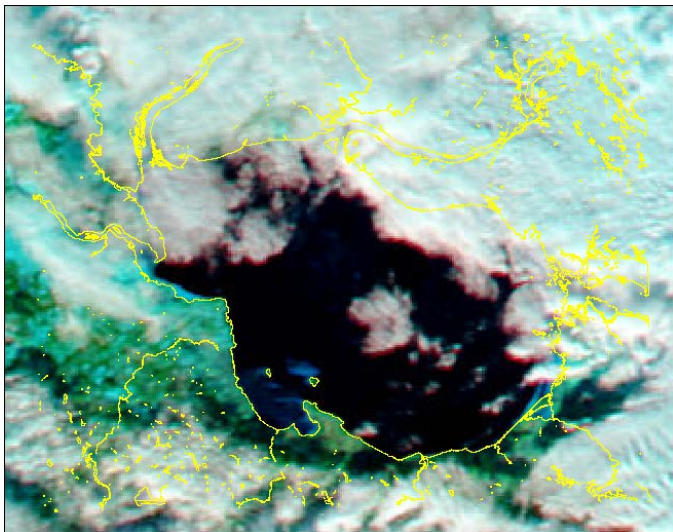
Figure A6: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 8, 12, 15 et 19 décembre 2005



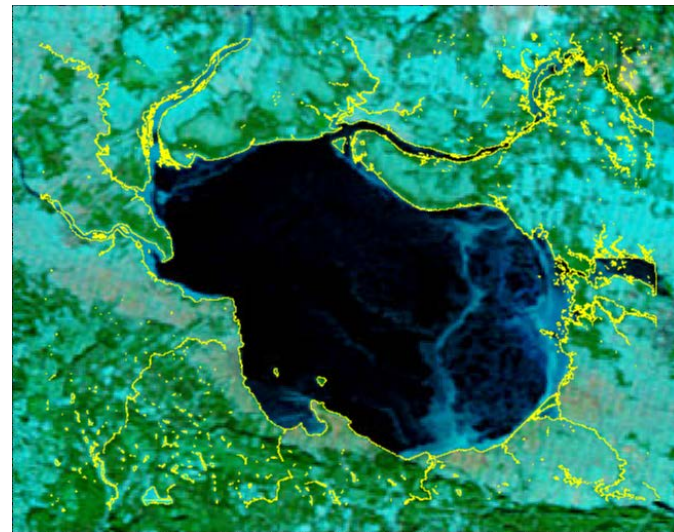
3 décembre 2006



7 décembre 2006

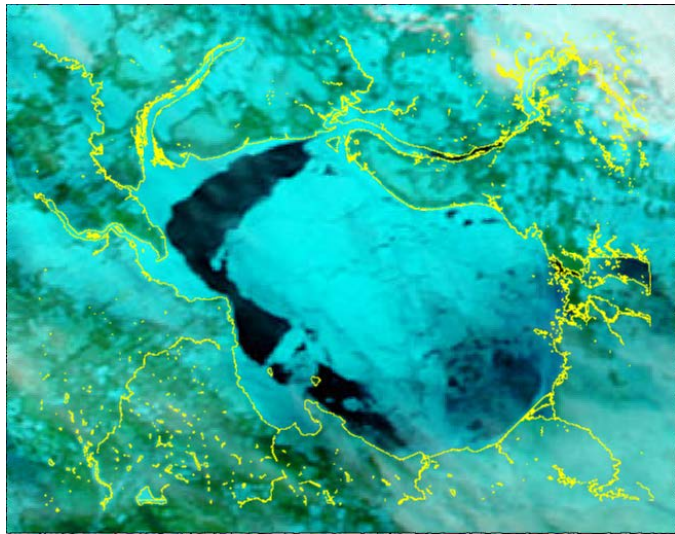


17 décembre 2006

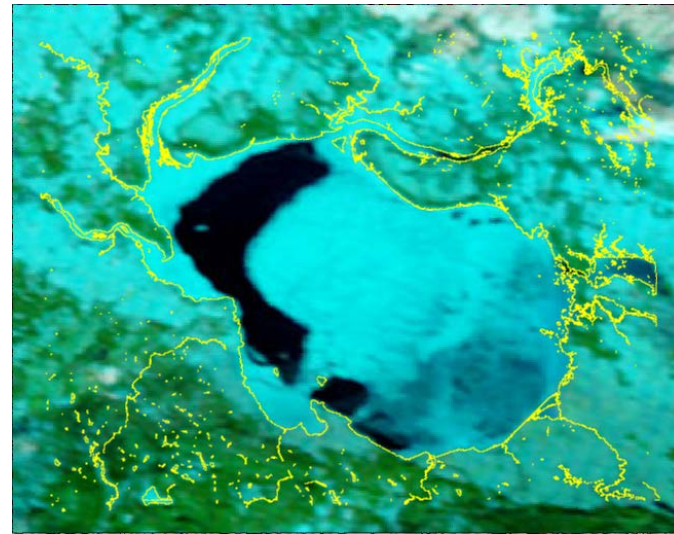


22 décembre 2006

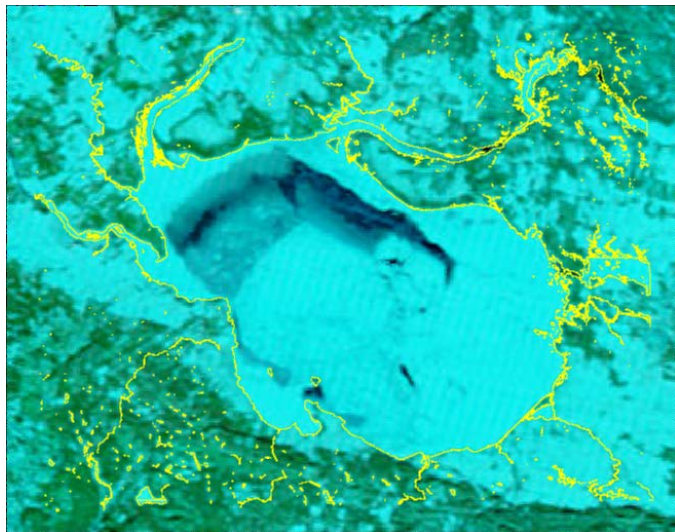
Figure A7: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 3, 4, 17 et 22 décembre 2006



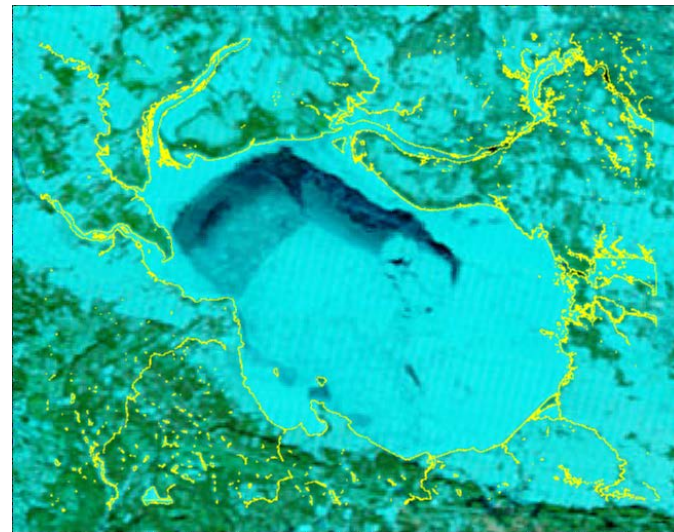
24 décembre 2006



25 décembre 2006



29 décembre 2006



31 décembre 2006

Figure A8: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 24, 25, 29 et 31 décembre 2006

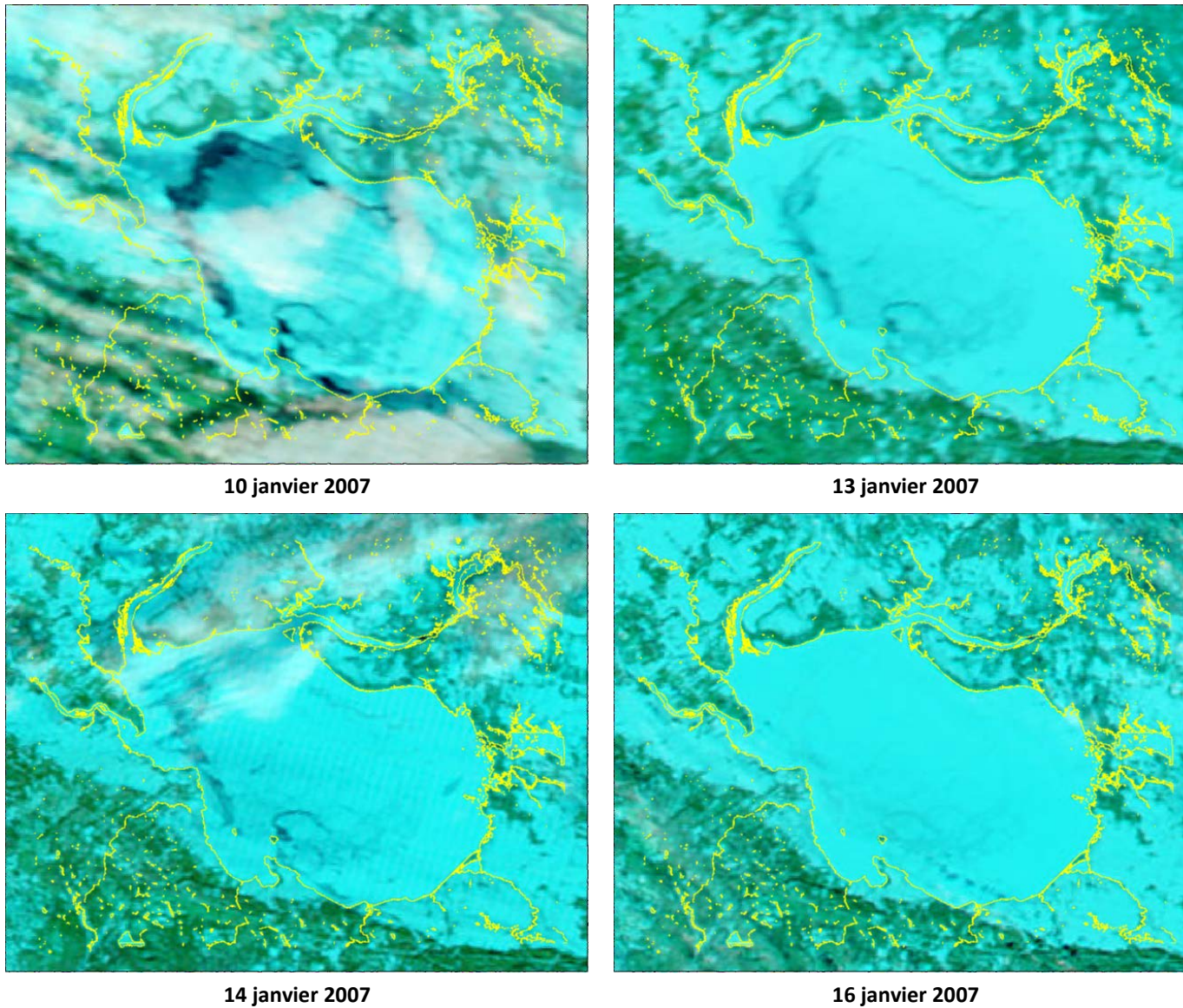
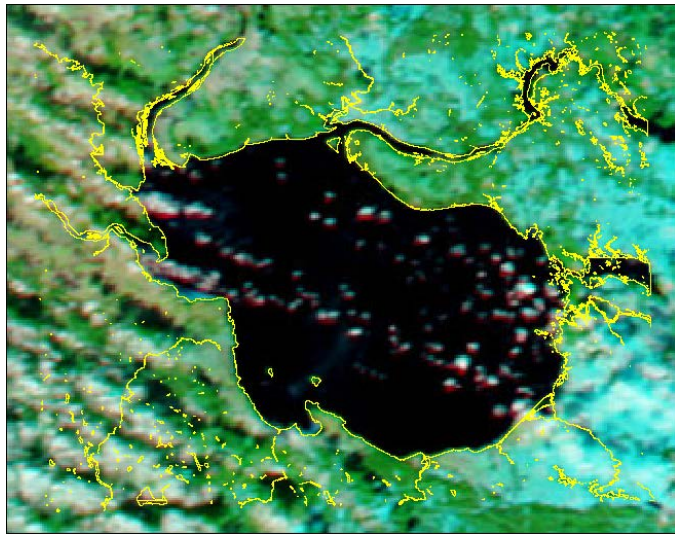
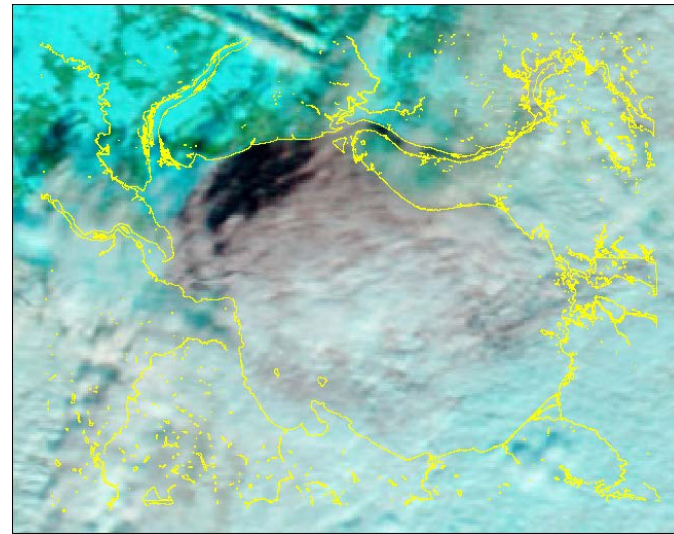


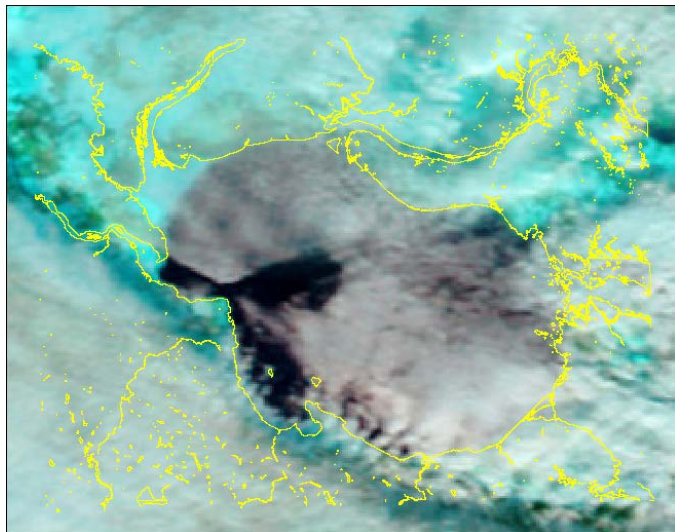
Figure A9: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 10, 13, 14 et 16 janvier 2007



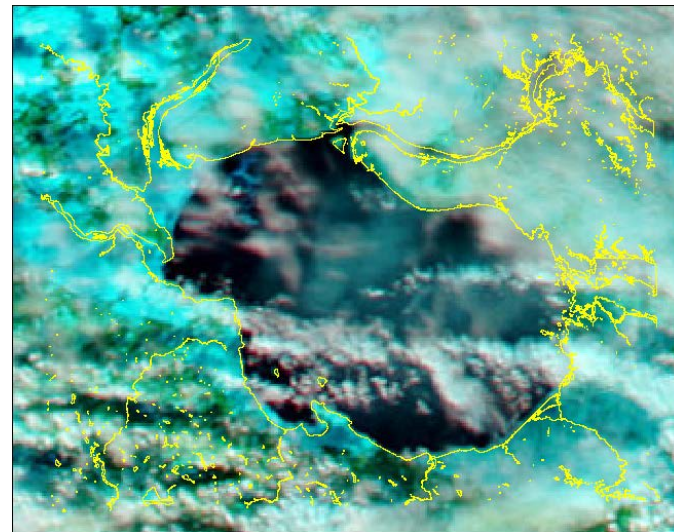
21 novembre 2008



29 novembre 2008

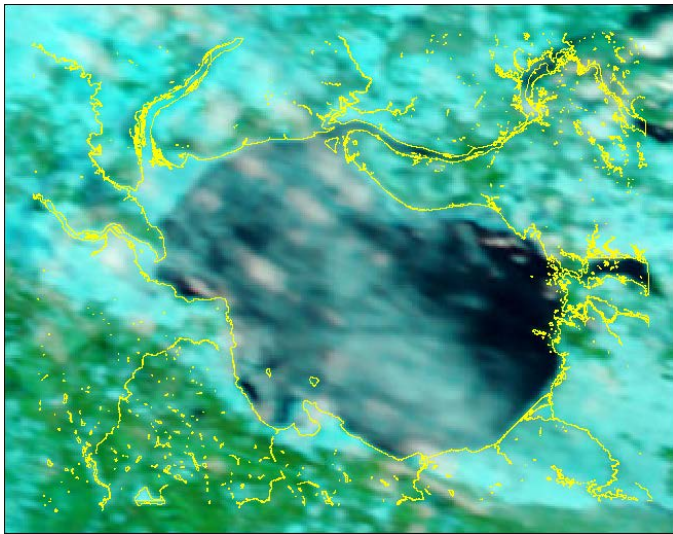


30 novembre 2008

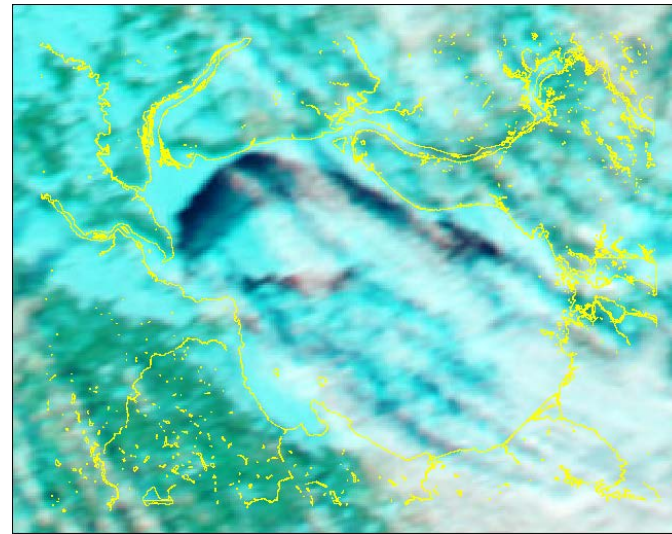


2 décembre 2008

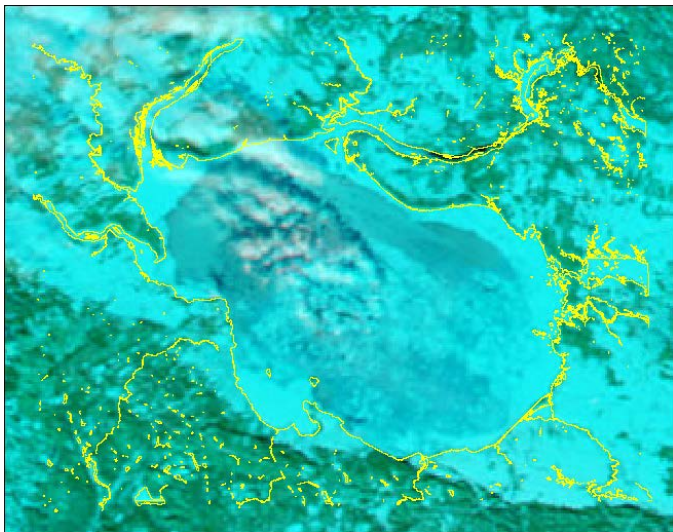
Figure A10: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 21, 29, 30 novembre et 2 décembre 2008



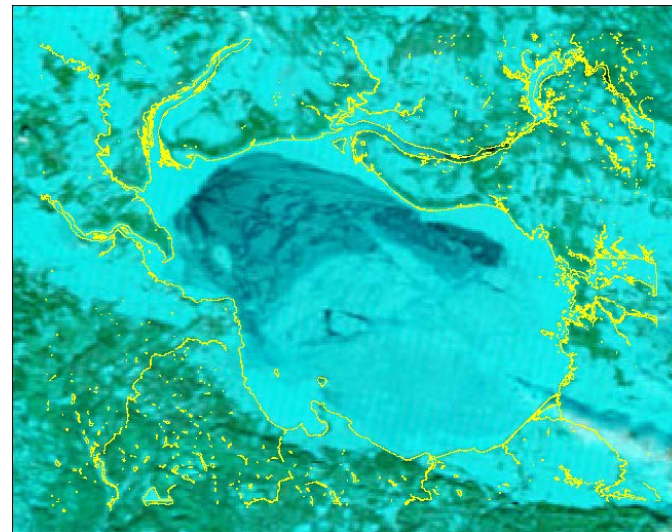
5 décembre 2008



10 décembre 2008

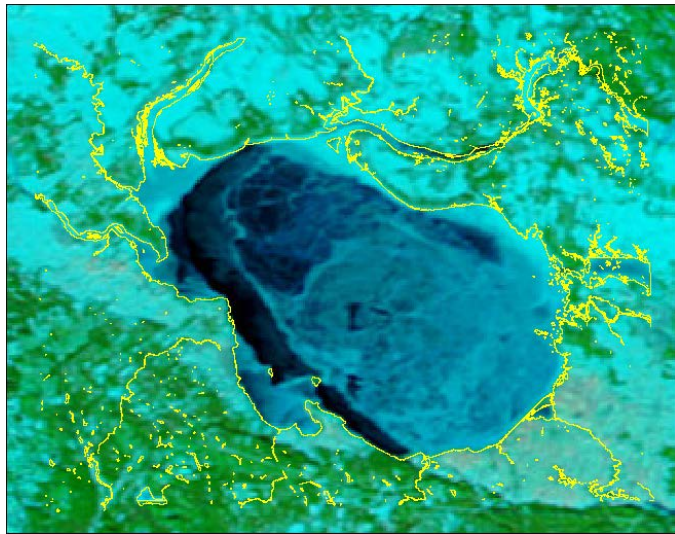


11 décembre 2008

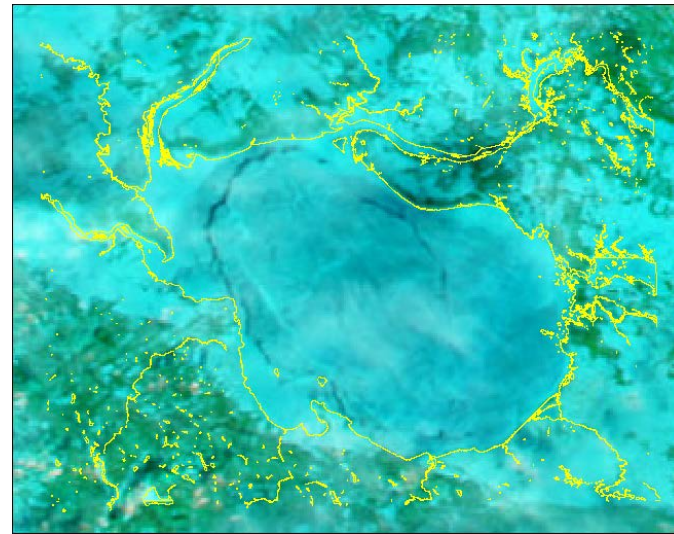


13 décembre 2008

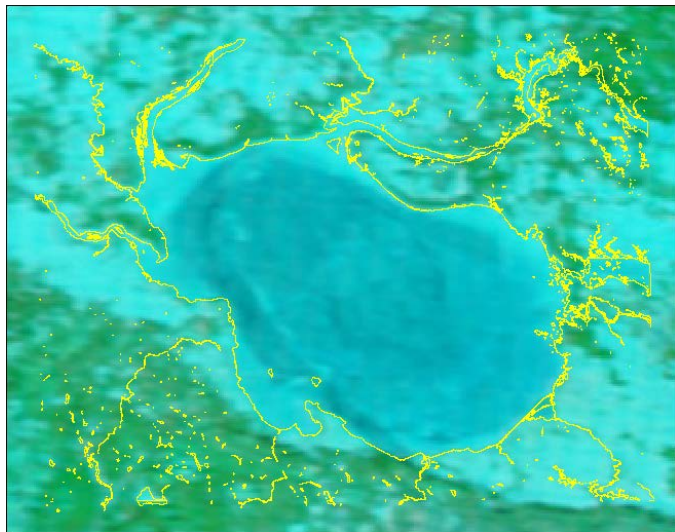
Figure A11: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 5, 10, 11, et 13 décembre 2008



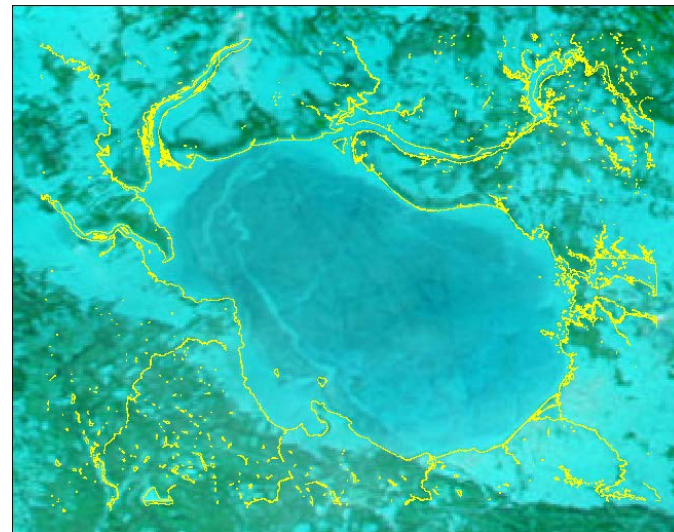
16 décembre 2008



18 décembre 2008

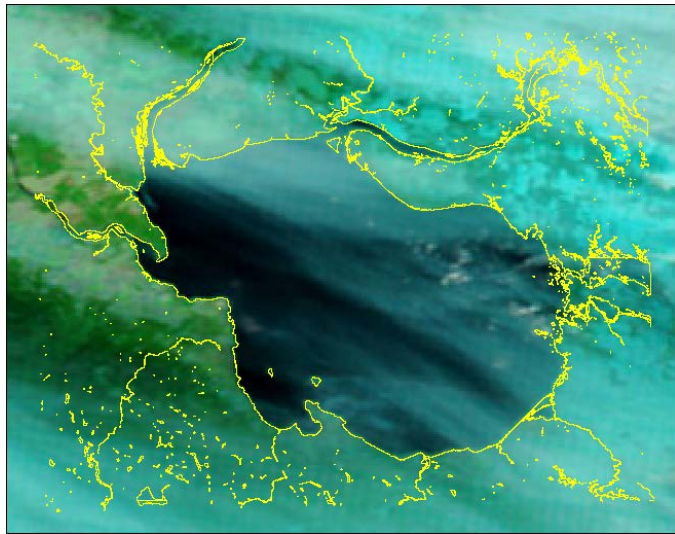


19 décembre 2008

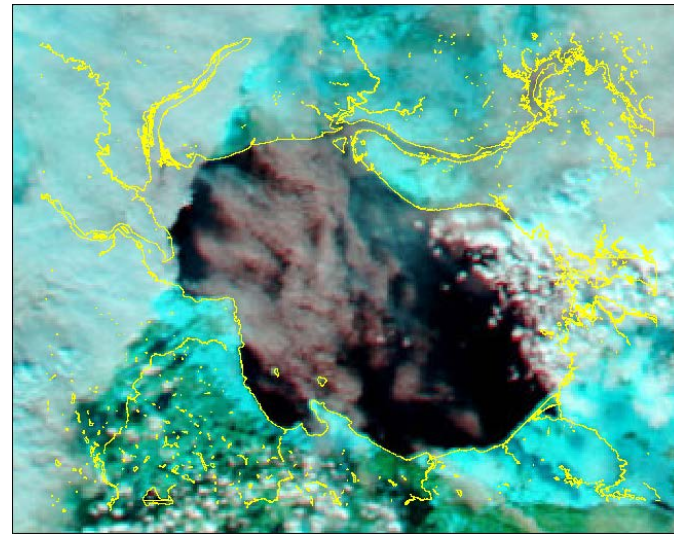


20 décembre 2008

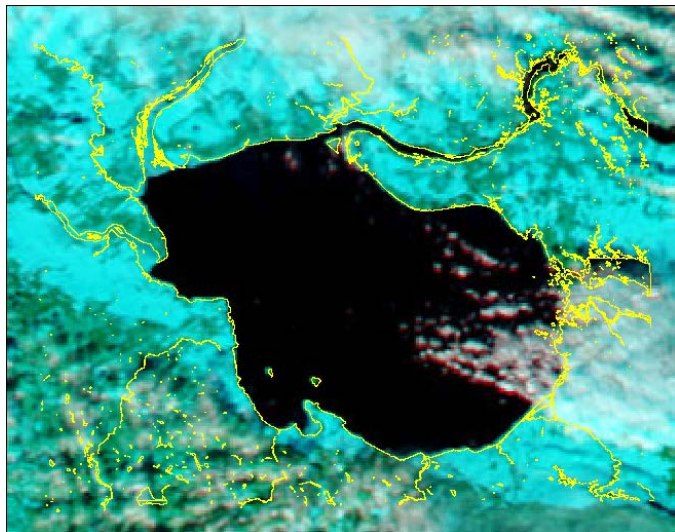
Figure A12: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 16, 18, 19 et 20 décembre 2008



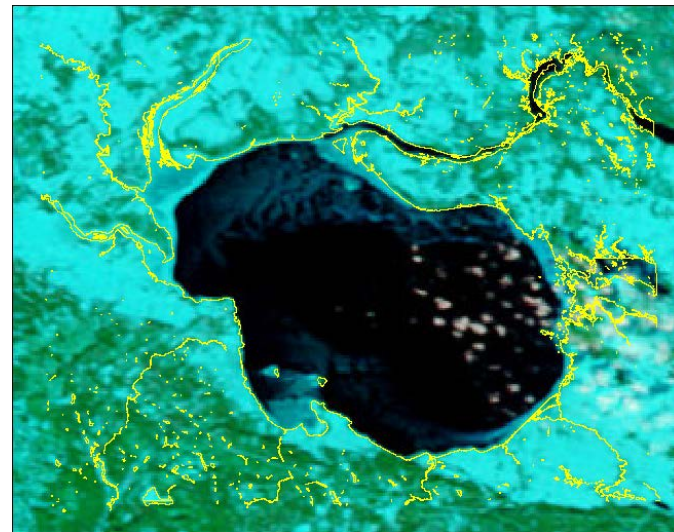
2 décembre 2009



5 décembre 2009

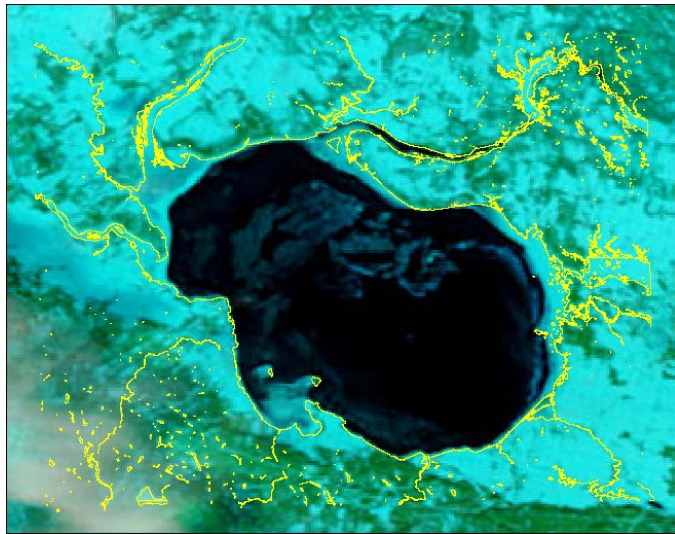


7 décembre 2009

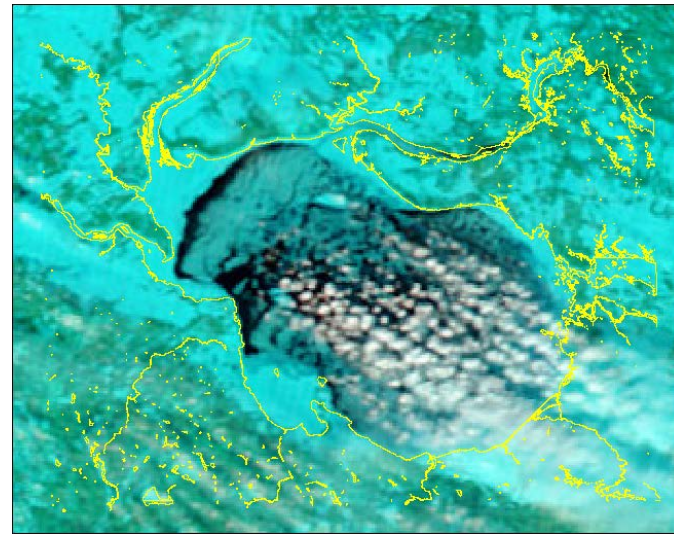


12 décembre 2009

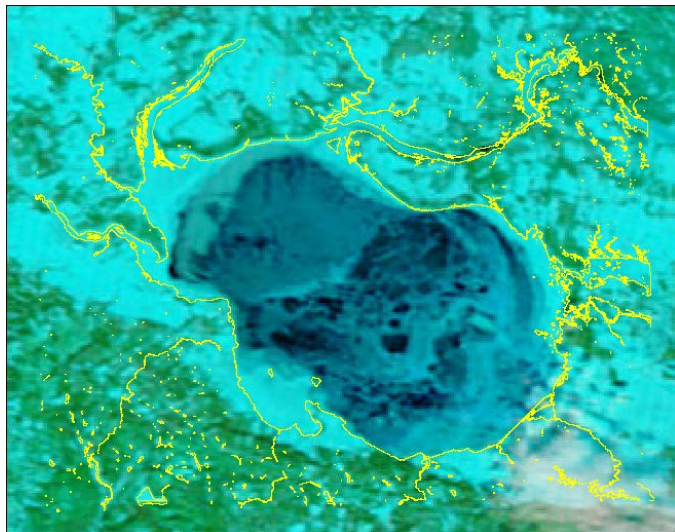
Figure A13: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 2, 5, 7 et 12 décembre 2009



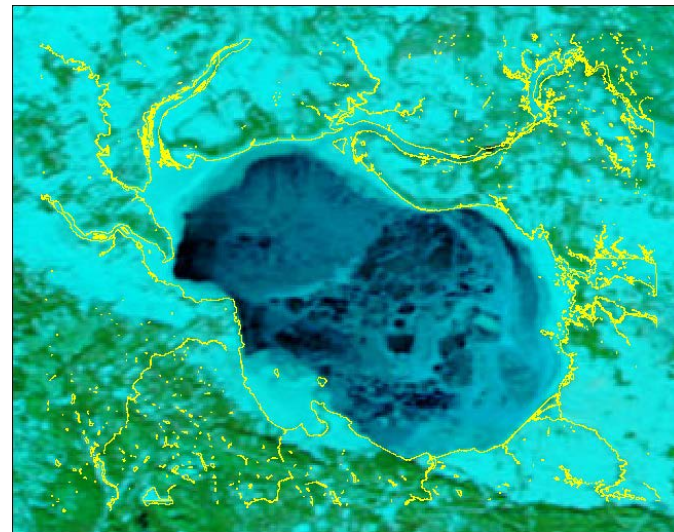
14 décembre 2009



16 décembre 2009



18 décembre 2009



19 décembre 2009

Figure A14: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 14, 16, 18, et 19 décembre 2009

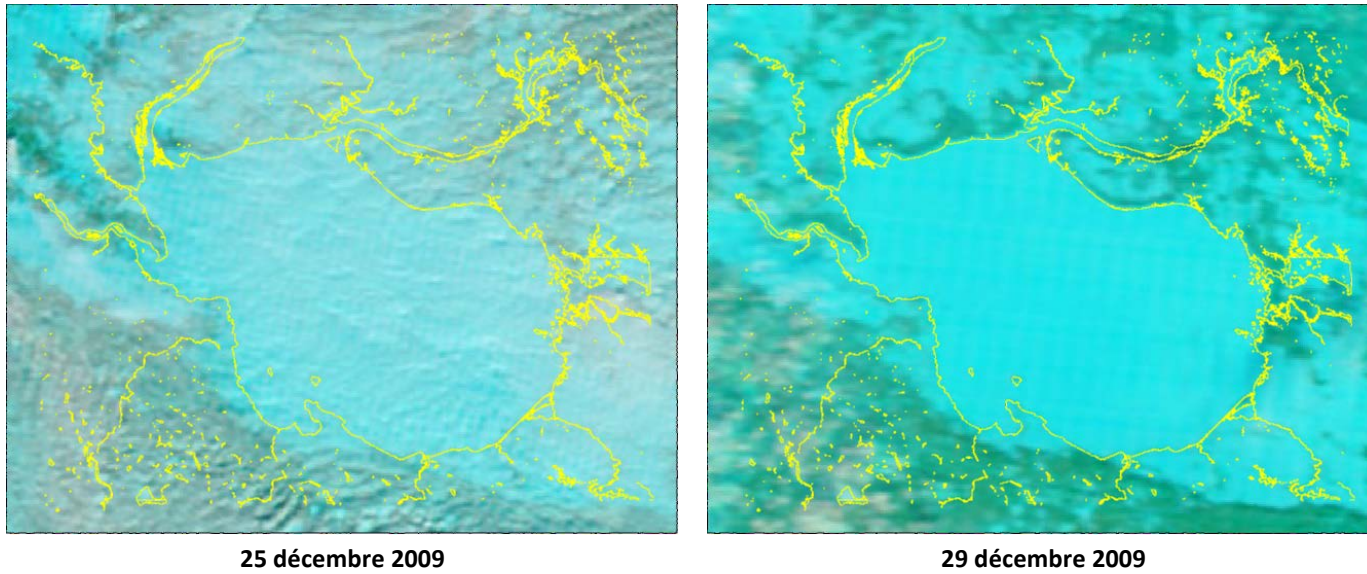
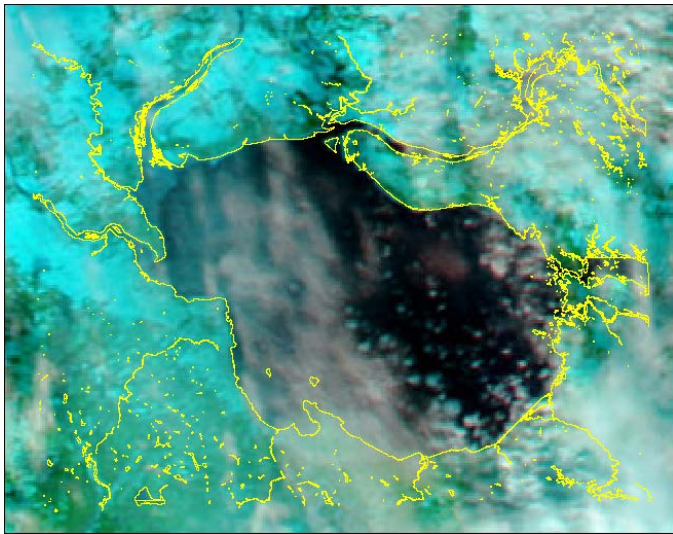
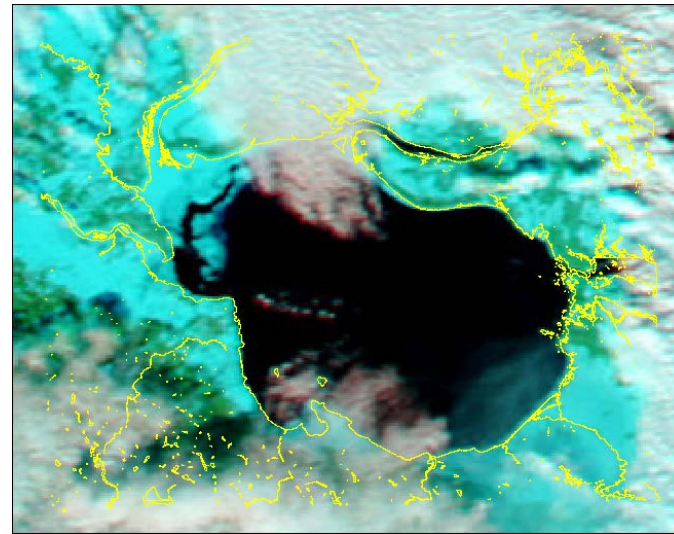


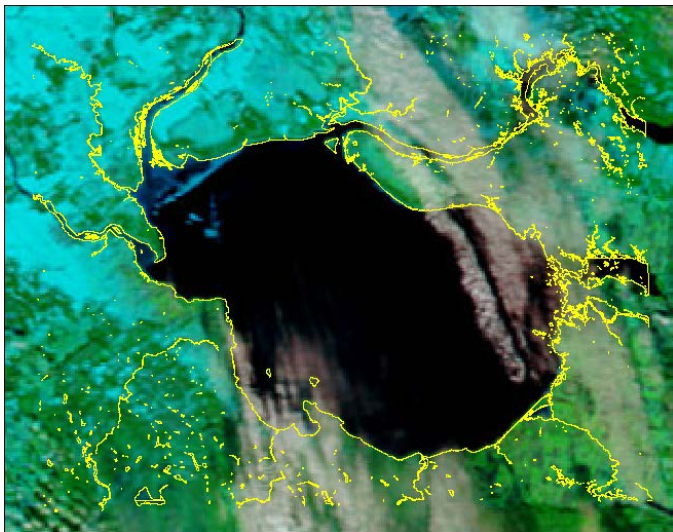
Figure A15: État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 25 et 29 décembre 2009



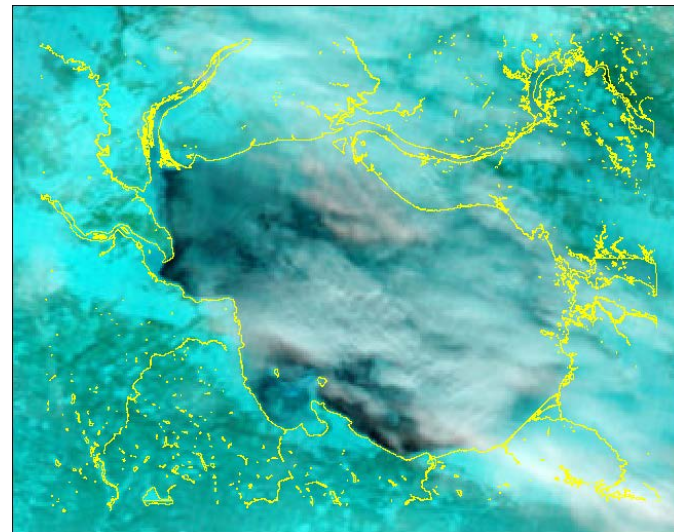
24 novembre 2010



27 novembre 2010

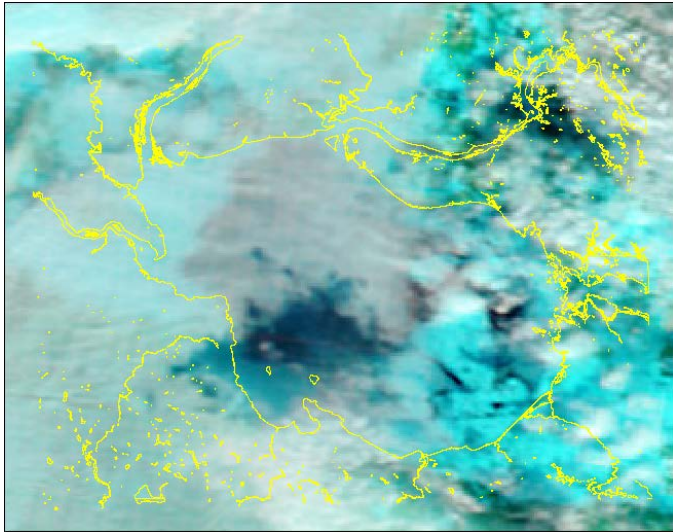


3 décembre 2010

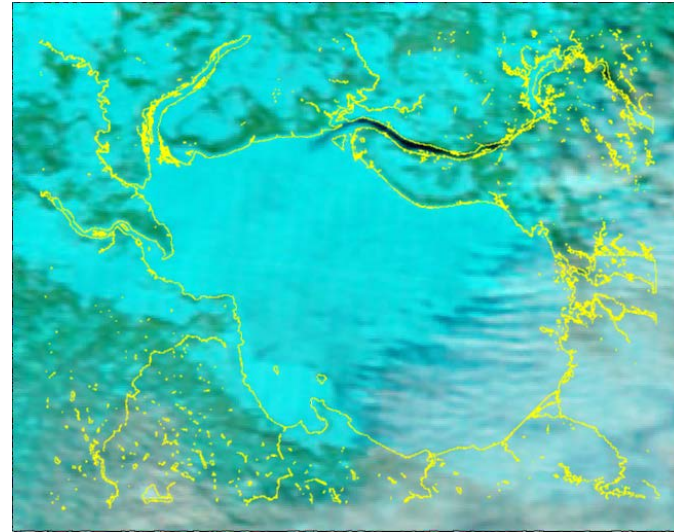


10 décembre 2010

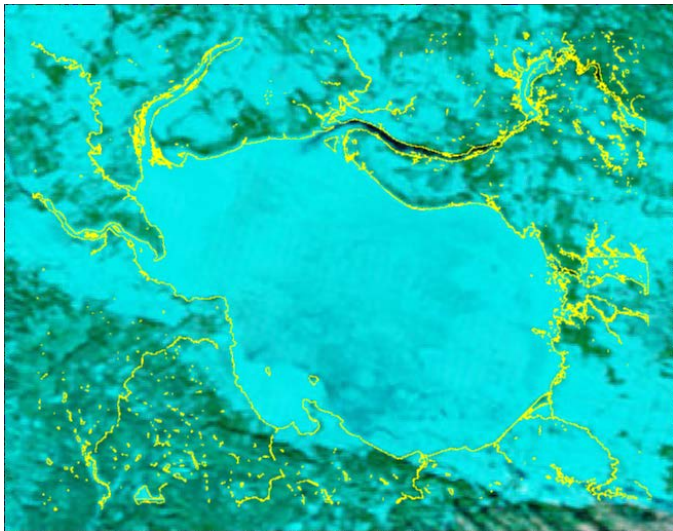
Figure A16 : État du couvert de glace au lac Saint-Jean - 24 et 27 novembre, 3 et 10 décembre 2010



14 décembre 2010

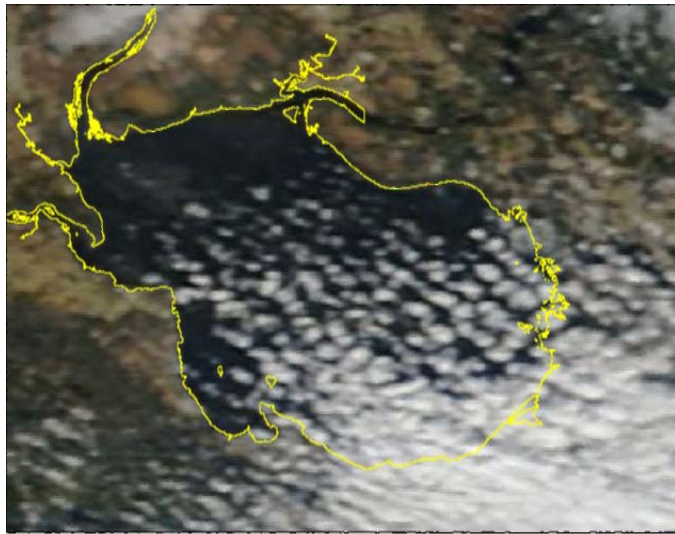


23 décembre 2010

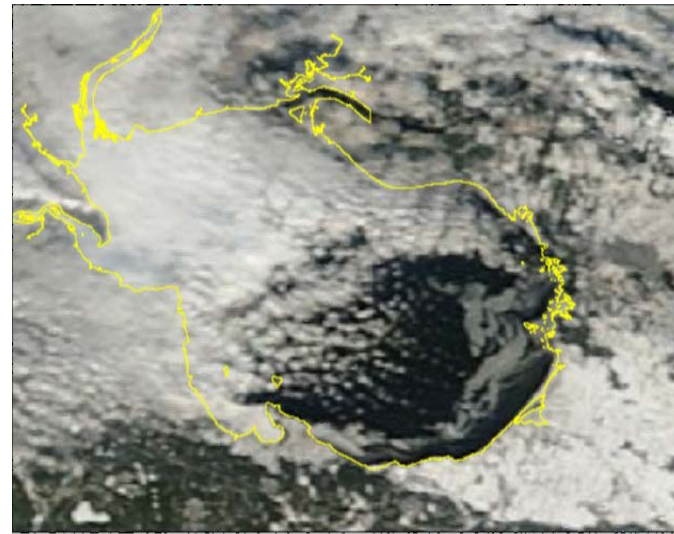


24 décembre 2010

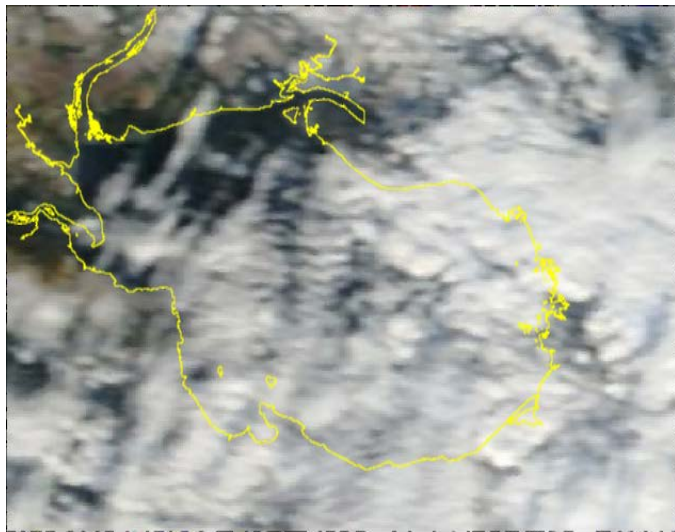
Figure A17: État du couvert de glace au lac Saint-Jean, 14, 23 et 24 décembre 2010



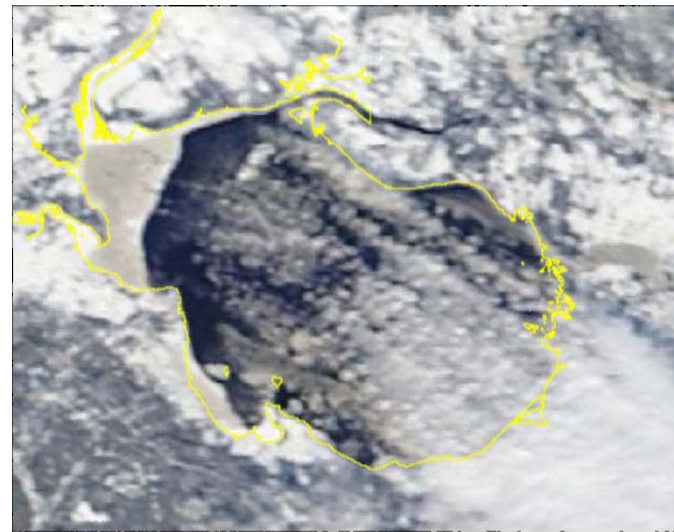
26 novembre 2012



1 décembre 2012



5 décembre 2012



11 décembre 2012

Figure A18: État du couvert de glace au lac Saint-Jean, 26 novembre, 1, 5, et 11 décembre 2012

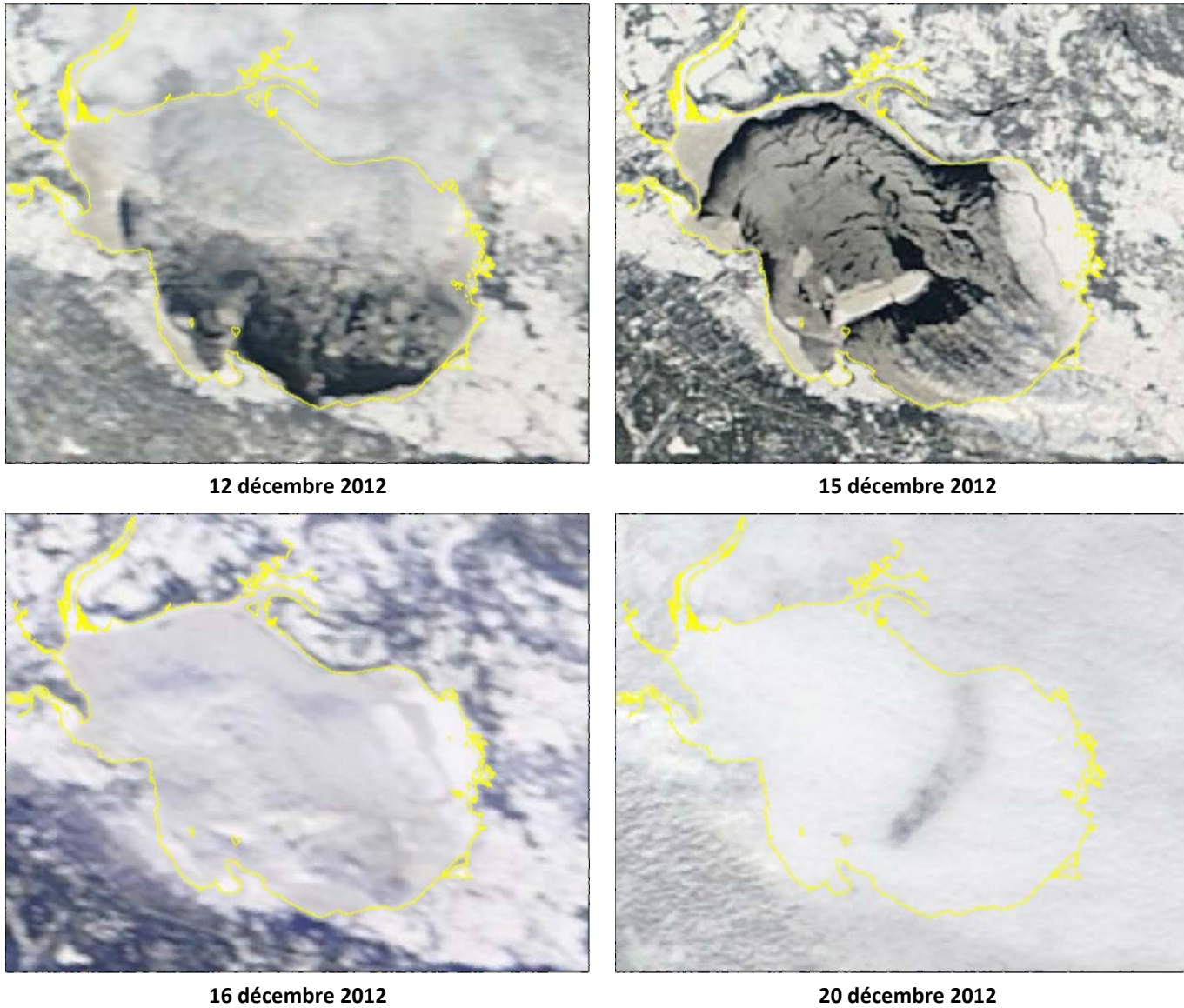
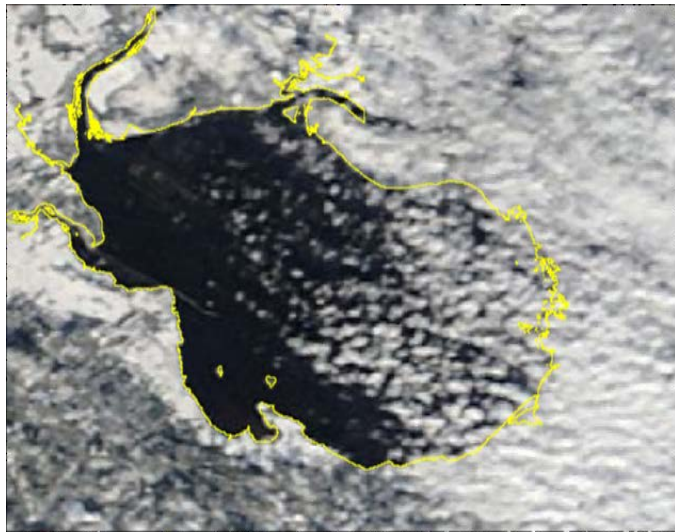
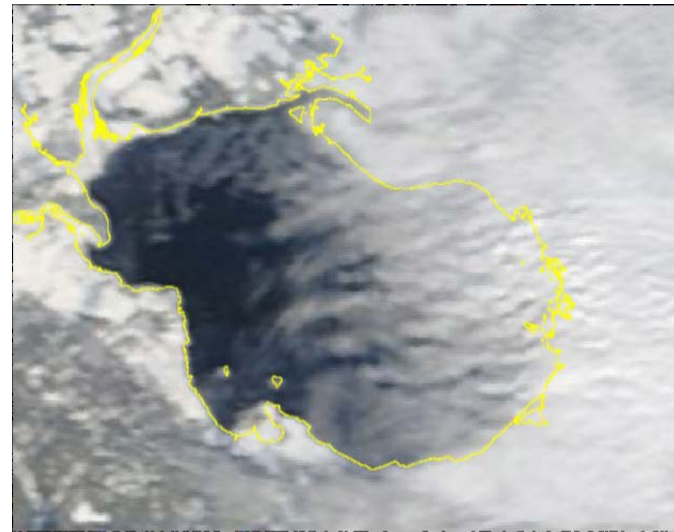


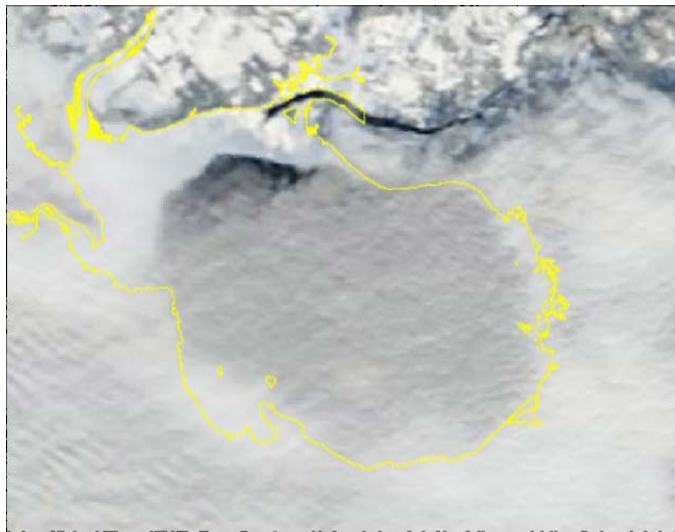
Figure A 19: État du couvert de glace au lac Saint-Jean, 12, 15, 16, et 20 décembre 2012



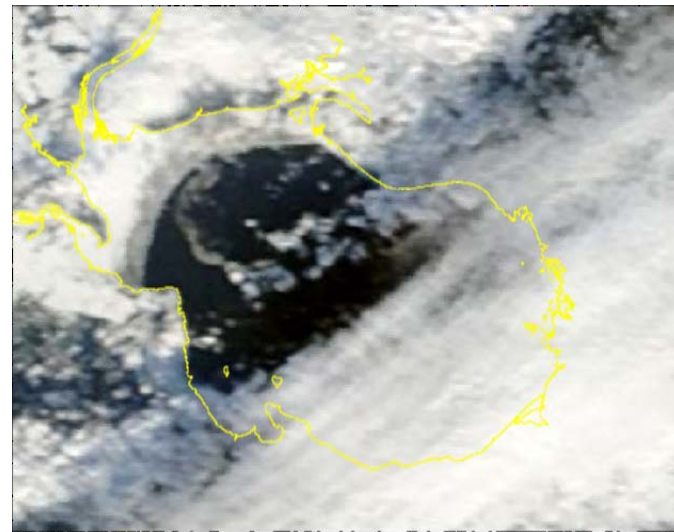
23 novembre 2013



29 novembre 2013

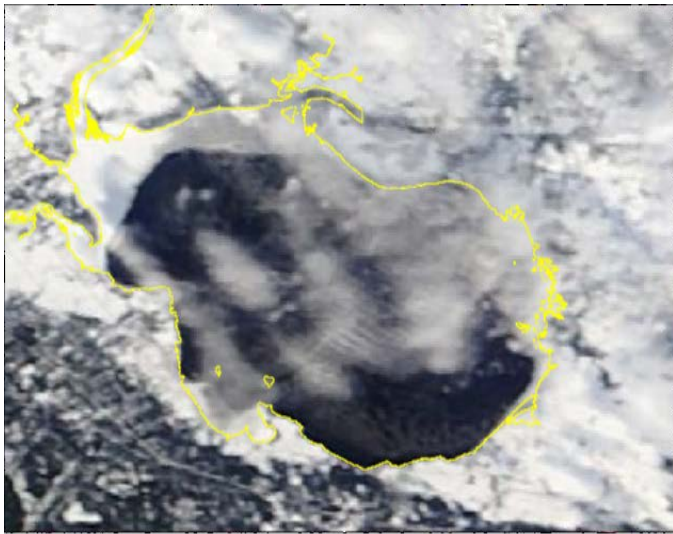


4 décembre 2013

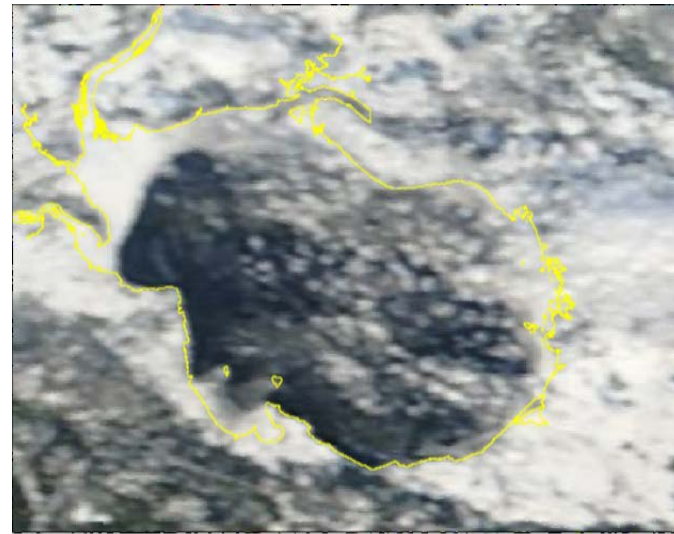


6 décembre 2013

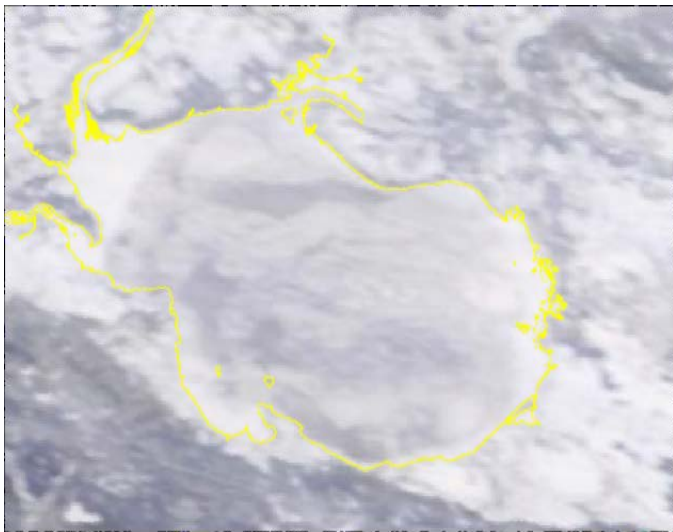
Figure A20: État du couvert de glace au lac Saint-Jean, 23 et 29 novembre, 4 et 6 décembre 2013



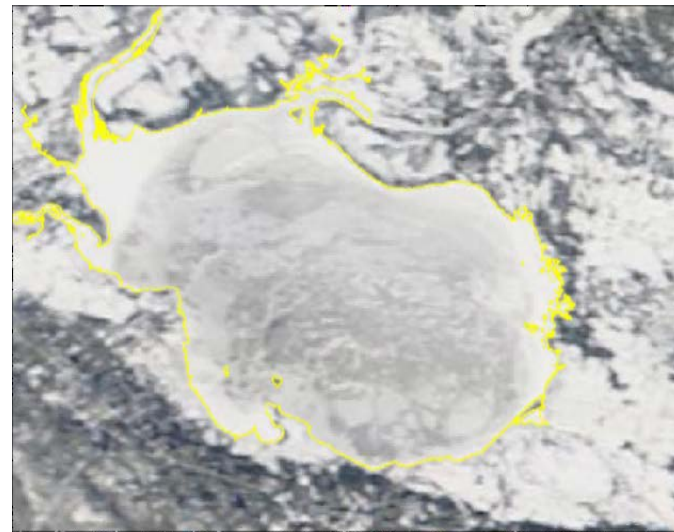
7 décembre 2013



8 décembre 2013



12 décembre 2013



13 décembre 2013

Figure A21: État du couvert de glace au lac Saint-Jean, 7, 8, 12 et 13 décembre 2013

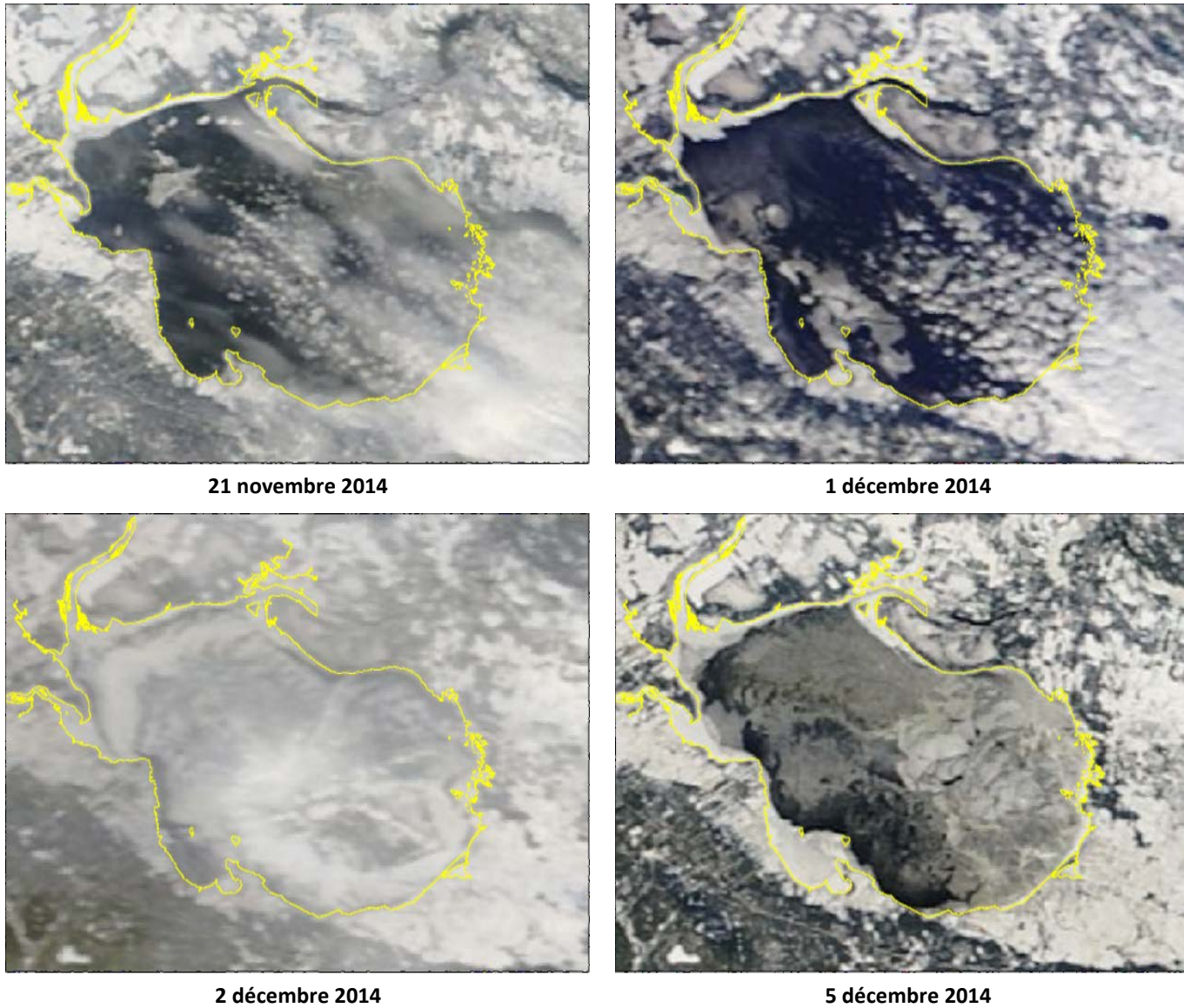
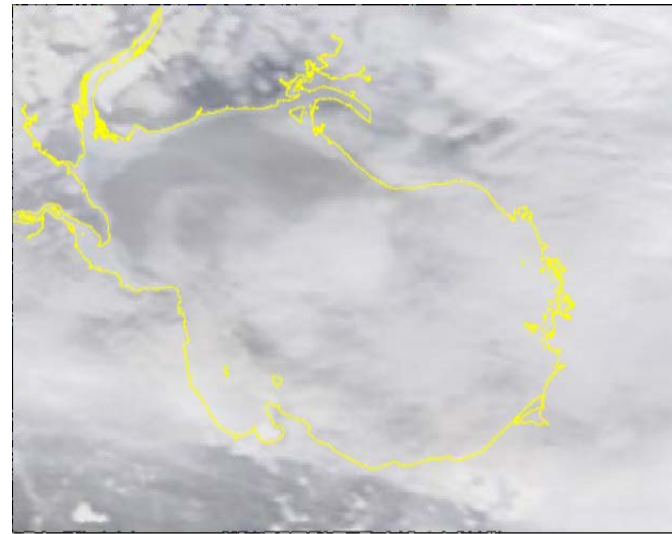


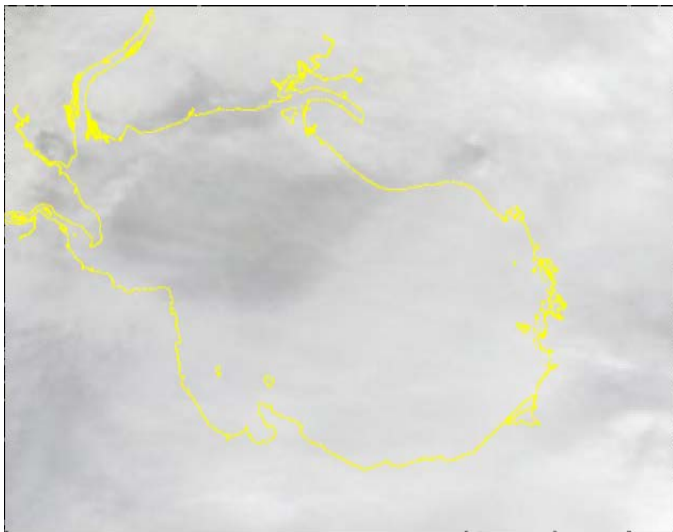
Figure A22: État du couvert de glace au lac Saint-Jean, 21 novembre, 1, 2 et 5 décembre 2014



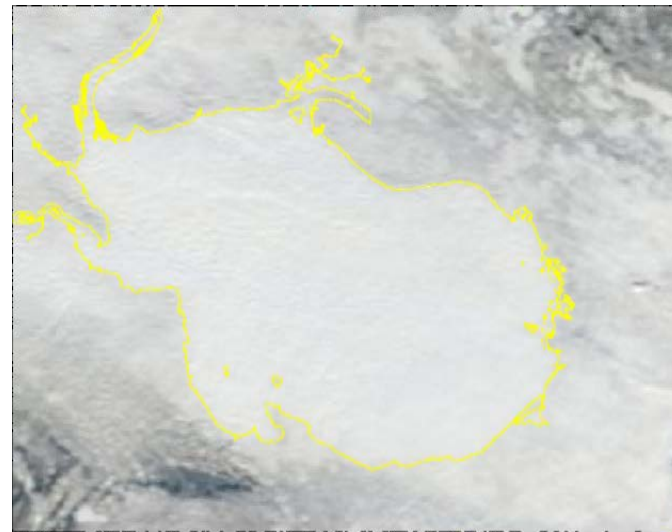
7 décembre 2014



8 décembre 2014



10 décembre 2014



14 décembre 2014

Figure A23: État du couvert de glace au lac Saint-Jean, 7, 8, 10 et 14 décembre 2014

ANNEXE B

Calibrage du modèle d'évolution du trait de côte (transport longitudinal)

LISTE DES FIGURES

Figure B1: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Saint-Henri-de-Taillon Nord 1	B2
Figure B2: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Saint-Henri-de-Taillon Nord 1 (suite)	B3
Figure B3: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Saint-Henri-de-Taillon Nord 2	B4
Figure B4: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Saint-Henri-de-Taillon Nord 2 (suite)	B5
Figure B5: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Saint-Gédéon Sud.....	B6
Figure B6: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Saint-Gédéon Sud (suite).....	B7
Figure B7: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Chambord (Domaine du Marais).....	B8
Figure B8: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Chambord (Domaine du Marais) (suite)	B9
Figure B9: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Chambord (Pointe).....	B10
Figure B10: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Saint-Félicien	B11
Figure B11: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Saint-Félicien (suite).....	B12
Figure B12: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Mashteuiatsh	B13

Saint-Henri-de-Taillon Nord

Les figures B1 à B4 montrent les résultats de calibration pour le secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord. Les bornes sont numérotées avec une orientation d'ouest vers l'est. Dans l'ensemble, le module d'évolution du trait de côte reproduit bien les tendances observées sur le terrain entre les années 1996 et 2014. L'accrétion présente aux secteurs des bornes 6 et 8 est légèrement sous-estimée en raison de la présence d'un delta dans la bathymétrie qui ne peut être considérée correctement dans le modèle numérique compte tenu des hypothèses de schématisation.

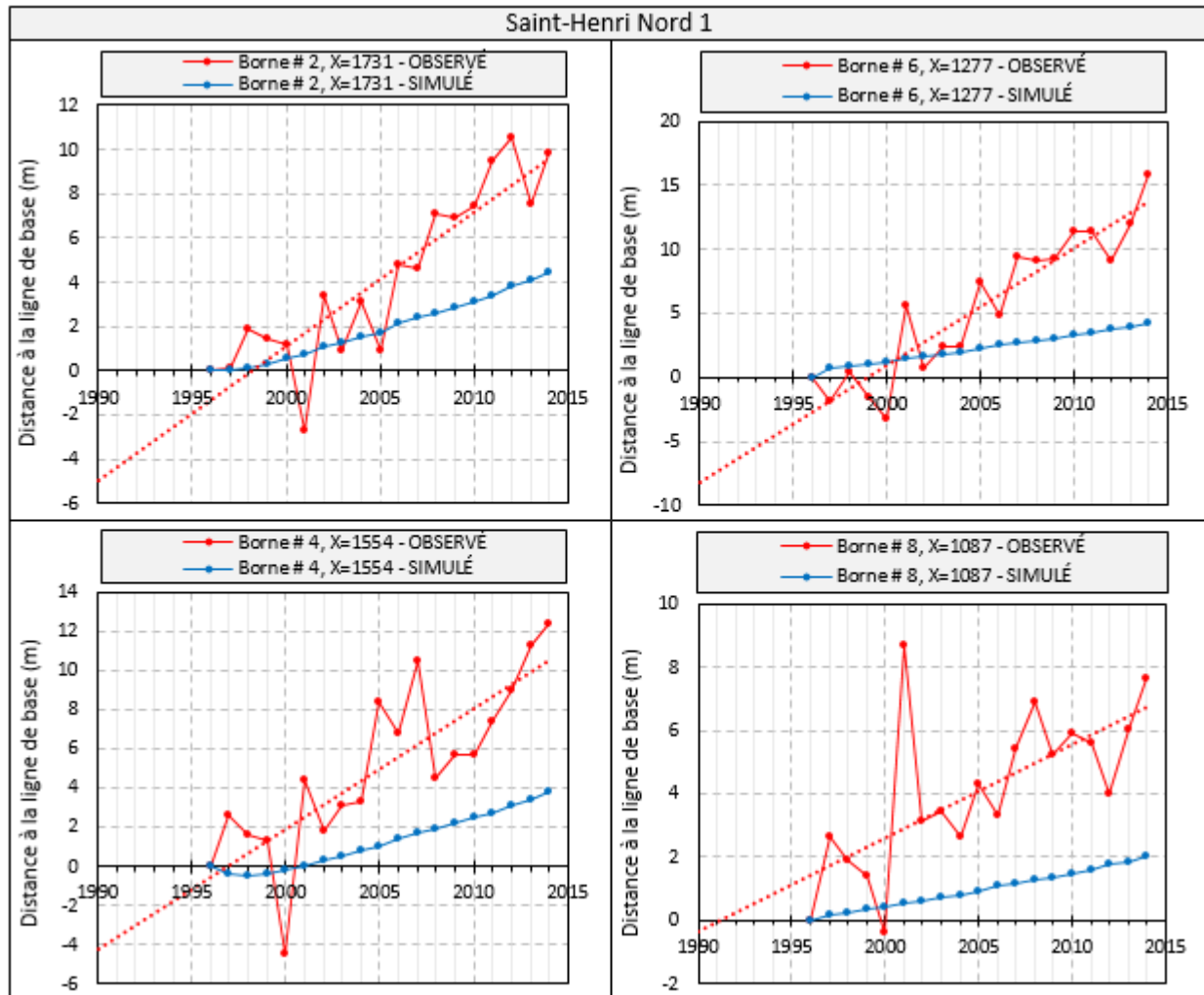


Figure B1: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Saint-Henri-de-Taillon Nord 1

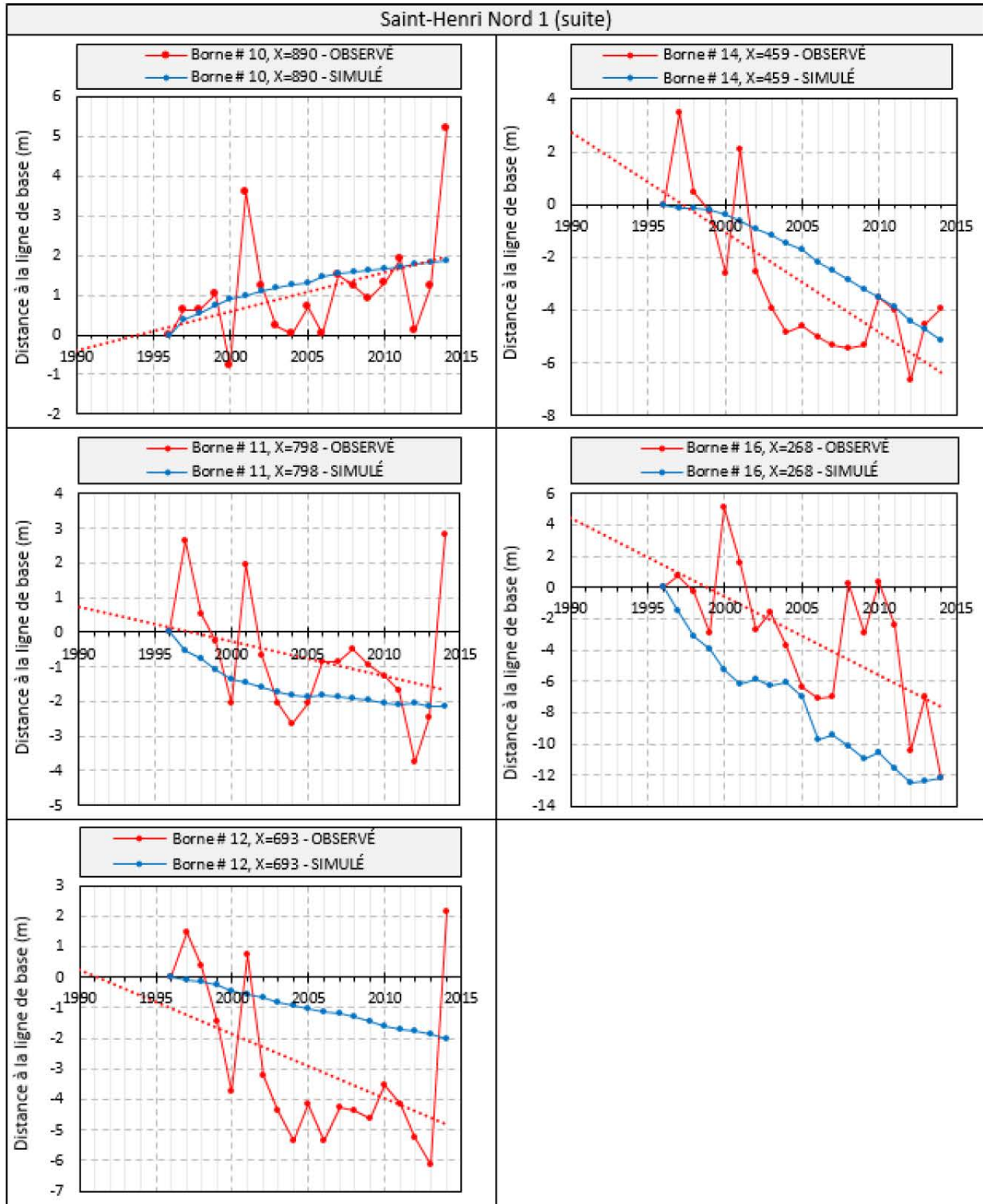


Figure B2: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Saint-Henri-de-Taillon Nord 1 (suite)

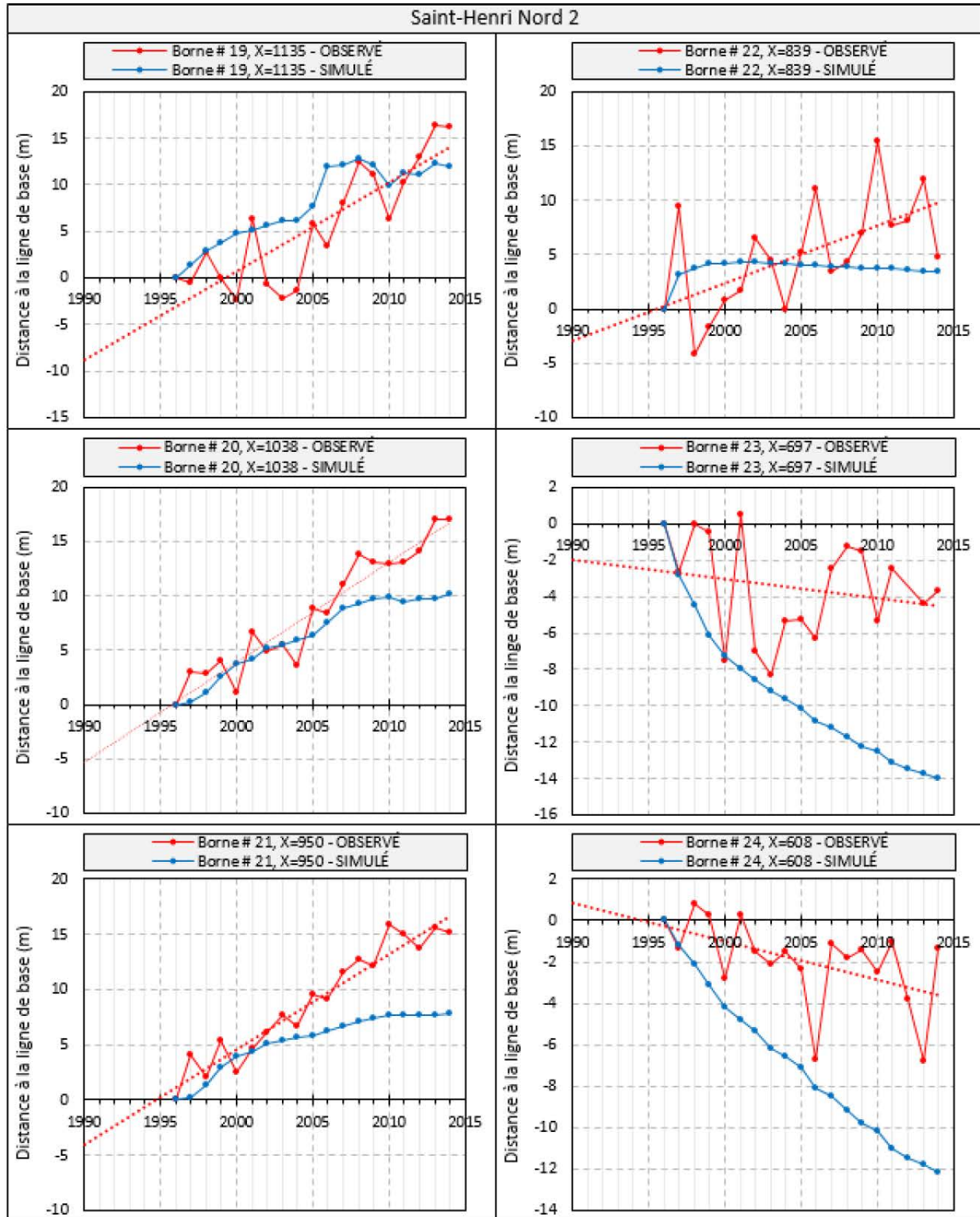


Figure B3: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Saint-Henri-de-Taillon Nord 2

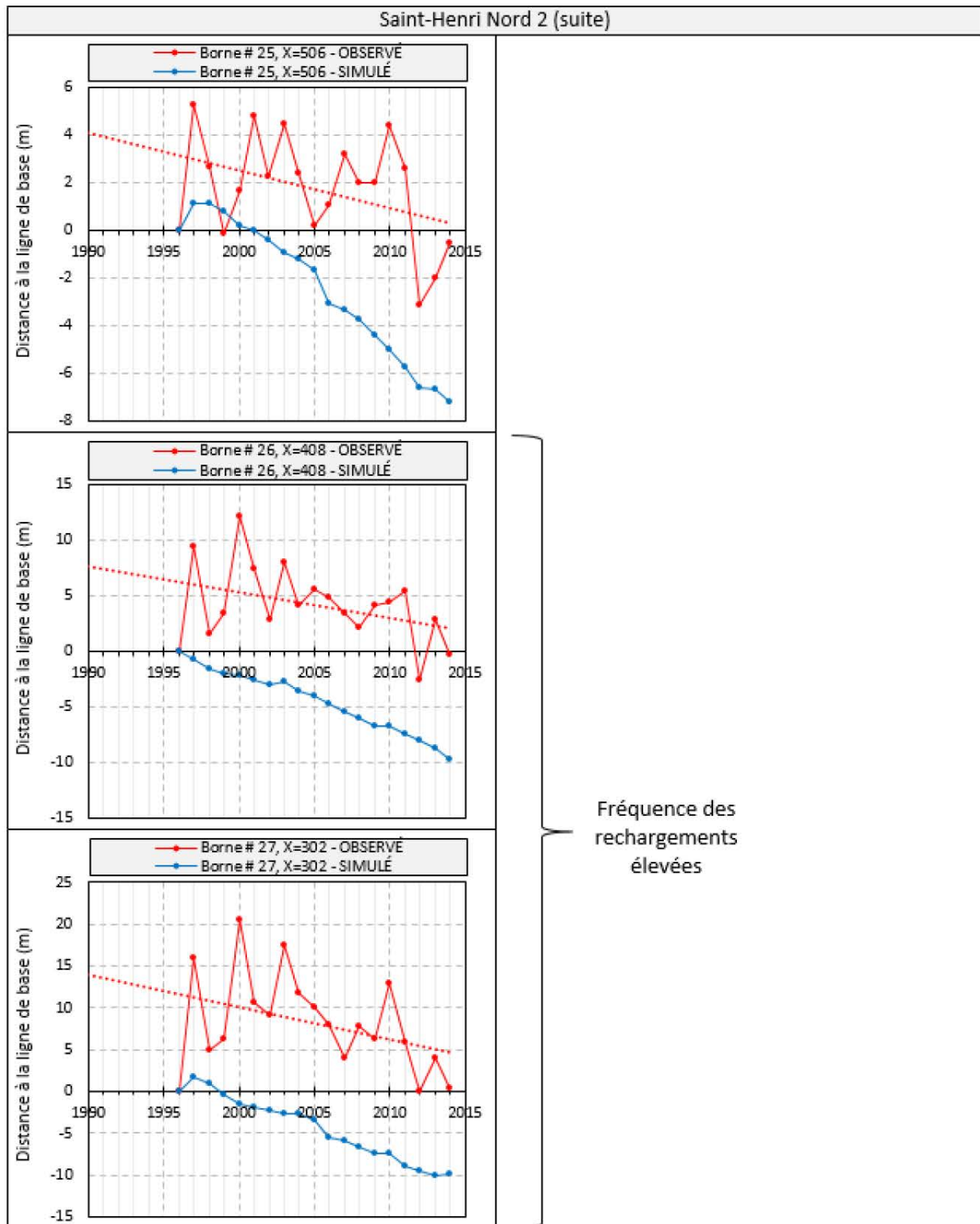


Figure B4: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Saint-Henri-de-Taillon Nord 2 (suite)

Saint-Gédéon Sud

Les figures B5 et B6 illustrent les comparaisons entre les tendances observées sur le terrain et celles simulées par le modèle numérique dans le secteur de Saint-Gédéon Sud. La borne 29, illustrée dans le premier graphique, est positionnée à l'ouest du secteur alors que la borne 16, présentée dans le dernier graphique, est située à l'est du site.

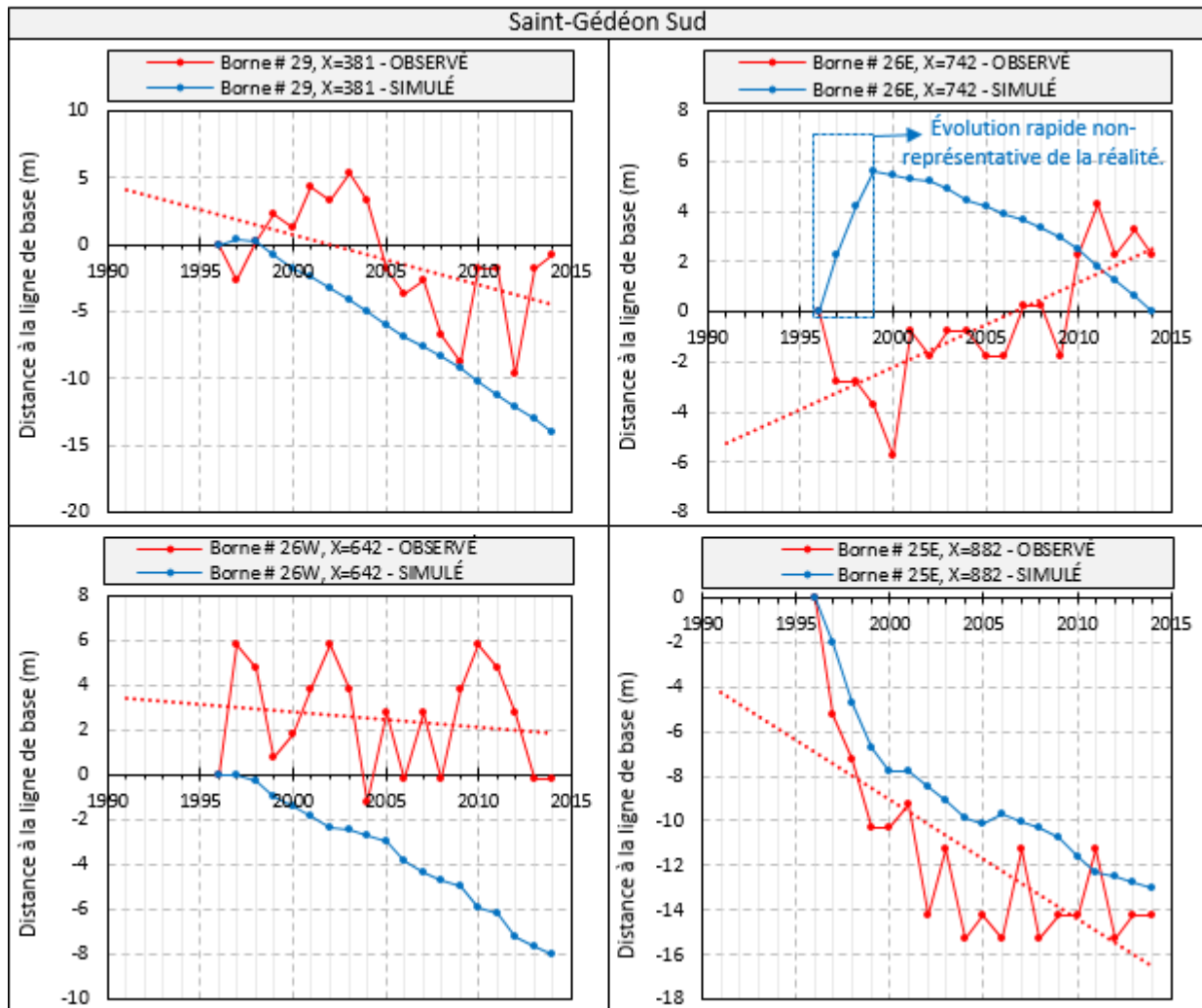


Figure B5: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Saint-Gédéon Sud

La tendance simulée vis-à-vis la borne 26E ne concorde pas avec les mesures alors que cette tendance est validée 100 m à l'ouest (borne 26W) et 140 m à l'est (borne 25E).

Le module d'évolution du trait de côte a simulé des érosions rapides et irréalistes au début des simulations dans les secteurs des bornes 23, 21, 18 et 16. Cette aberration est principalement causée par la direction quasi-parallèle des vagues par rapport aux épis. Dans de telles circonstances, le modèle ne pouvant reproduire

les courants bidimensionnels générés par le déferlement des vagues, ni, *a fortiori*, l'interaction avec les structures, répond moins bien pour représenter le transport à proximité des épis. Pour remédier aux instabilités qui en découlent, les simulations ont été par la suite ajustées pour inclure une période de stabilisation numérique du modèle avant de débiter les analyses en transport sédimentaire.

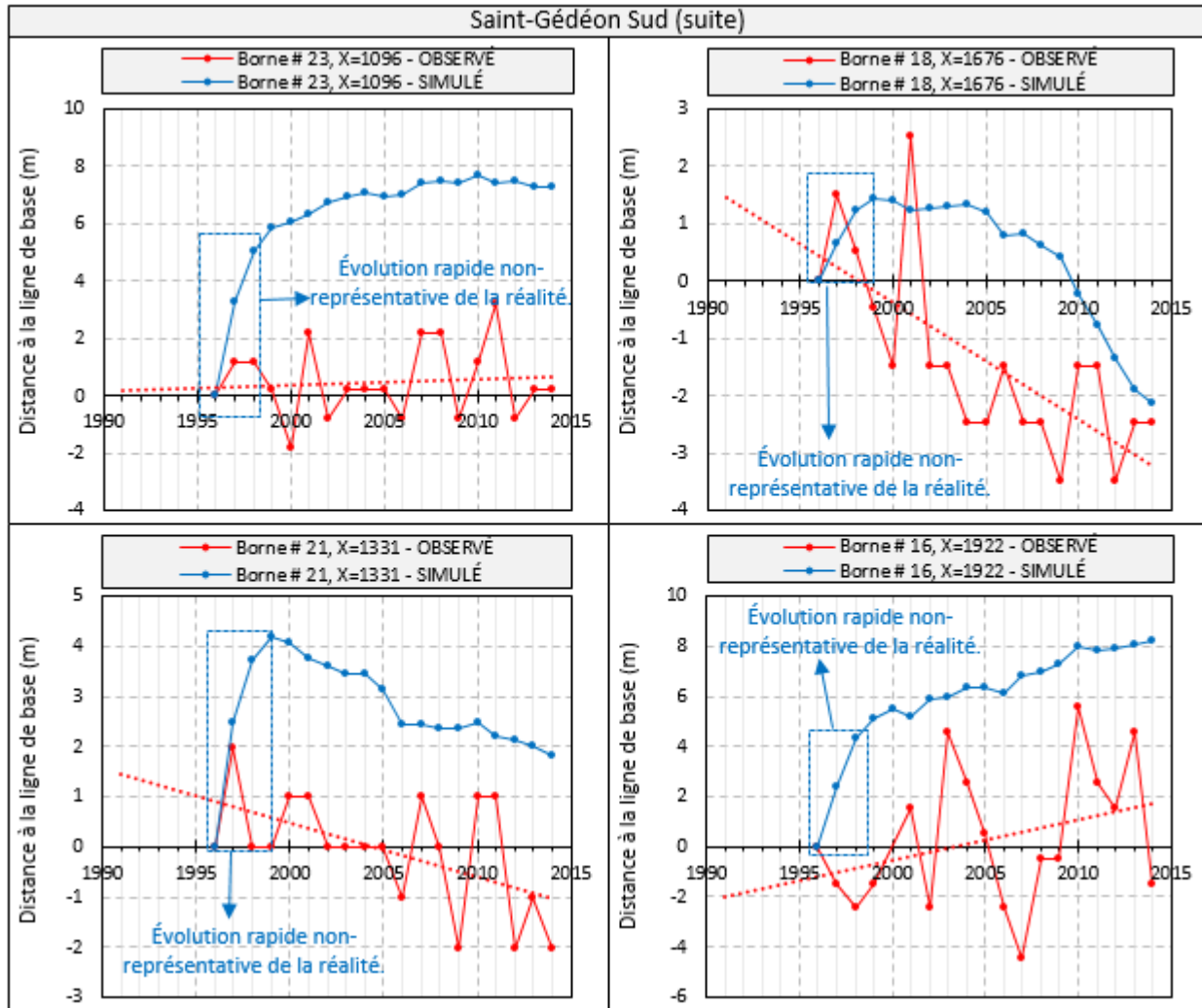


Figure B6: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Saint-Gédéon Sud (suite)

Chambord (Domaine du Marais)

Les figures B7 et B8 illustrent les résultats de calibrage pour le secteur de Chambord (Domaine du Marais). Les bornes sont numérotées dans l'orientation d'ouest vers l'est.

Les tendances simulées pour le site de Chambord (Domaine du Marais) sont relativement bonnes, à l'exception de la borne 7.5 où l'érosion semble être surestimée par le modèle numérique. Cette surestimation est due à la bathymétrie complexe vis-à-vis ce secteur.

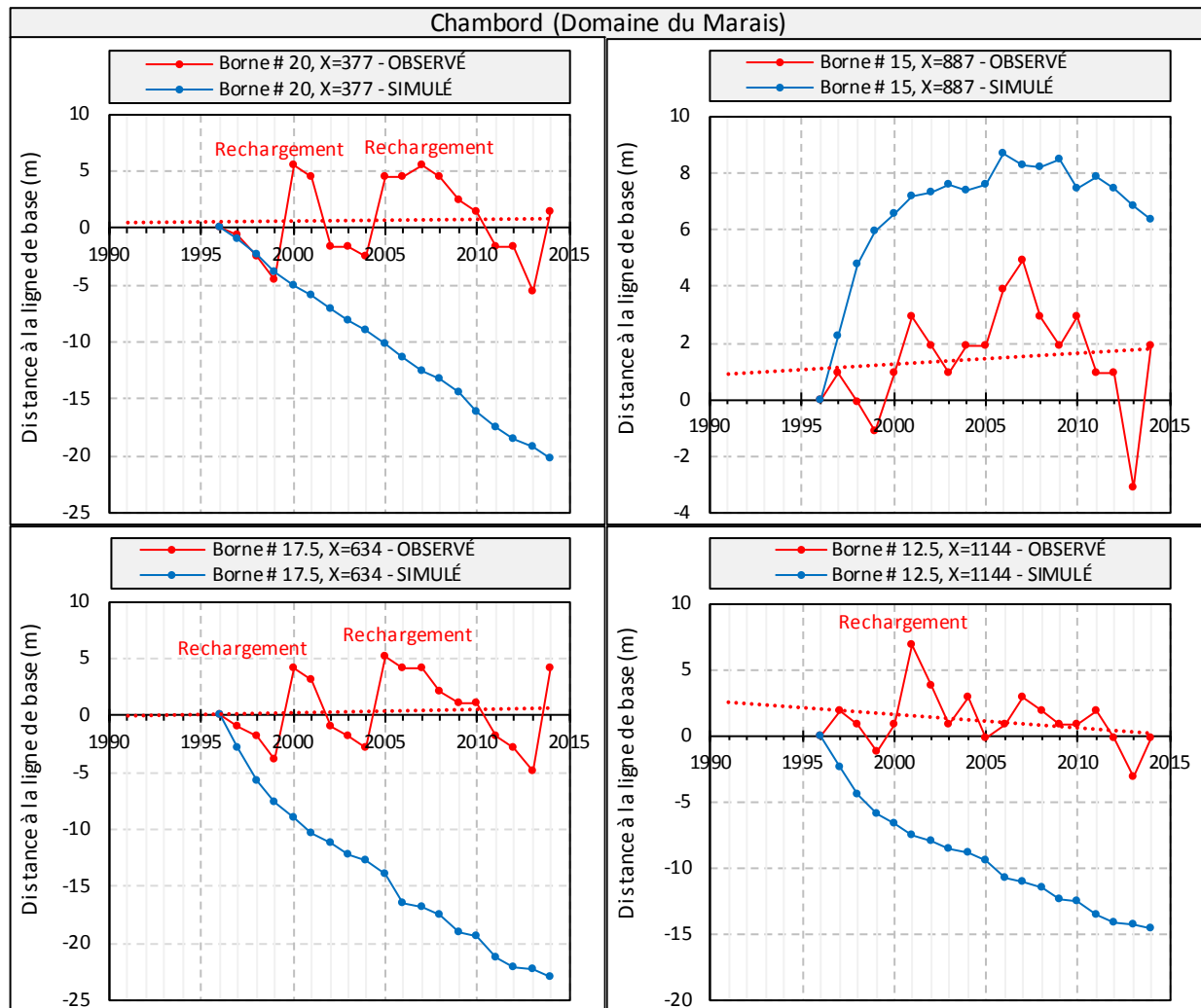


Figure B7: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Chambord (Domaine du Marais)

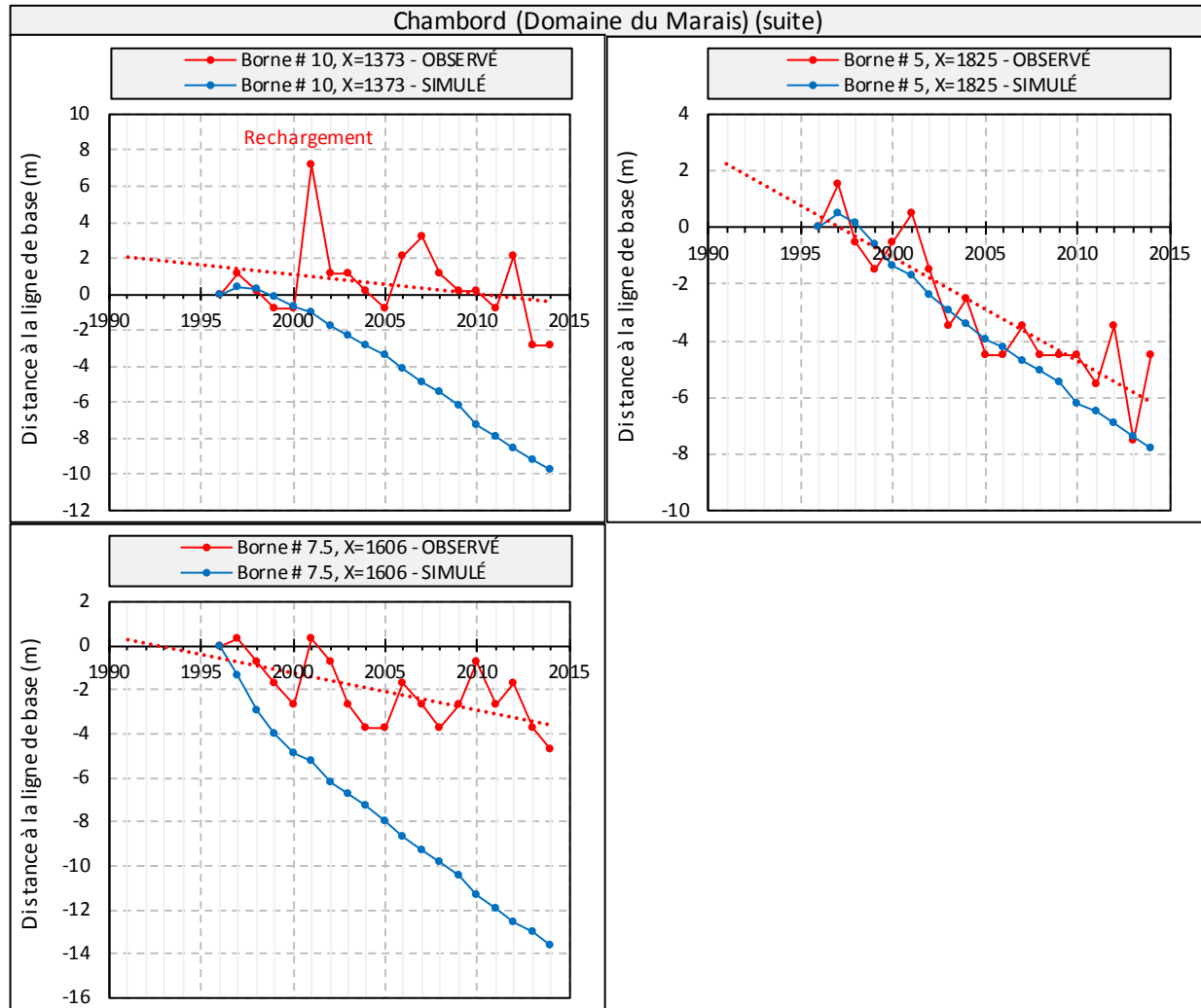


Figure B8: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Chambord (Domaine du Marais) (suite)

Chambord (Pointe)

La figure B9 illustre les résultats de calibrage pour le secteur de Chambord (Pointe). Les bornes sont numérotées du nord vers le sud. Les tendances simulées concordent bien avec les tendances observées entre 1996 et 2014.

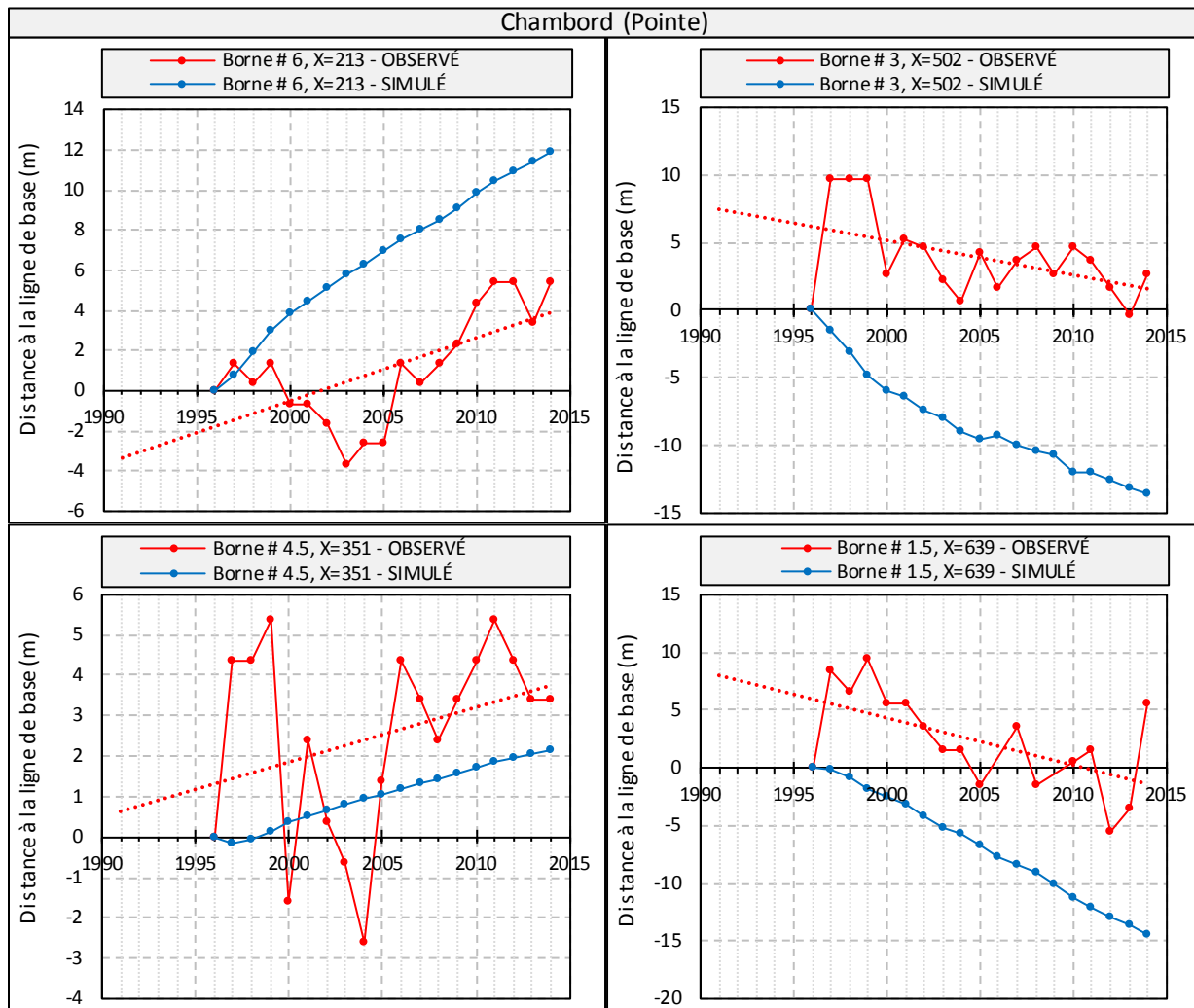


Figure B9: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Chambord (Pointe)

Saint-Félicien

Les figures B10 et B11 illustrent les résultats de calibrage pour le secteur de Saint-Félicien. Les bornes sont numérotées du nord vers le sud.

Malgré la bathymétrie complexe du site de Saint-Félicien, les tendances simulées apparaissent relativement conformes aux tendances extraites des mesures.

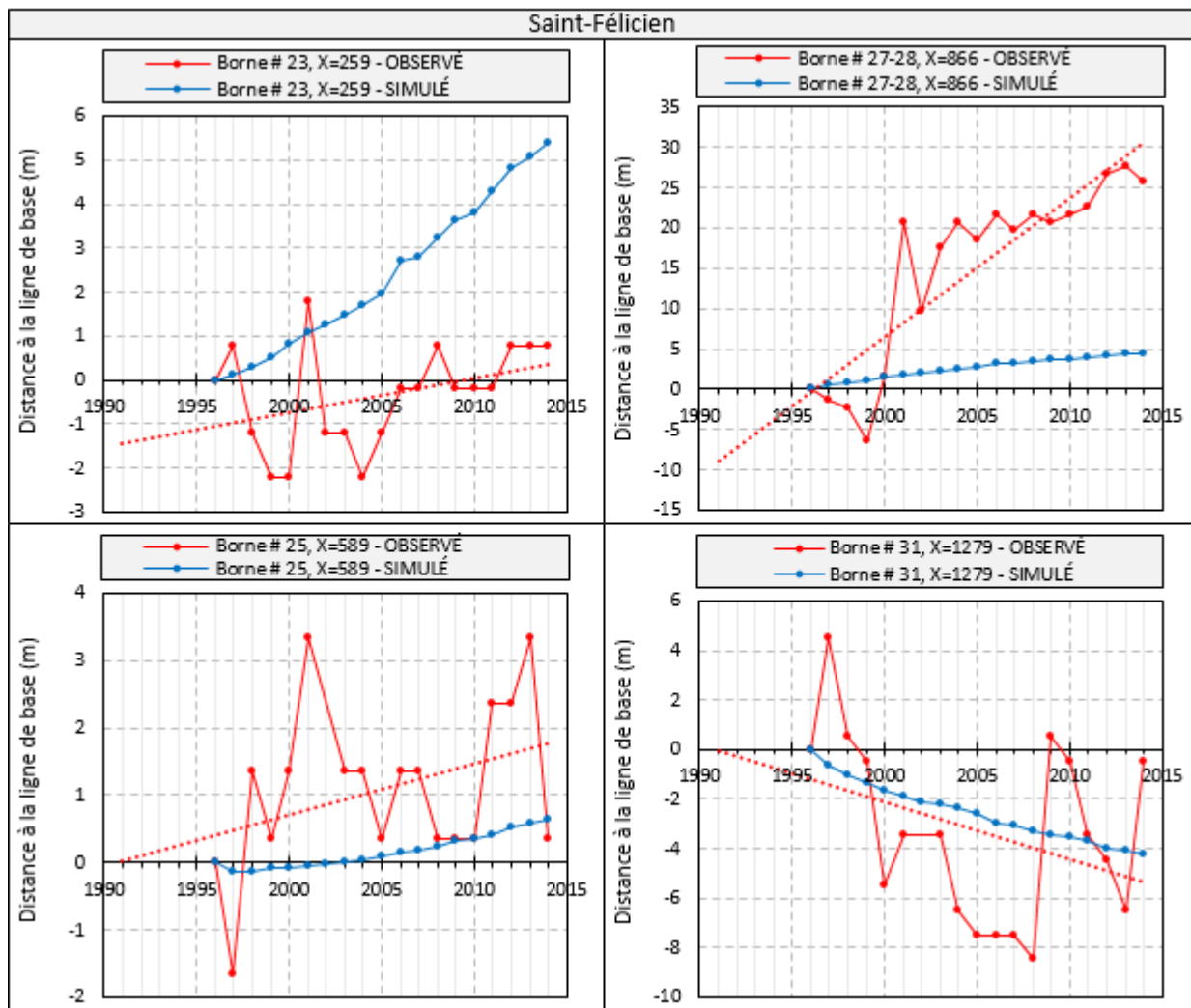


Figure B10: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Saint-Félicien

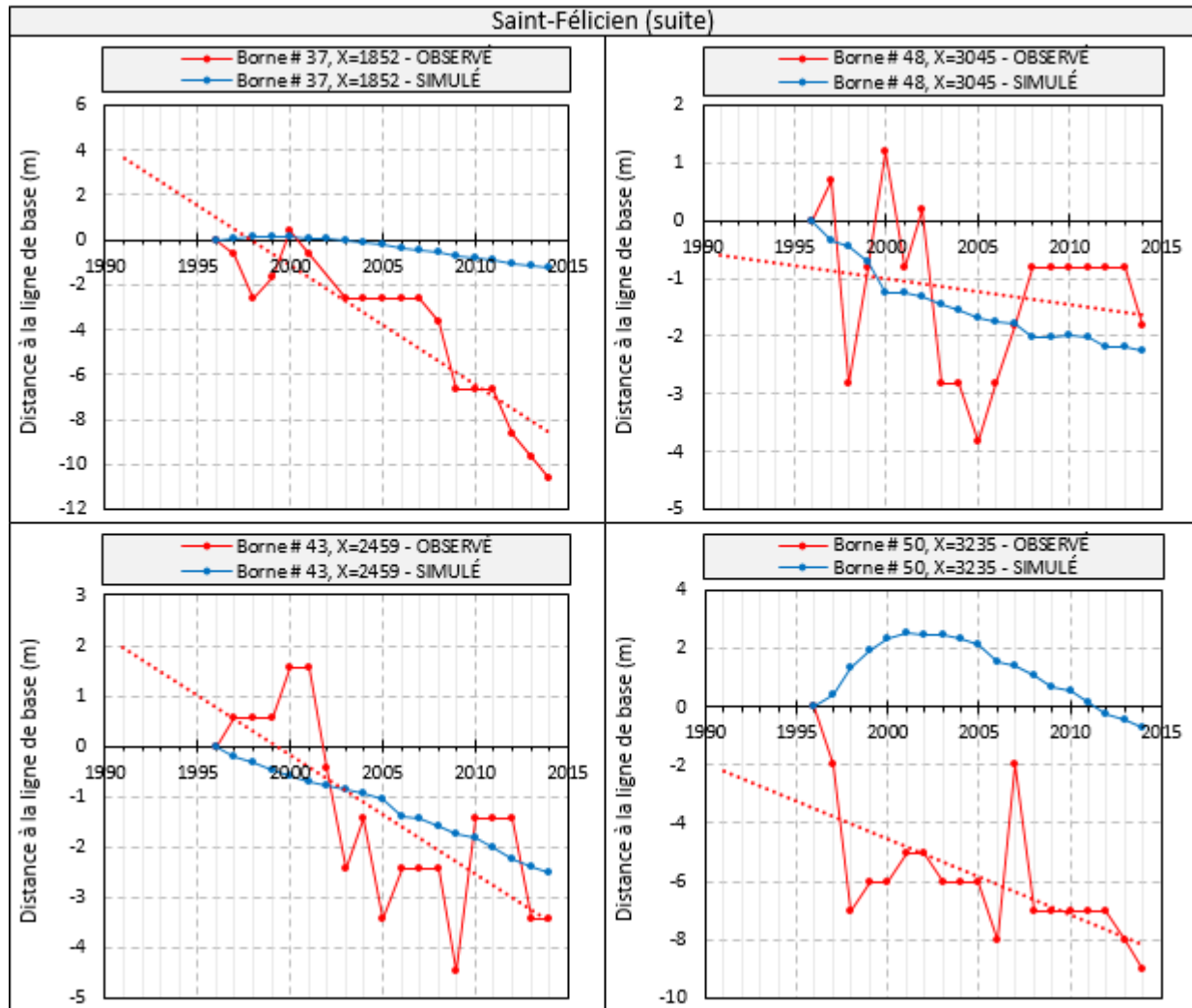


Figure B11: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Saint-Félicien (suite)

Mashteuiatsh

La figure B12 illustre les résultats de calibrage pour le secteur de Mashteuiatsh. Les bornes sont numérotées de l'ouest vers l'est.

La figure B12 montre d'importantes variations d'une année à l'autre qui semblent plus s'expliquer par la prise de mesure ou le post-traitement qui en a été fait. L'arpentage de la ligne de côte entre les années 1996 et 2014 a été effectué sur quelques points dont la position variait d'une année à l'autre, conduisant à des écarts vraisemblablement erronés puisque les points d'une même ligne de côte sont simplement reliés par interpolation linéaire. Ainsi, les tendances obtenues à l'aide de l'arpentage doivent être considérées avec prudence.

Les tendances observées entre les années 1996 et 2014 pour le site de Mashteuiatsh ne semblent pas clairement définies : la position de la ligne de côte semble stagner au fil du temps. Cette constatation coïncide avec les résultats du modèle numérique.

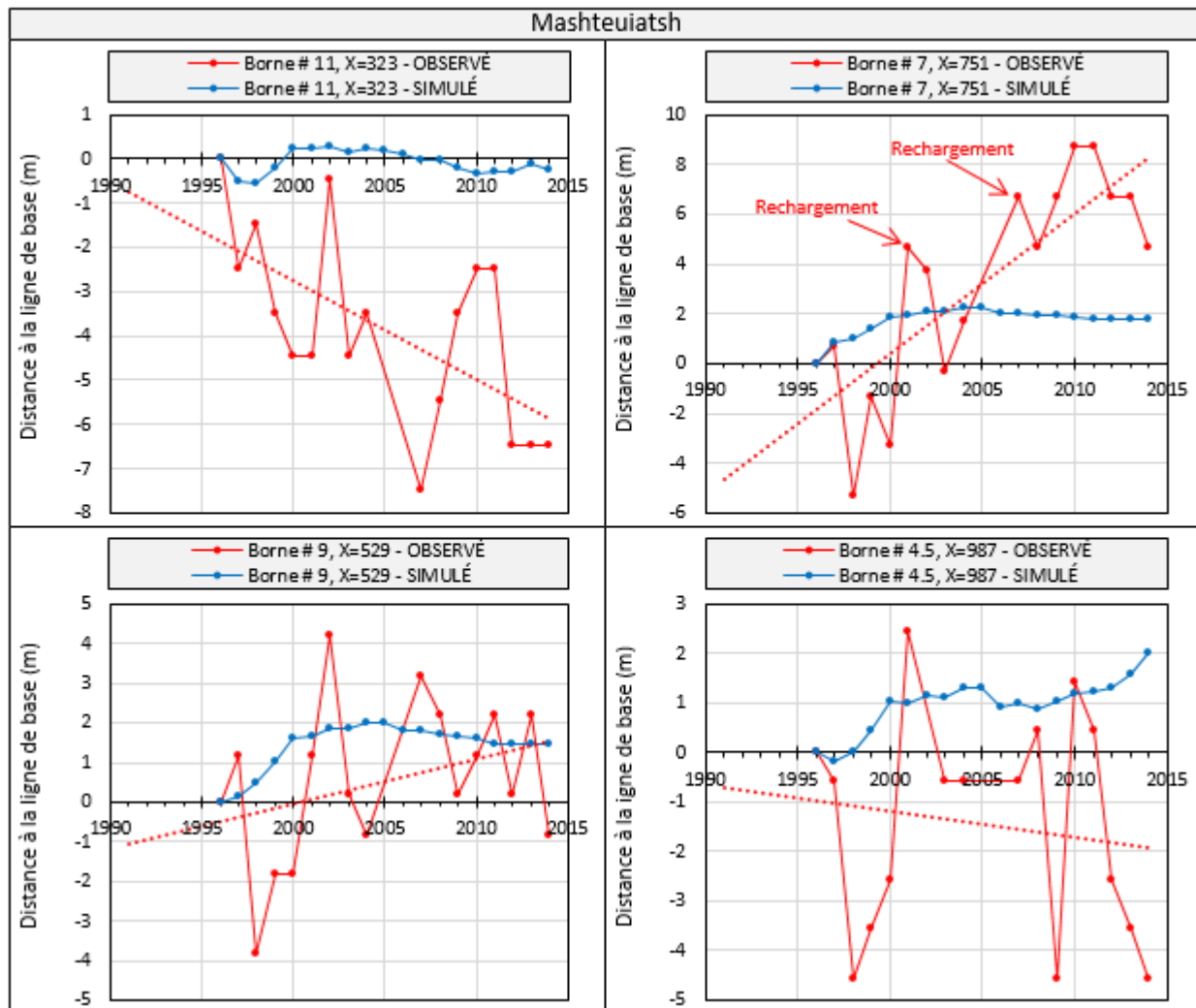


Figure B12: Calibrage du modèle – Évolution de la ligne de côte à Mashteuiatsh

ANNEXE C

Transport sédimentaire longitudinal brut et net

LISTE DES FIGURES

Figure C1: Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Saint-Gédéon Sud.....	C2
Figure C2: Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix.....	C3
Figure C3: Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Chambord (Domaine du Marais).....	C4
Figure C4: Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Chambord (Pointe).....	C5
Figure C5: Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Mashteuiatsh.....	C6
Figure C6: Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Saint-Félicien.....	C7
Figure C7: Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Dolbeau-Mistassini.....	C8
Figure C8: Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Saint-Henri Nord 1.....	C9
Figure C9: Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Saint-Henri Nord 2.....	C10

Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Saint-Gédéon Sud (période de 23 ans)

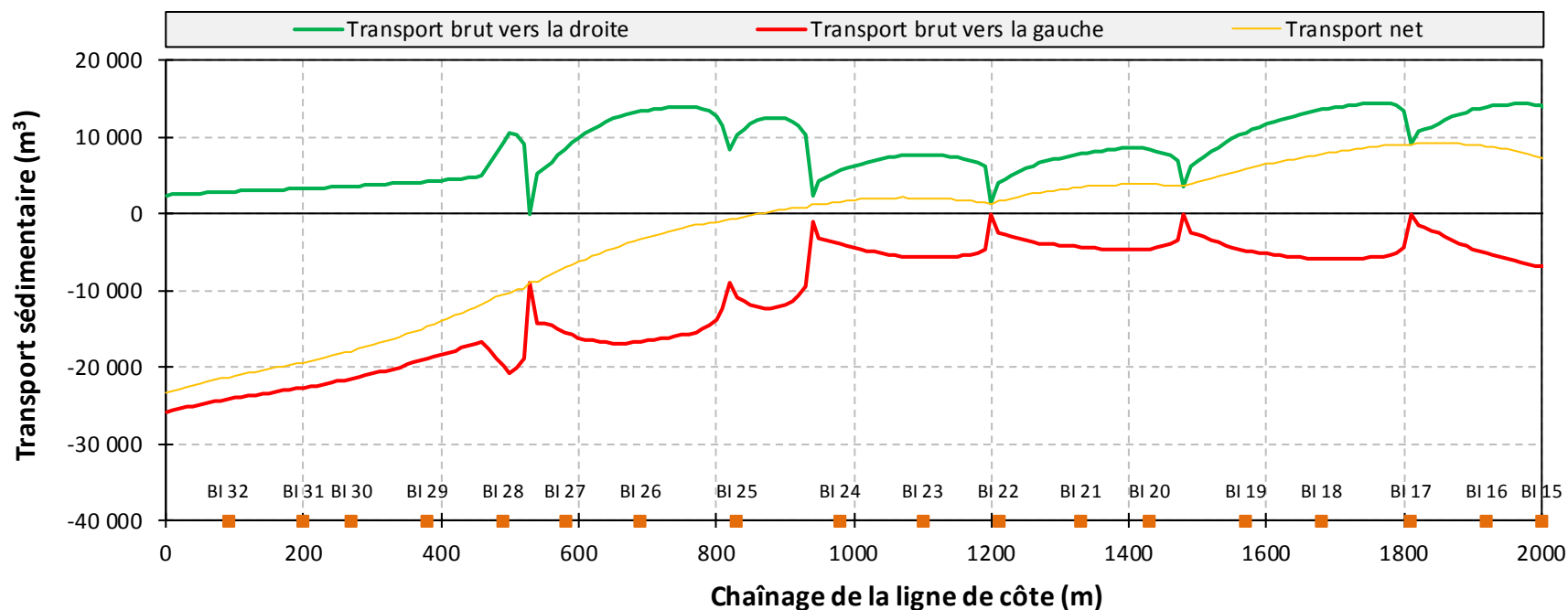


Figure C1: Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Saint-Gédéon Sud

Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix (période de 23 ans)

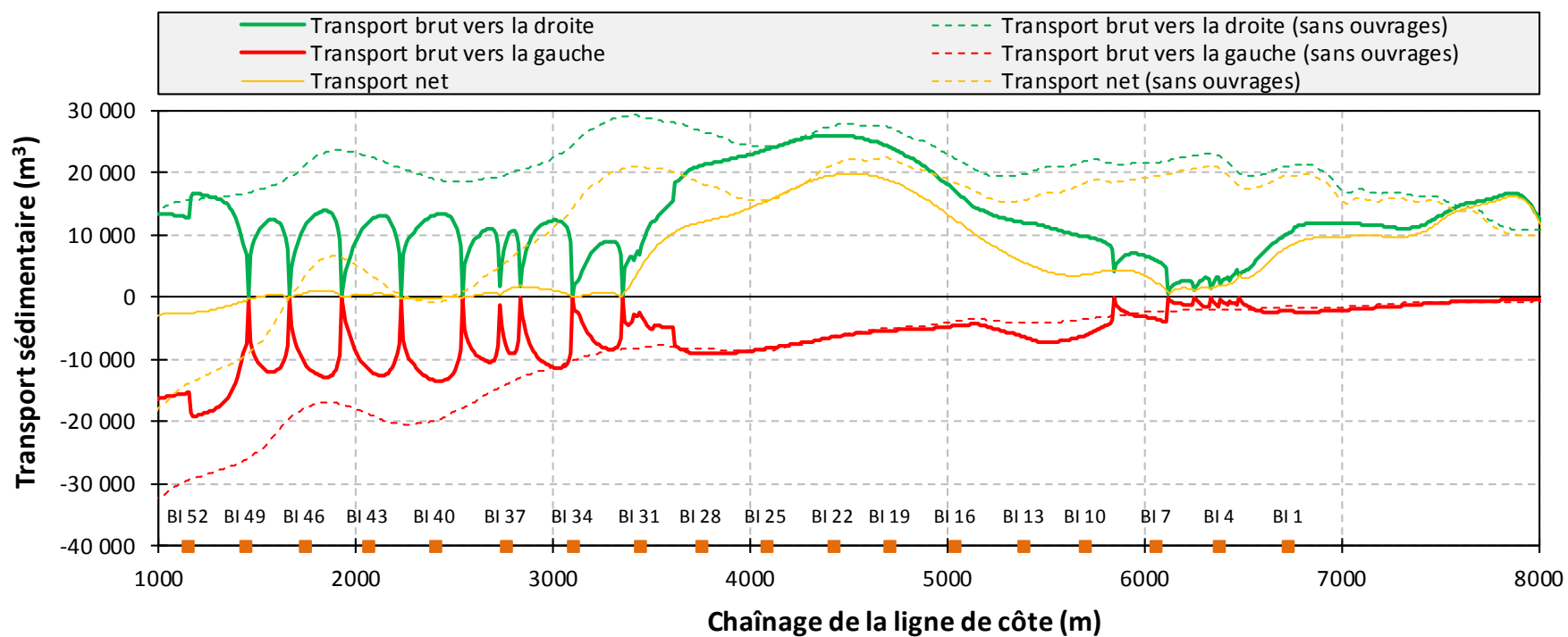


Figure C2: Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix

Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Chambord (Domaine du Marais) (période de 23 ans)

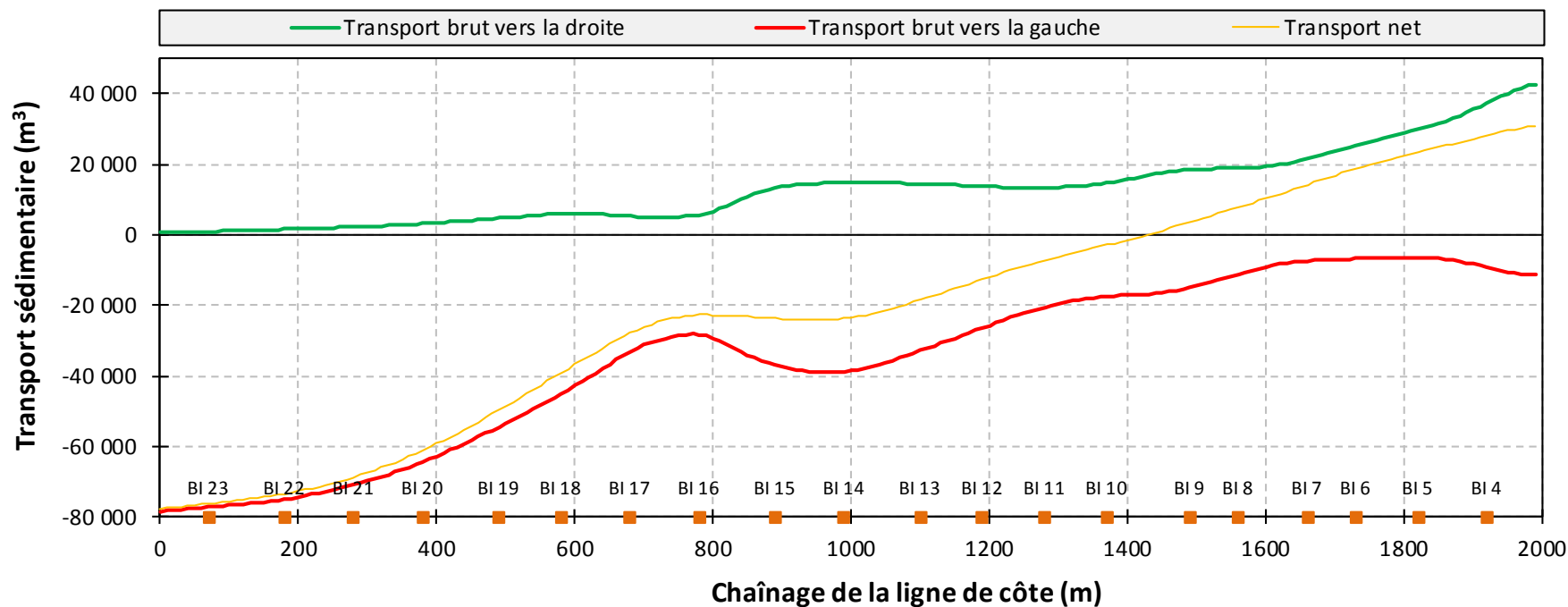


Figure C3: Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Chambord (Domaine du Marais)

Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Chambord (Pointe) (période de 23 ans)

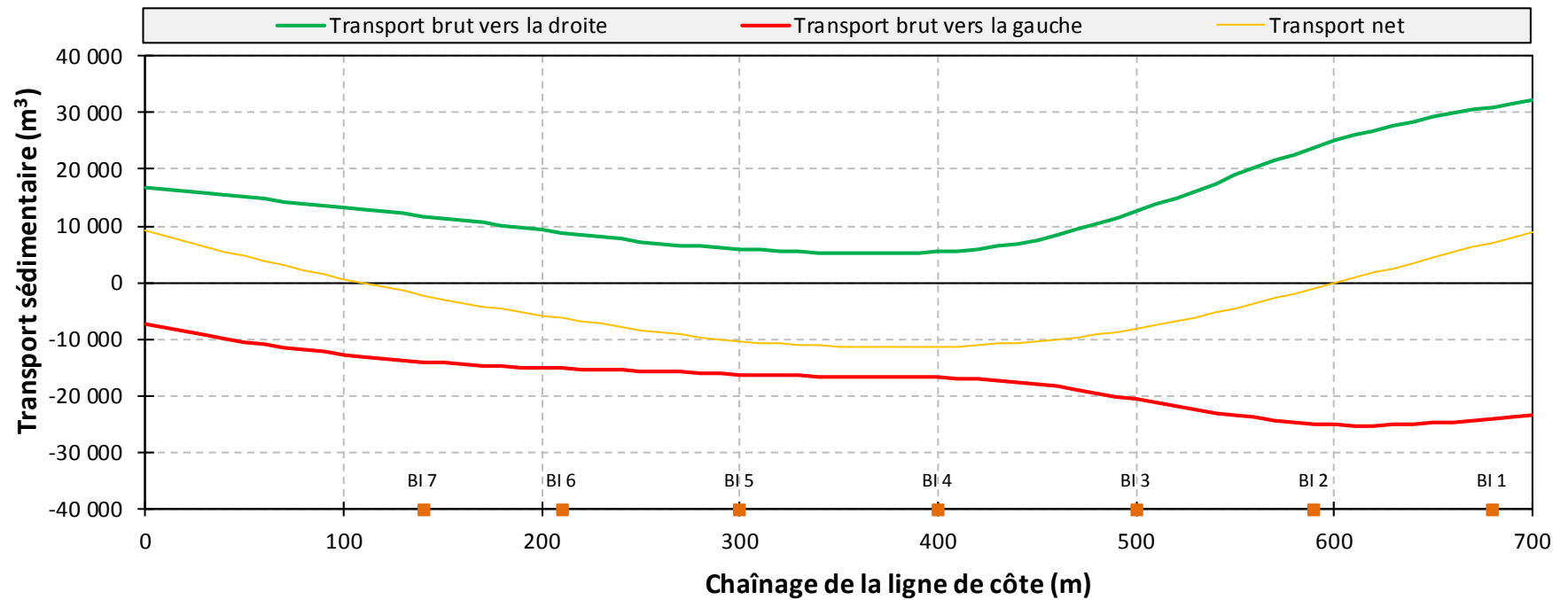


Figure C4: Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Chambord (Pointe)

Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Mashteuiatsh (période de 23 ans)

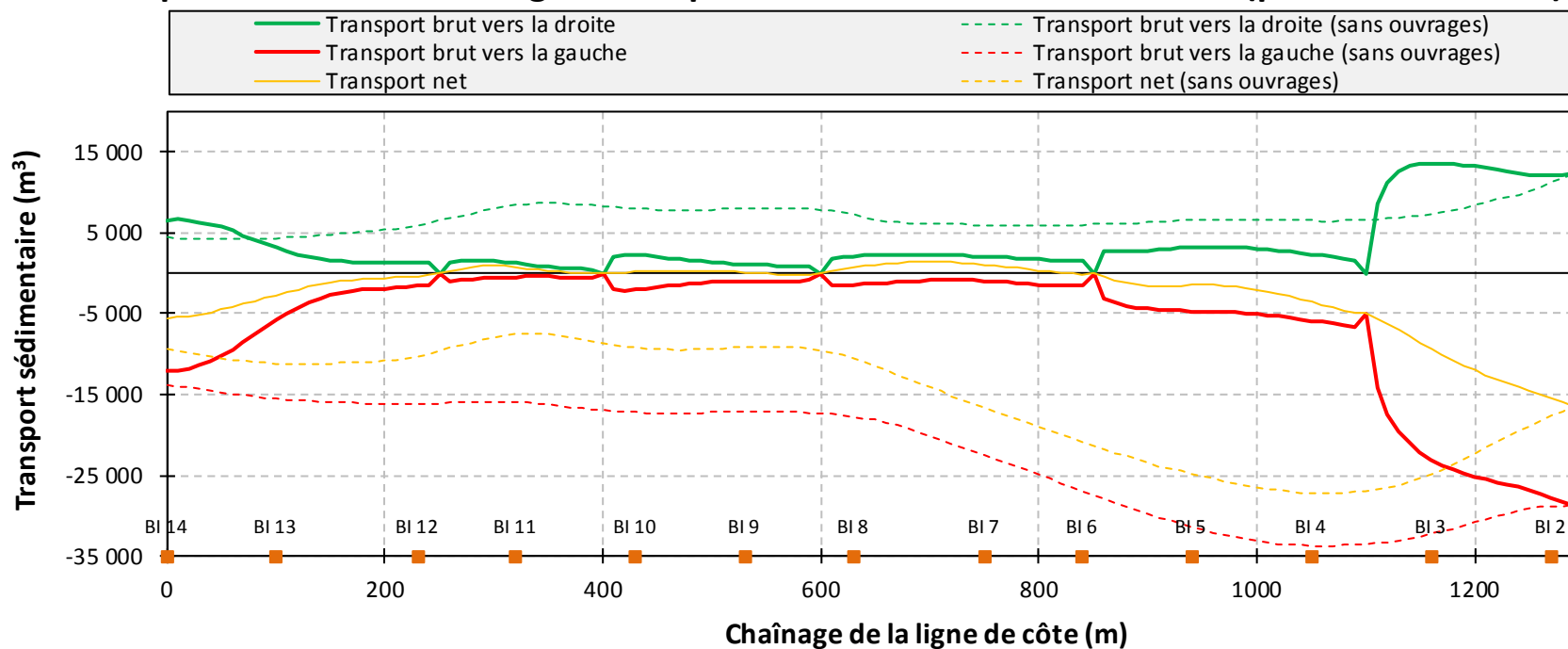


Figure C5: Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Mashteuiatsh

Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Saint-Félicien (période de 23 ans)

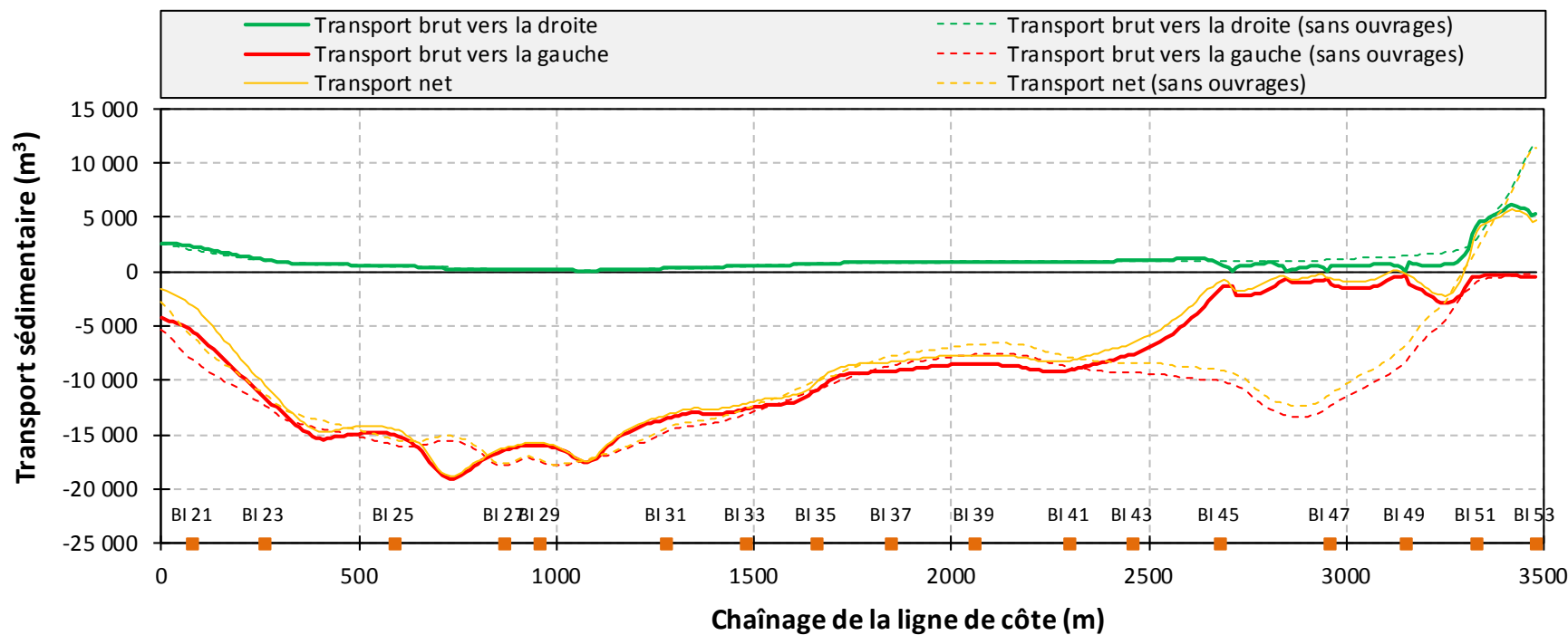


Figure C6: Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Saint-Félicien

Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Dolbeau-Mistassini (période de 23 ans)

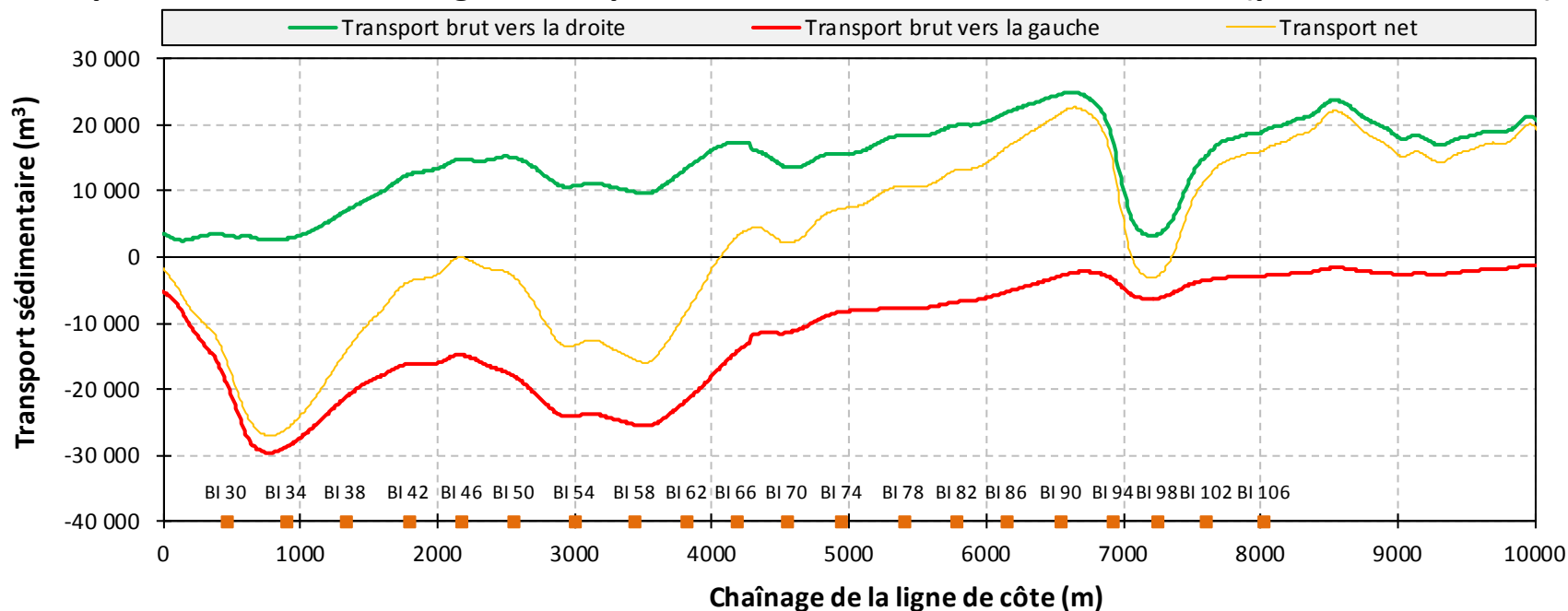


Figure C7: Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Dolbeau-Mistassini

Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord 1 (période de 23 ans)

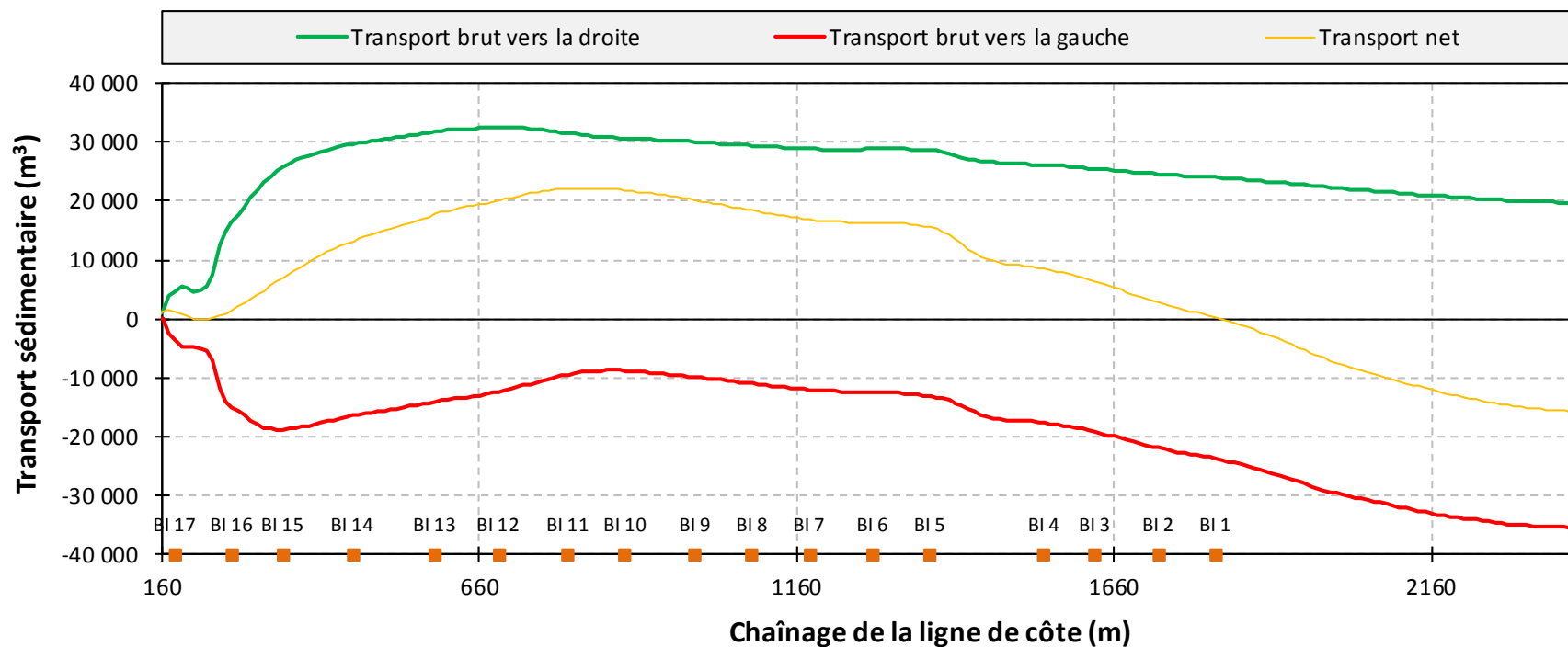


Figure C8: Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord 1

Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord 2 (période de 23 ans)

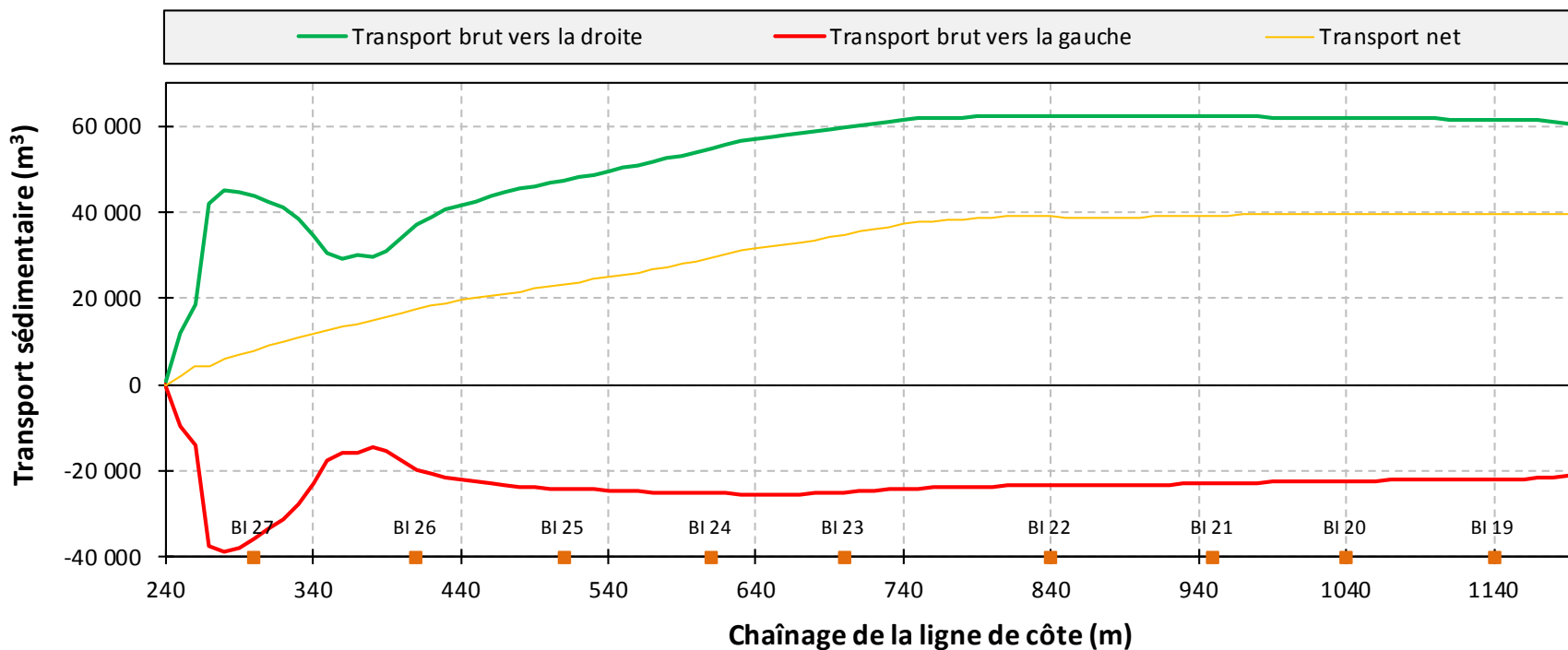


Figure C9: Transport sédimentaire longitudinal pour le secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord 2

ANNEXE D

Caractéristiques des vagues formant les événements de 72 heures

LISTE DES FIGURES

Figure D1 : Séries chronologiques de 72 heures des vagues à Saint-Gédéon Sud	D2
Figure D2 : Séries chronologiques de 72 heures des vagues à Métabetchouan-Lac-à-la-Croix	D3
Figure D3 : Séries chronologiques de 72 heures des vagues à Chambord (Domaine du Marais)	D4
Figure D4 : Séries chronologiques de 72 heures des vagues à Chambord (Pointe)	D5
Figure D5 : Séries chronologiques de 72 heures des vagues à Mashteuiatsh	D6
Figure D6 : Séries chronologiques de 72 heures des vagues à Saint-Félicien	D7
Figure D7 : Séries chronologiques de 72 heures des vagues à Dolbeau-Mistassini	D8
Figure D8 : Séries chronologiques de 72 heures des vagues à Saint-Henri-de-Taillon Nord.....	D9

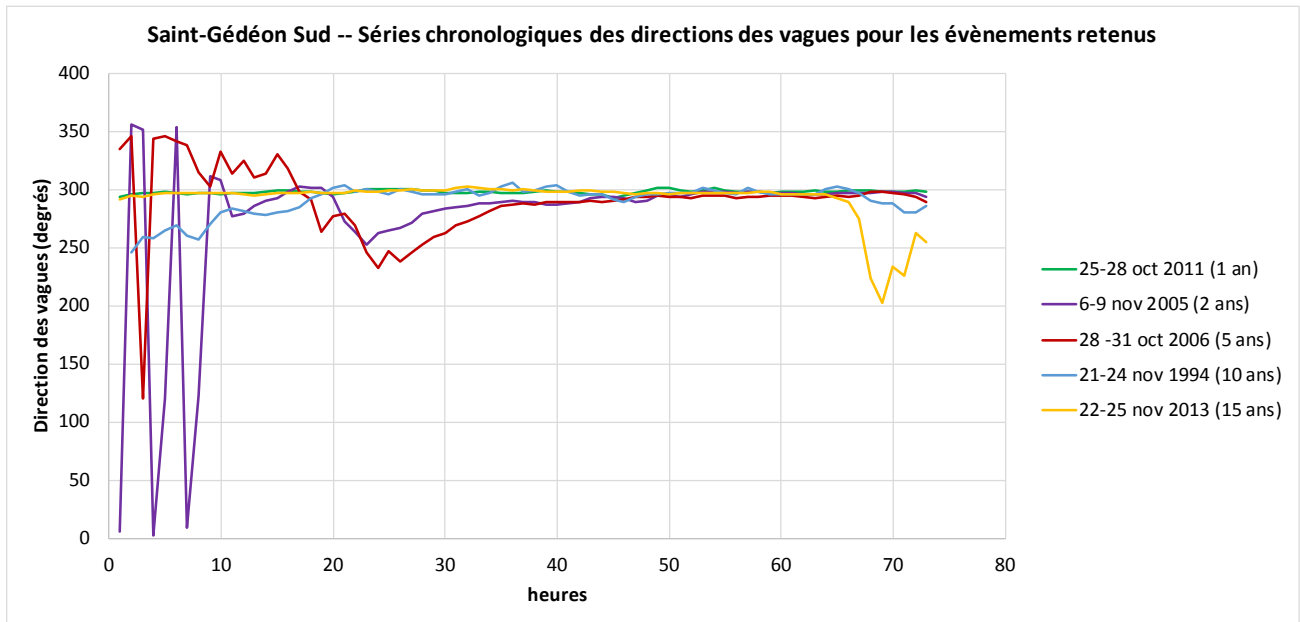
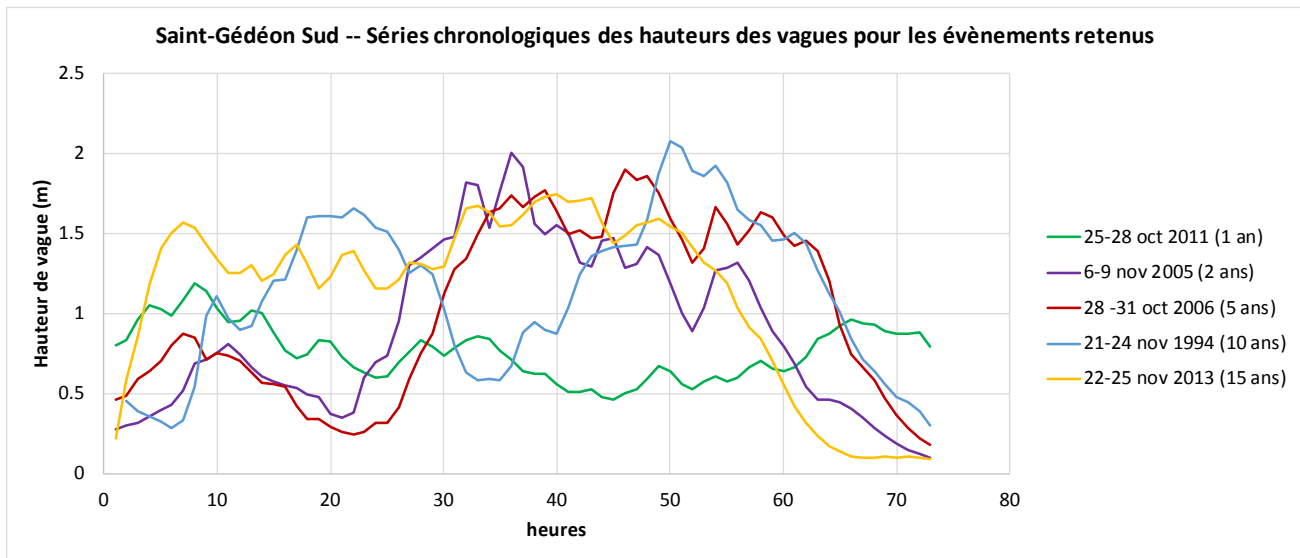


Figure D1 : Séries chronologiques de 72 heures des vagues à Saint-Gédéon Sud

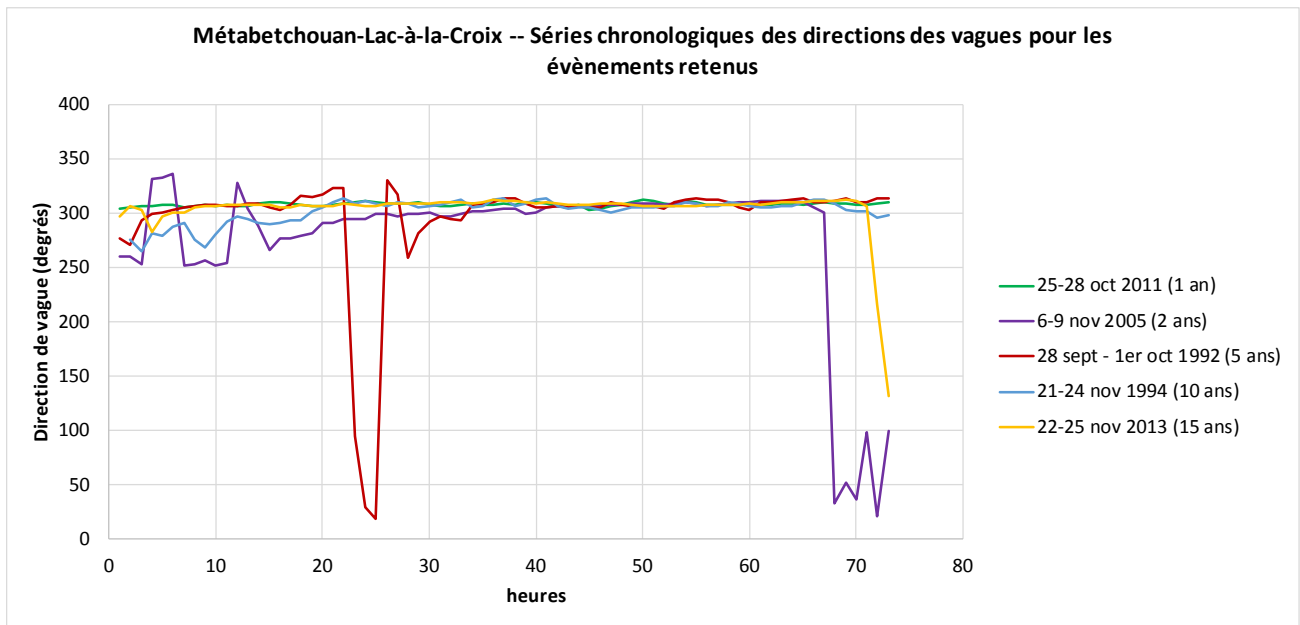
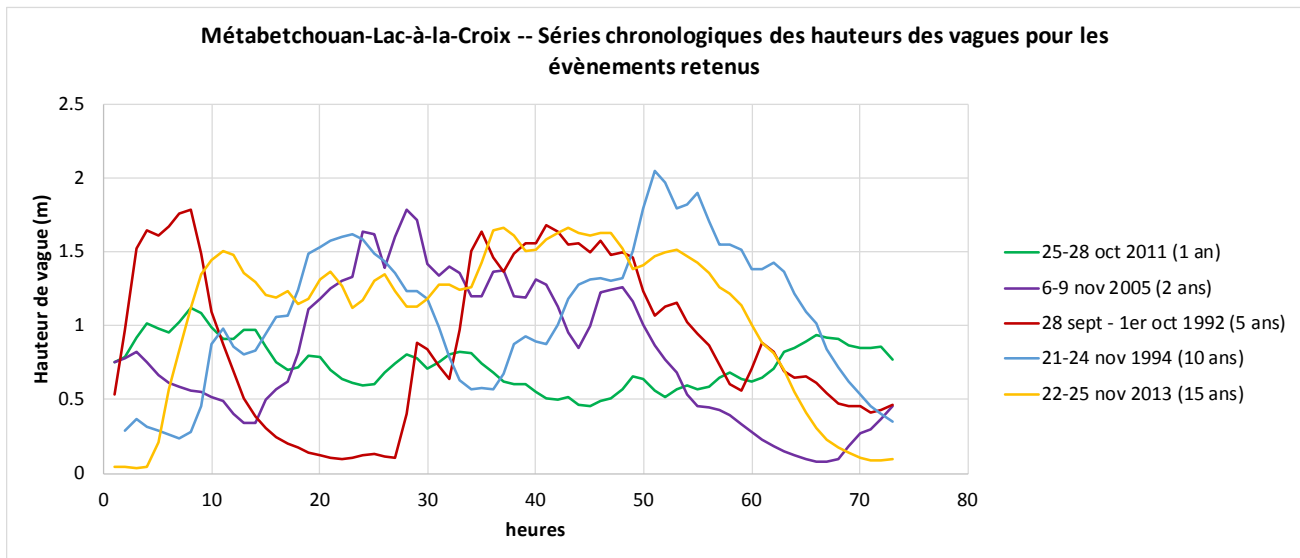


Figure D2 : Séries chronologiques de 72 heures des vagues à Métabetchouan-Lac-à-la-Croix

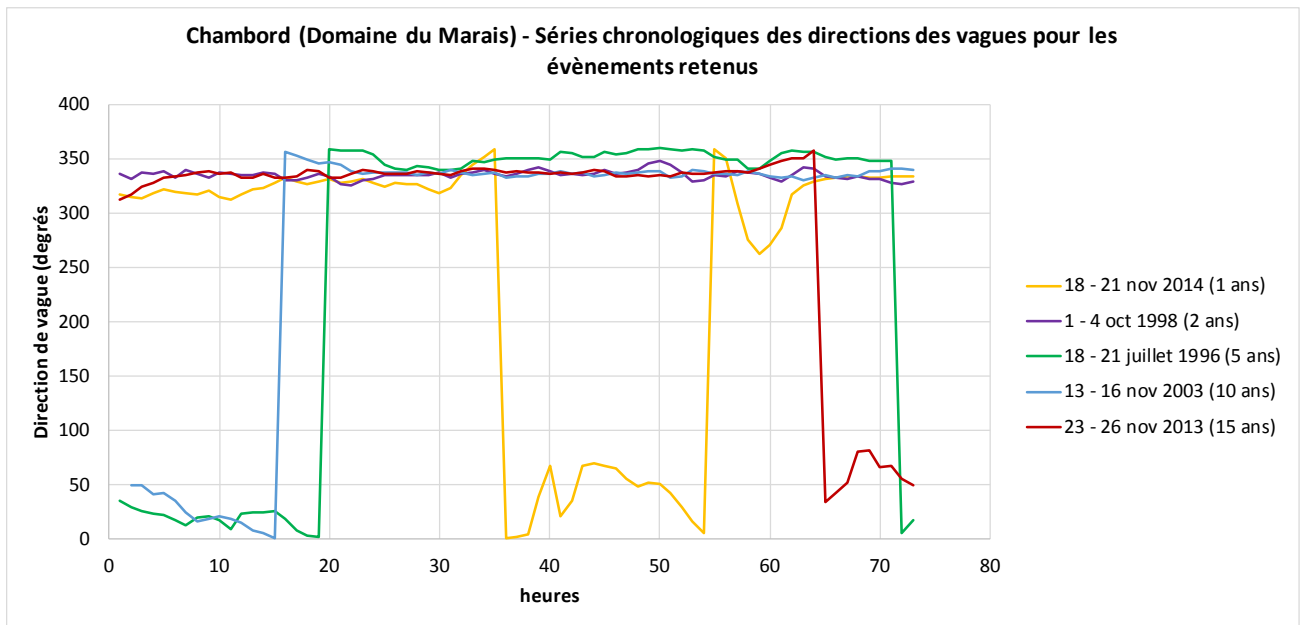
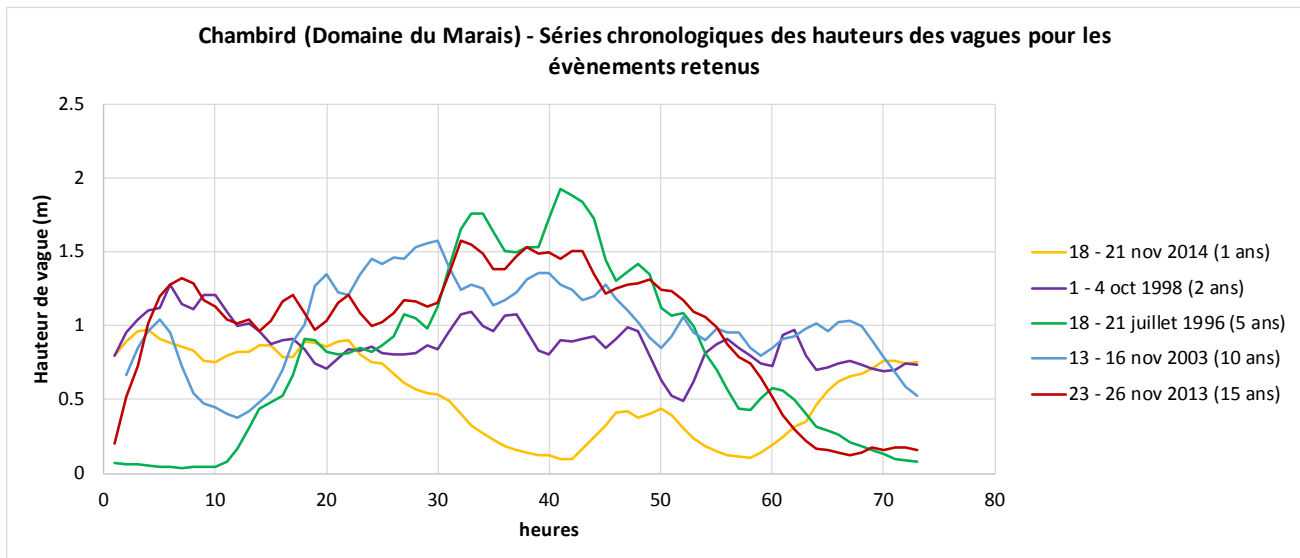


Figure D3 : Séries chronologiques de 72 heures des vagues à Chambord (Domaine du Marais)

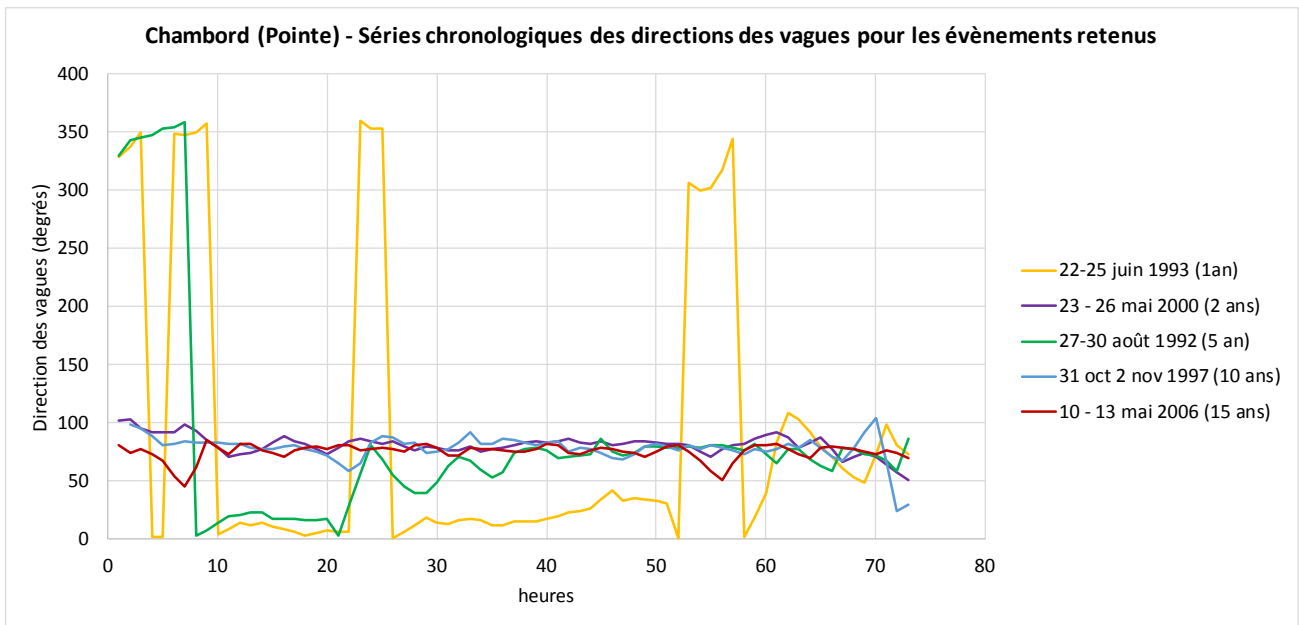
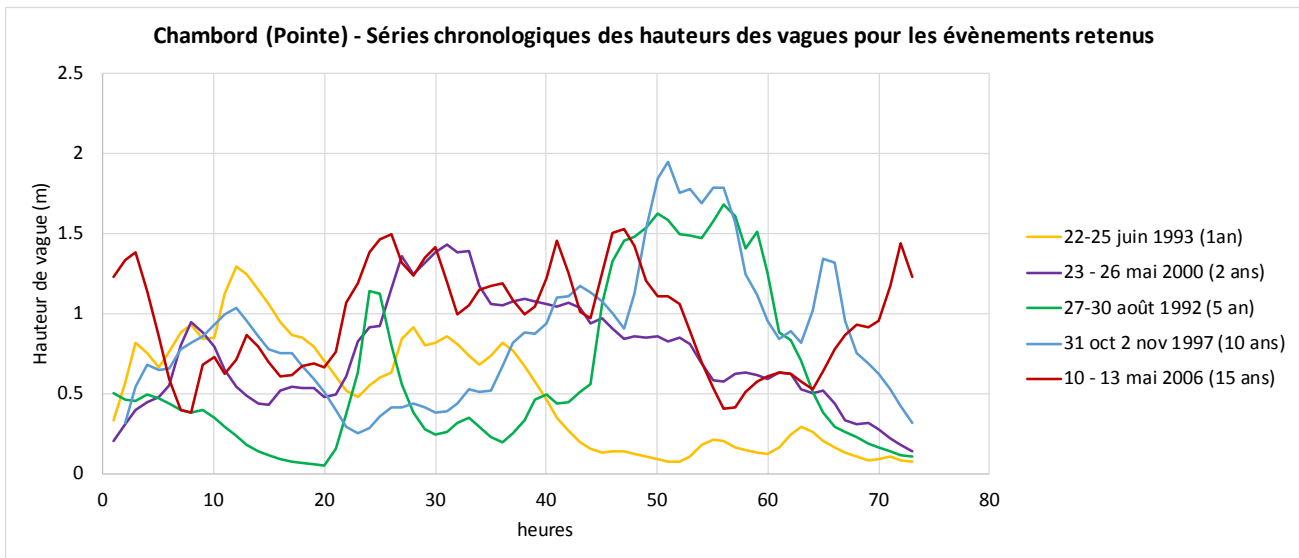


Figure D4 : Séries chronologiques de 72 heures des vagues à Chambord (Pointe)

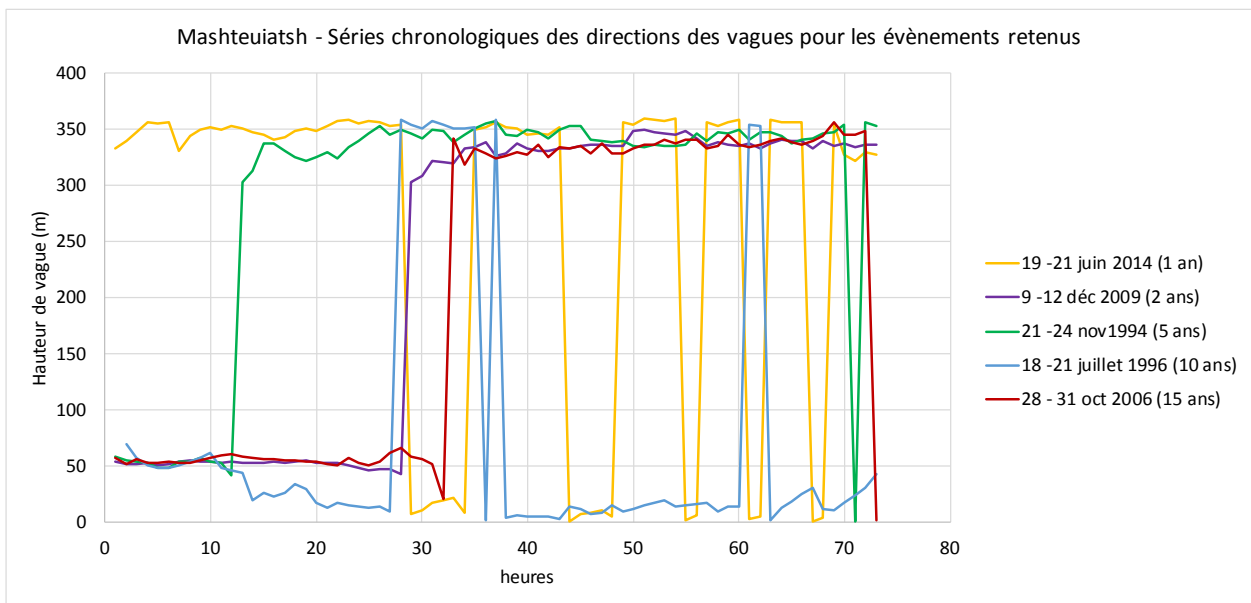
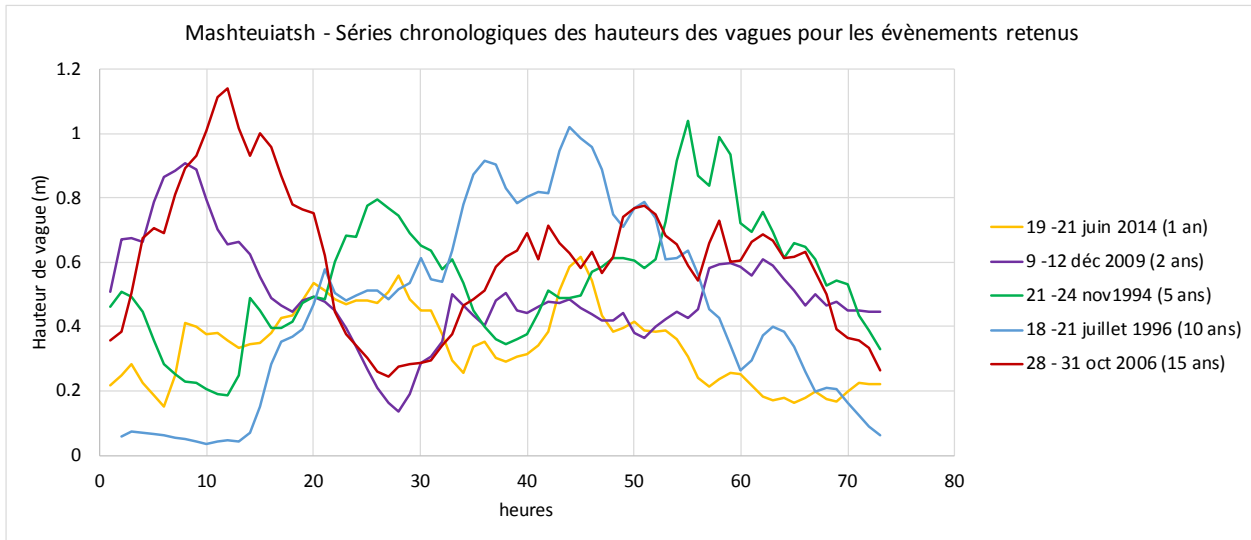


Figure D5 : Séries chronologiques de 72 heures des vagues à Mashteuiatsh

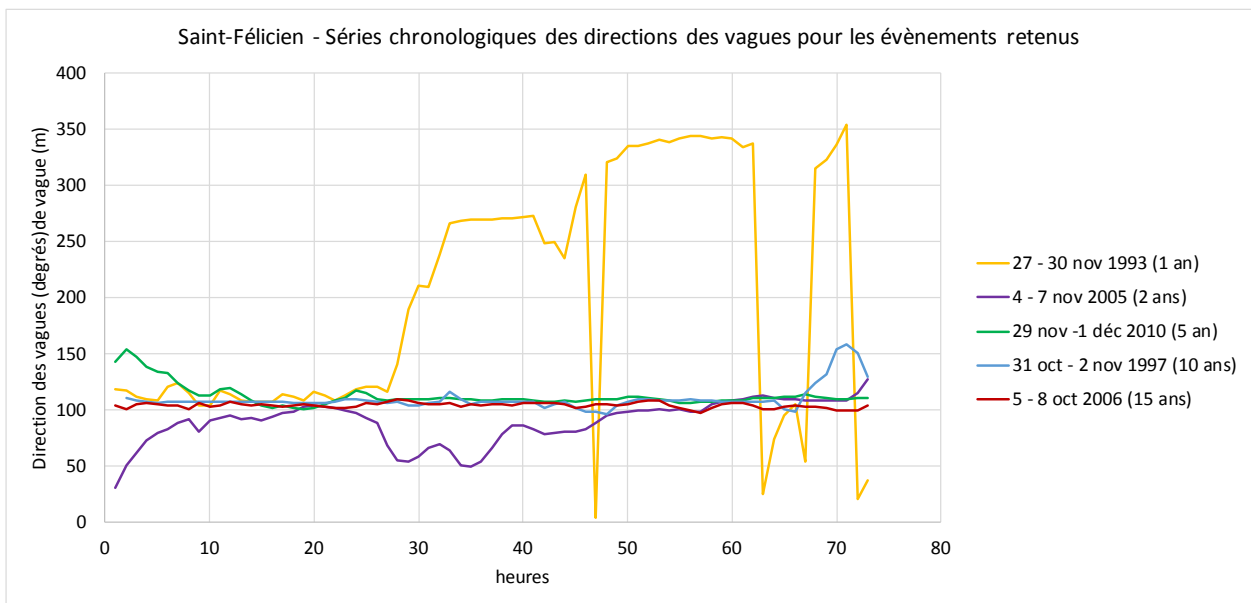
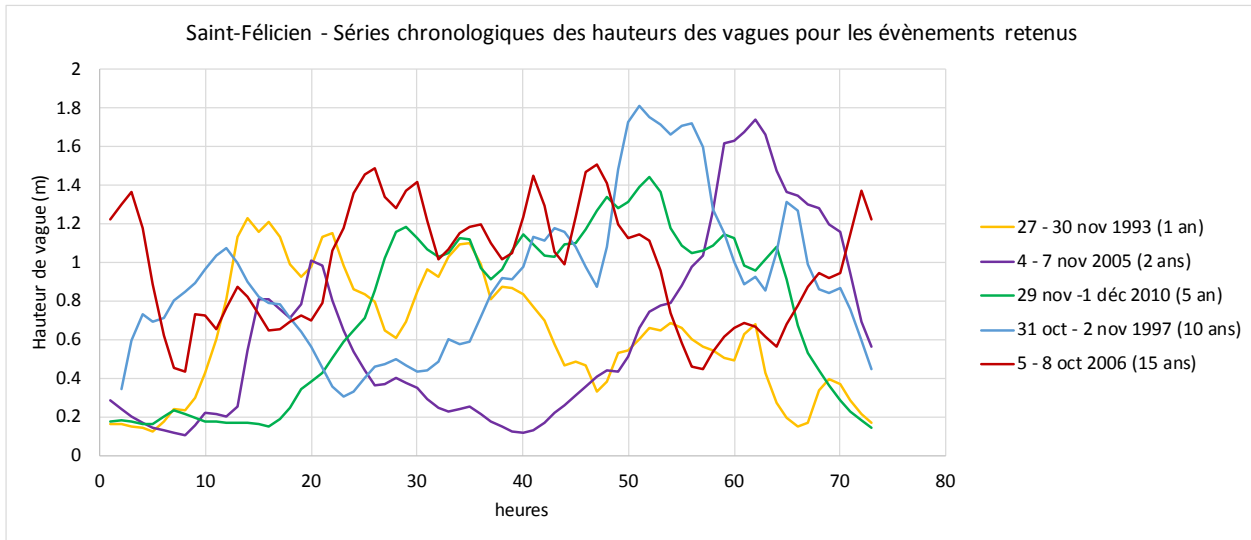


Figure D6 : Séries chronologiques de 72 heures des vagues à Saint-Félicien

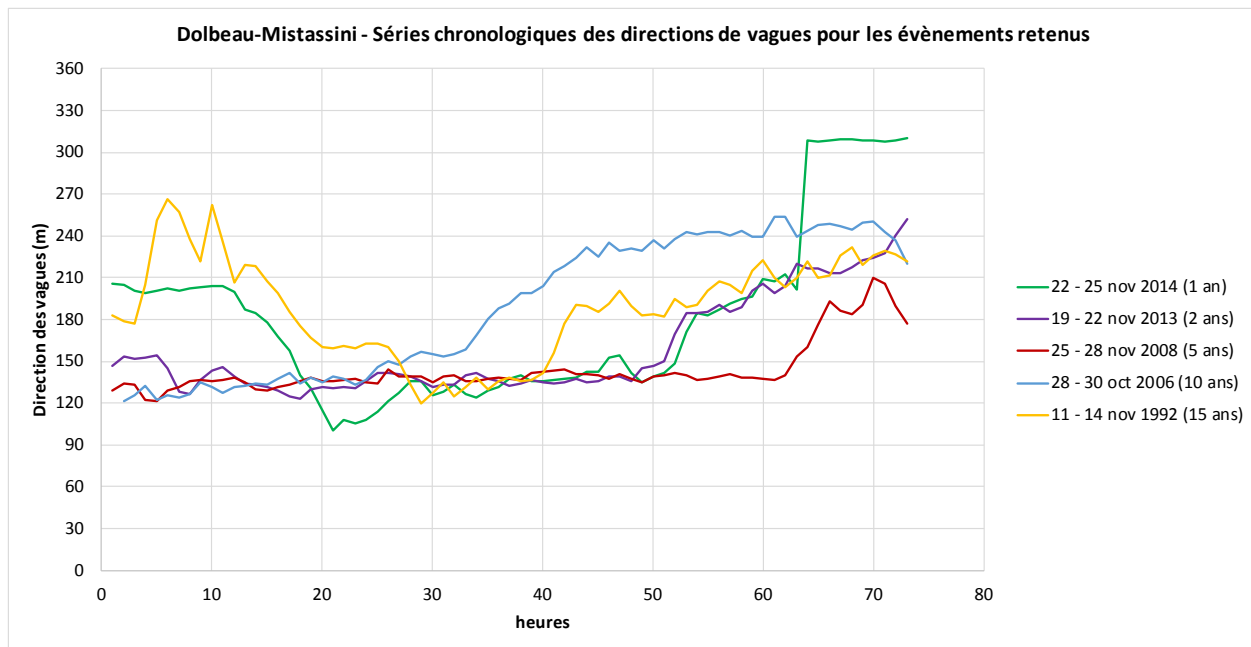
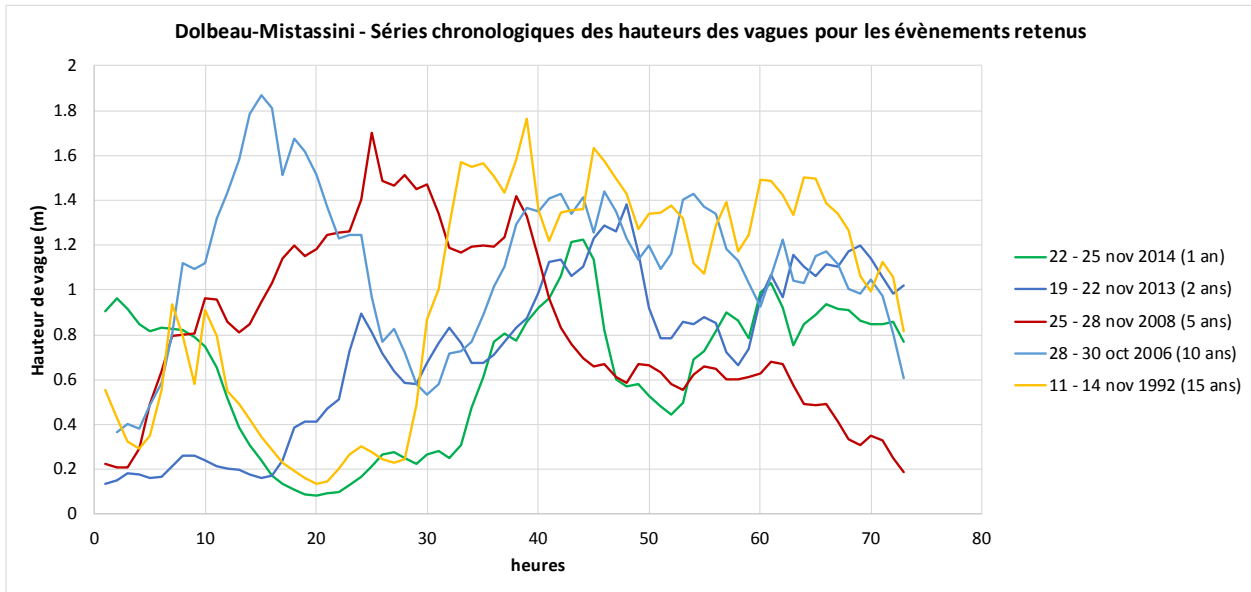


Figure D7 : Séries chronologiques de 72 heures des vagues à Dolbeau-Mistassini

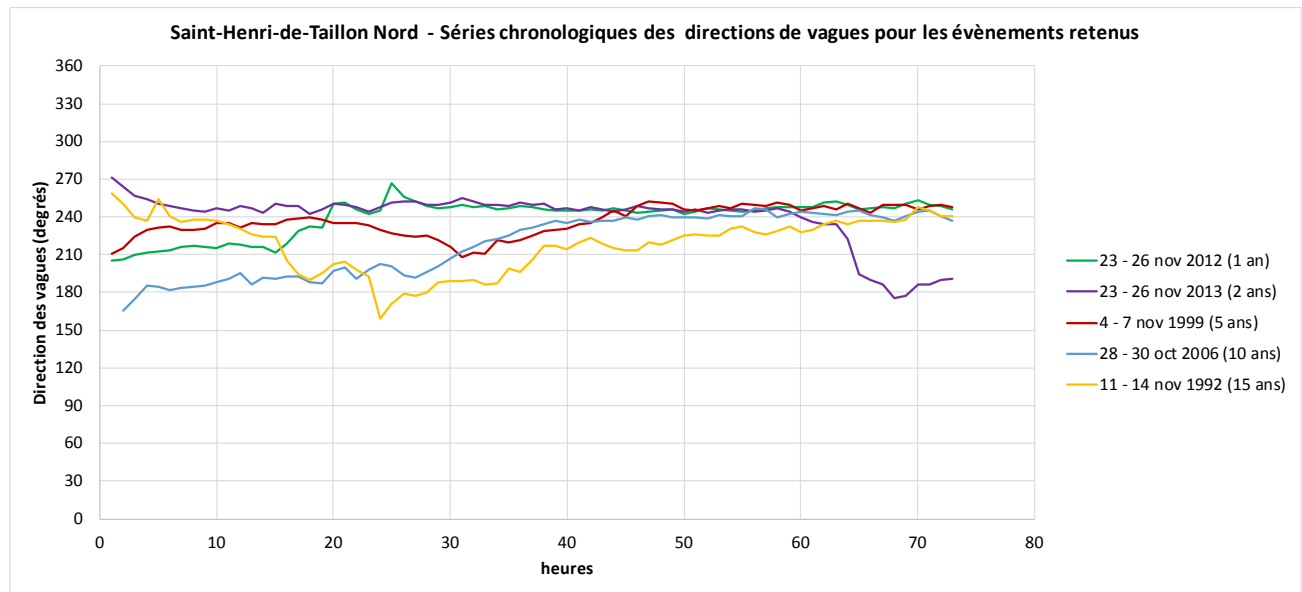
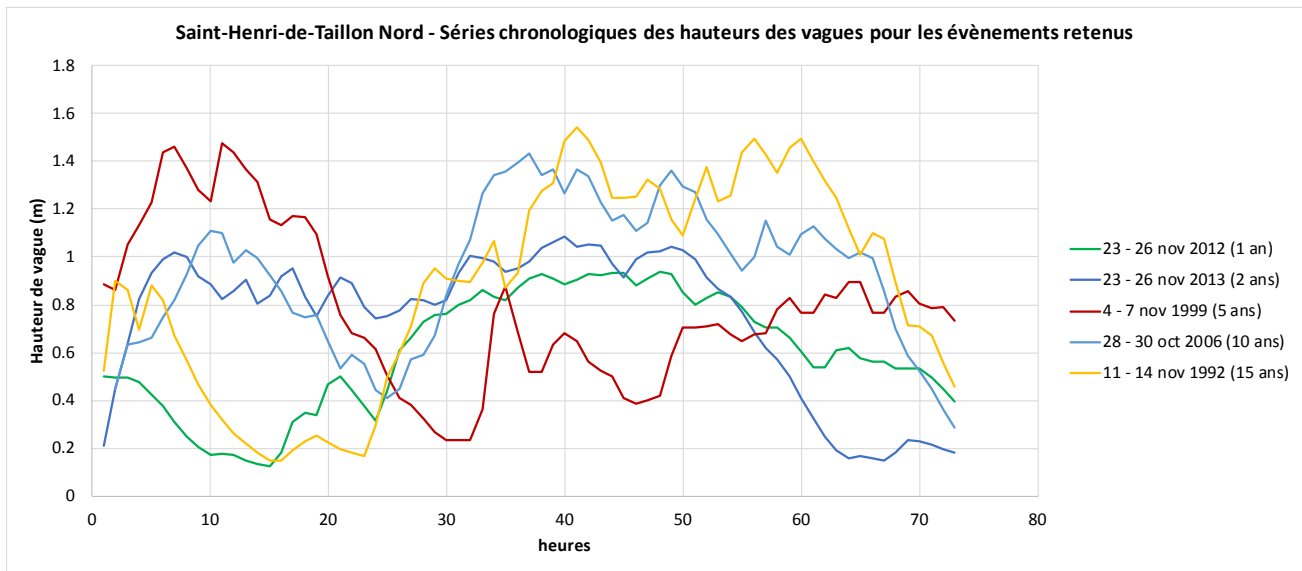


Figure D8 : Séries chronologiques de 72 heures des vagues à Saint-Henri-de-Taillon Nord

ANNEXE E

Recul de la ligne de côte simulé avec un événement de 72 heures en transport transversal

LISTE DE FIGURES

Figure E1 : Recul de la ligne de côte simulé avec un événement de 72 h pour le secteur de Saint-Gédéon Sud	E2
Figure E2: Recul de la ligne de côte simulé avec un événement de 72 h pour le secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix.....	E3
Figure E3 : Recul de la ligne de côte simulé avec un événement de 72 h pour le secteur de Chambord (Domaine du Marais).....	E4
Figure E4: Recul de la ligne de côte simulé avec un événement de 72 h pour le secteur de Chambord (Pointe)	E5
Figure E5: Recul de la ligne de côte simulé avec un événement de 72 h pour le secteur de Mashteuiatsh.....	E6
Figure E6: Recul de la ligne de côte simulé avec un événement de 72 h pour le secteur de Saint-Félicien	E7
Figure E7: Recul de la ligne de côte simulé avec un événement de 72 h pour le secteur de Dolbeau-Mistassini	E8
Figure E8: Recul de la ligne de côte simulé avec un événement de 72 h pour le secteur de Saint-Henri de Taillon Nord 1	E9
Figure E9: Recul de la ligne de côte simulé avec un événement de 72 h pour le secteur de Saint-Henri de Taillon Nord 2	E10

Recul de la ligne 16.5 pieds (m)						
Niveau d'eau en pieds						
Période de récurrence (années)	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	7	5	2.5	0	0	0
10	7	5	2	0	0	0
5	3	1.5	2	0	0	0
2	5.5	4.5	2.5	0	0	0
1	6	4.5	2.5	0	0	0

Secteur de Saint-Gédéon Sud (A, borne 29)

Recul de la ligne de niveau d'eau(m)						
Niveau d'eau en pieds						
Période de récurrence (années)	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	7.5	5	4.5	4	14	5.5
10	5.5	5	3.5	2.5	13.5	5.5
5	1.5	1.5	3	3	14	4
2	6	4.5	4.5	2.5	12.5	6
1	5.5	4.5	4	3.5	9	4.5

Figure E1 : Recul de la ligne de côte simulé avec un événement de 72 h pour le secteur de Saint-Gédéon Sud

Recul de la ligne 16.5 pieds (m)						
Niveau d'eau en pieds						
Période de récurrence (années)	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	7.5	5	1.5	0	0	0
10	7.5	4	0.5	0	0	0
5	8.5	4.5	1	0	0	0
2	8.5	3.5	1	0	0	0
1	6.5	3.5	0.5	0	0	0

Secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix

Recul de la ligne de niveau d'eau(m)						
Niveau d'eau en pieds						
Période de récurrence (années)	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	5	5	4	3	4	5.5
10	4.5	4	2.5	2.5	4	4.5
5	5.5	4.5	3	2	5	2
2	5.5	3.5	3.5	3	4	4
1	3.5	3.5	3	2.5	3	3

Figure E2: Recul de la ligne de côte simulé avec un événement de 72 h pour le secteur de Métabetchouan-Lac-à-la-Croix

Recul de la ligne 16.5 pieds (m)						
Niveau d'eau en pieds						
Période de récurrence (années)	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	2.5	2.5	0	0	0	0
10	1.5	0	0	0	0	0
5	5.5	3.5	0	0	0	0
2	5.5	2.5	0	0	0	0
1	5.5	2.5	0	0	0	0

Secteur Chambord (Domaine du Marais)

Recul de la ligne de niveau d'eau(m)						
Niveau d'eau en pieds						
Période de récurrence (années)	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	0.5	2.5	2	2.5	7	4
10	0	0	0	0	6.5	3.5
5	3.5	3.5	2.5	3	7.5	5.5
2	3	2.5	2	2.5	5.5	4
1	3	2.5	1.5	2	5	3.5

Figure E3 : Recul de la ligne de côte simulé avec un événement de 72 h pour le secteur de Chambord (Domaine du Marais)

Recul de la ligne 16.5 pieds (m)						
Niveau d'eau en pieds						
Période de récurrence (années)	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	10	5.5	1.5	0	0	0
10	7	2	0	0	0	0
5	8.5	3.5	0.5	0	0	0
2	4.5	2.5	0	0	0	0
1	6	2	0.5	0	0	0

Secteur Chambord (Pointe)

Recul de la ligne de niveau d'eau(m)						
Niveau d'eau en pieds						
Période de récurrence (années)	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	7.5	5.5	4.5	3.5	1.5	3
10	5.5	2	2	3.5	1	2
5	8	3.5	2.5	2	1	1.5
2	2.5	2.5	2	1.5	1	2
1	4.5	2	3	1.5	0.5	2

Figure E4: Recul de la ligne de côte simulé avec un événement de 72 h pour le secteur de Chambord (Pointe)

Recul de la ligne 16.5 pieds (m)						
Niveau d'eau en pieds						
Période de récurrence (années)	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	4	2	0	0	0	0
10	4.5	2	0	0	0	0
5	6.5	2.5	0	0	0	0
2	4	2.5	0	0	0	0
1	4.5	1	0	0	0	0

Secteur de Mashteuiatsh

Recul de la ligne de niveau d'eau(m)						
Niveau d'eau en pieds						
Période de récurrence (années)	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	2	2	1.5	0	0.5	0
10	2	2	1	1	0.5	0
5	3.5	2.5	1.5	1	0.5	0
2	2.5	2.5	1.5	0	0.5	0
1	1.5	1	0.5	0.5	0.5	0

Figure E5: Recul de la ligne de côte simulé avec un événement de 72 h pour le secteur de Mashteuiatsh

Recul de la ligne 16.5 pieds (m)						
Niveau d'eau en pieds						
Période de récurrence (années)	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	8.5	5.5	0	0	0	0
10	8.5	4	0	0	0	0
5	6.5	5	0	0	0	0
2	7	4	0	0	0	0
1	5	3.5	0	0	0	0

Secteur de Saint-Félicien

Recul de la ligne de niveau d'eau(m)						
Niveau d'eau en pieds						
Période de récurrence (années)	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	6.5	5.5	3.5	0	0	0
10	5.5	4	2.5	0.5	0	0
5	5	5	1	0.5	0	0
2	4.5	4	2.5	0	0	0
1	5	3.5	2	0.5	0	0

Figure E6: Recul de la ligne de côte simulé avec un événement de 72 h pour le secteur de Saint-Félicien

Recul de la ligne 16.5 pieds (m)						
Niveau d'eau en pieds						
Période de récurrence (années)	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	6.5	4	1	0	0	0
10	6.5	2.5	0.5	0	0	0
5	7	2	0.5	0	0	0
2	3.5	1.5	0	0	0	0
1	5	4	1	0	0	0

Secteur de Dolbeau-Mistassini

Recul de la ligne de niveau d'eau(m)						
Niveau d'eau en pieds						
Période de récurrence (années)	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	5.5	4	2.5	1.5	0.5	0
10	6.5	2.5	2	1	0	0
5	7	2	2	1	0	0
2	4.5	1.5	1	1.5	0	0
1	5.5	4	3.5	1.5	0	0

Figure E7: Recul de la ligne de côte simulé avec un événement de 72 h pour le secteur de Dolbeau-Mistassini

Recul de la ligne 16.5 pieds (m)						
Niveau d'eau en pieds						
Période de récurrence (années)	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	6	3.5	1	0	0	0
10	4	1.5	0	0	0	0
5	7	4	1	0	0	0
2	5	3	0.5	0	0	0
1	5	3	0.5	0	0	0

Secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord 1

Recul de la ligne de niveau d'eau(m)						
Niveau d'eau en pieds						
Période de récurrence (années)	17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15	4.5	3.5	3	2.5	1.5	1
10	3	1.5	2	3.5	1.5	0
5	5	4	3.5	2.5	2.5	0
2	4	3	2.5	2	1.5	2.5
1	3.5	3	2.5	2.5	1.5	0

Figure E8: Recul de la ligne de côte simulé avec un événement de 72 h pour le secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord 1

		Recul de la ligne 16.5 pieds (m)					
		Niveau d'eau en pieds					
Période de récurrence (années)		17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15		6.5	4	1	0	0	0
10		5.5	4	2	0	0	0
5		9	6	2	0	0	0
2		6.5	4.5	1	0	0	0
1		6	4	0.5	0	0	0

Secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord 2

		Recul de la ligne de niveau d'eau(m)					
		Niveau d'eau en pieds					
Période de récurrence (années)		17.5	16.5	15.5	14	12	9.5
15		5	4	3.5	1	16.5	3.5
10		4.5	4	4	1.5	15.5	5
5		7.5	6	4	1.5	18	5
2		5.5	4.5	3.5	1.5	14	3.5
1		4.5	4	2.5	0.5	8	3

Figure E9: Recul de la ligne de côte simulé avec un événement de 72 h pour le secteur de Saint-Henri-de-Taillon Nord 2