

Université du Québec
Institut National de la Recherche Scientifique
Centre Eau Terre Environnement

ANALYSE DENDROCHRONOLOGIQUE DES VARIATIONS DU NIVEAU D'EAU DE LACS DE LA JAMÉSIE, HAUT-BORÉAL, QUÉBEC

Par
Marie-Janick Robitaille

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
En sciences de la terre
programme géré conjointement par l'INRS et l'Université Laval

Jury d'évaluation

Président du jury et examineur interne	Christian Bégin CGC
Examineur externe	Martin Simard Université Laval
Directeur de recherche	Pierre Francus INRS-ETE
Codirecteur de recherche	Étienne Boucher UQAM

REMERCIEMENTS

J'ai longtemps douté pouvoir terminer ce mémoire de maîtrise. L'arrivée de mes deux filles, trois championnats du monde de rafting et de multiples aventures plus tard et m'y voilà. Cependant, cela n'aurait pas été possible sans le soutien de nombreuses personnes envers lesquelles je tiens à exprimer mes profonds remerciements.

Pour commencer je tiens à remercier mon incroyable directeur de recherche, Yves Bégin, qui a continué de croire en moi malgré les mois (et les années) qui passaient. Merci pour sa patience, son sourire et sa passion contagieuse du nord du Québec. Les mots ne suffisent pas. Un grand merci à mon co-directeur, Étienne Boucher, pour son temps passé au fin fond des bois, ses conseils et son amour des statistiques et finalement, merci à Pierre Francus, mon deuxième directeur de recherche pour son aide dans les derniers kilomètres de cette épopée.

Merci à l'équipe d'ARCHIVES de m'avoir inclus dans votre grand projet et merci particulier à Joëlle Marion d'avoir pris le temps de répondre à mes 1001 questions sur le coin de la porte et dans le laboratoire de dendrochronologie.

Merci encore à Pénélope Leclerc, Simon Williams, Claudie Giguère, Annie-Claude Robitaille et Thibault Labarre pour leur aide précieuse sur le terrain à braver les mouches, le froid, la pluie, la neige et le printemps jamésien.

Pour terminer, merci à ma famille, mes amis, mon amoureux pour tout!

AVANT-PROPOS

Ce projet de maîtrise a été cofinancé par les organismes suivants : le consortium Ouranos (Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques), le CRSNG, Hydro-Québec, Environnement Canada, la Commission géologique du Canada, le programme de formation scientifique dans le Nord du ministère des affaires indiennes et du Nord du Canada, le réseau de centres d'excellences ArcticNet et le FRQNT. Un appui logistique important a aussi été accordé par le Centre d'études nordiques et la localité de Radisson.

Ce mémoire de maîtrise s'inscrit dans un projet plus vaste (Projet ARCHIVES) dont l'objectif principal est de reconstruire, à l'aide d'indicateurs dendrochronologiques, l'historique des fluctuations de l'hydraulicité depuis environ les 200 dernières années dans la région de la Jamésie, au Québec. Les données produites serviront à modéliser des scénarios régionaux sur l'évolution de l'hydraulicité et les impacts anticipés sur les différents écosystèmes terrestres et aquatiques, de même que sur la gestion des grands ensembles hydro-électriques appartenant au complexe hydro-électrique de la Baie-James.

Par ailleurs, j'ai reçu du soutien financier de la part du Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie (CRSNG) lors de ma deuxième année de maîtrise avec la bourse d'études supérieures du Canada Alexander-Graham-Bell.

Les débits journaliers provenant des apports harmonisés des bassins versants LaGrande-2 et lac Sakami et Eastmain-1 utilisés pour la section sur l'analyse des variables hydrologiques sont la propriété d'Hydro-Québec et constituent de l'information stratégique pour l'entreprise d'État. Ils peuvent être disponibles uniquement sur demande auprès d'Hydro-Québec.

RÉSUMÉ

L'objectif principal de ce mémoire de maîtrise est de reconstruire, à l'aide d'indicateurs dendrochronologiques, l'historique des fluctuations de l'hydraulicité depuis environ les 200 dernières années dans la région de la Jamésie, au Québec. Comme les registres instrumentaux servant à évaluer les apports en eau des réservoirs hydroélectriques de la région de la Baie James sont de courte durée (moins de 50 ans) et discontinus dans le temps et les stations d'enregistrement peu nombreuses et distribuées de façon sporadique, il est difficile d'évaluer si les variations observées lors de cette période (niveaux d'eau élevés prédominants entre 1963 et 1982 et niveaux d'eau bas entre 1983 et 2005) correspondent à des variations positives ou négatives autour d'une tendance séculaire ou à un réel changement de régime hydrologique. Pour répondre à cela, les rives de trois lacs de la région situés en marge de leur bassin versant respectifs ont été échantillonnées (Miron, Mirabelli et Rodayer) afin de construire deux chronologies : une chronologie d'abrasion glacielle et une chronologie de début de séquence de bois de réaction. La cartographie et la segmentation des rives a également été réalisée. Les résultats montrent qu'il y a eu une augmentation de la fréquence de cicatrices glacielles et de début de séquence de bois de réaction dans la deuxième moitié du XX^e siècle et la chronologie d'abrasion glacielle est bien corrélée aux variables hydrologiques pour la période 1960-2010. Il est donc possible de conclure que le reste des chronologies sont valables. Subséquemment, les résultats de ce mémoire sont cohérents avec la littérature scientifique et l'hypothèse selon laquelle l'amplitude des apports mesurés depuis 1963 soit de l'ordre des fluctuations historiques régionales, mais s'inscrivant dans une tendance générale à la hausse à l'échelle des deux derniers siècles semble être fondée. Les données produites serviront à modéliser des scénarios régionaux sur l'évolution de l'hydraulicité et les impacts anticipés sur les différents écosystèmes terrestres et aquatiques, de même que sur la gestion des grands ensembles hydro-électriques appartenant au complexe hydro-électrique de la Baie-James.

Mots clés : Dendrochronologie; analyse hydro-climatique; cicatrices d'abrasion glacielle; érosion hydro-dynamique; régime hydrique; climat.

ABSTRACT

The main objective of this Master's thesis is to use dendrochronological and geomorphological indicators of water level variations to assess water supply trends over the last two centuries in the High-Boreal region of Quebec. Instrumental records for the assessment of water supply to hydroelectric reservoirs in Quebec are of short duration (less than 50 years), and the recordings are limited to a few stations across this vast territory. A comprehensive review of hydrographs showed predominantly high water levels between 1963 and 1982, followed by low water levels between 1983 and 2005, which became a real concern for Hydro-Quebec. This study aims to reconstruct the years of potentially high hydrological events across a latitudinal transect in the James Bay area. The hypothesis is that these events correspond to variations in water supply around a secular trend, instead of a real hydrological regime change. Lakeshore systems of three lakes distributed over 400 km of latitude were studied (Miron, Mirabelli and Rodayer) in order to construct two types of chronologies: recent history of seasonal ice floods and that of shore hydro-dynamic disturbances occurring during the ice-free period. Based on detailed shoreline mapping and geomorphic segmentation according to exposure, chronologies of the two sets of events revealed an increase in the frequency of disturbances during the second half of the 20th century. The chronology of ice abrasion correlates with hydrologic variables for the 1960-2010 period. The results are consistent with the rising trend of spring and summer water levels outlined by several studies in Northern Quebec and also show synchronous variations among the studied lakes. Our dataset helps improve models of regional water supplies and assessments of their anticipated effects on the various terrestrial and aquatic ecosystems. It represents a timely contribution to the understanding of climate change impacts on water resources for the management of hydroelectric power generation.

Keywords: Dendrochronology; hydro-climatic analysis; ice abrasion scars; hydro-dynamic erosion; water regime; climate.

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre 1 : INTRODUCTION.....	1
1.1 Les apports en eau dans un contexte de changement climatique dans la région d'étude.....	1
1.2 La dendrochronologie comme moyen de reconstitution des conditions hydroclimatiques passées.....	3
1.3 Étude dendrochronologique des variations séculaires du niveau d'eau des lacs	4
1.3.1 Croissance des arbres riverains.....	5
1.4 Processus hydrodynamiques annuels en milieu lacustre	6
1.5 Réactions des arbres aux variations du niveau d'eau.....	7
1.5.1 Les cicatrices glacielles.....	7
1.5.2 Inclinaison des tiges.....	8
1.6 Géomorphologie riveraine et processus géomorphologiques	9
1.7 Approche théorique.....	10
Chapitre 2 : OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES	11
2.1 Objectif principal	11
2.2 Objectifs spécifiques.....	11
2.3 Hypothèses.....	12
Chapitre 3 : RÉGION D'ÉTUDE.....	13
3.1 Géomorphologie, relief et hydrologie.....	13
3.2 Climat.....	14
3.3 Végétation	15
Chapitre 4 : MÉTHODES.....	19
4.1. Sites d'étude.....	19
4.2. Échantillonnage.....	22
4.2.1. Cicatrices glacielles	22
4.2.2. Bois de réaction.....	24
4.3. Traitement des échantillons	24
4.3.1. Cicatrices glacielles	24
4.3.2. Bois de réaction.....	25

4.3.3. Analyses statistiques des chronologies	26
4.4. Analyse des données climatiques et hydrologiques.....	27
4.4.1. Analyse des données hydrologiques	28
4.4.2. Analyse des données climatiques.....	29
4.5. Cartographie et segmentation des rives	31
4.6. Analyse spatiale et cartographie	34
4.6.1. Calcul du fetch total	34
4.6.2. Production de cartes.....	34
4.7. Profils topographiques et inventaires écologiques par type de rivage.....	35
4.7.1 Profils topographiques	35
4.7.2 Inventaires écologiques.....	35
Chapitre 5 : RÉSULTATS.....	37
5.1. Chronologie de l'abrasion glacielle sur les arbres riverains	37
5.1.1. Délai de réponse des franges forestières riveraines aux crues glacielles.....	39
5.1.2 Intervalle de confiance bilatérale d'une proportion	40
5.2. Chronologie des débuts de séquence de bois de réaction	41
5.2.1 Délai entre l'établissement des arbres et la chronologie des événements hydrodynamiques menant à leur déstabilisation	43
5.3. Comparaison des chronologies de cicatrices glacielles et de bois de réaction	44
5.4. Conditions hydroclimatiques	45
5.4.1 Hydrogrammes de crue	45
5.4.2 Analyse en composantes principales des variables hydrologiques.....	47
5.4.3 Corrélation des chronologies d'abrasion glacielle des trois lacs avec les variables PC découlant de l'ACP des variables hydrologiques	50
5.4.4 Corrélation des chronologies d'abrasion glacielle avec les variables hydrologiques.....	51
5.4.5. Corrélation des chronologies glacielles aux variables climatiques.....	54
5.4.6. Corrélation entre les chronologies d'abrasion glacielle et les valeurs de degrés-jours de gel (DJG) pour les trois lacs.	60
5.5. Fréquence de perturbation des écosystèmes riverains	61
5.5.1 Influence des attributs physiques et géomorphologiques des rivages sur l'activité glacielle.....	61

5.5.2 Segments de rivages touchées par l'activité glacielle.....	64
Chapitre 6 : DISCUSSION	65
6.1 Chronologie de l'activité glacielle riveraine.....	65
6.2 Chronologie de début de séquence de bois de réaction causé par l'érosion hydro-dynamique en saison interglacielle	66
6.3 Concordance des chronologies d'activité riveraine	67
6.4 Relation entre les conditions hydro-climatiques et les chronologies d'abrasion glacielles	68
6.5 Risque de perturbation des écosystèmes riverains.....	70
Chapitre 7 : CONCLUSION.....	73
Chapitre 8 : RÉFÉRENCES.....	77
Chapitre 9 : ANNEXES.....	87
9.1 Chronologies glacielles des trois lacs à l'étude pour la période 1920-2011	87
9.2 Chronologies de début de séquence de bois de réaction pour la période 1940-2011	88
9.2 Statistiques de la segmentation des rives	89
9.2.1 Lac Rodayer	89
9.2.2 Lac Mirabelli.....	90
9.2.3 Lac Miron.....	91
9.3 Dessins à l'échelle et composition floristique par type de rivage.....	92
9.3.1 Affleurements rocheux.....	92
9.3.2 Cordons de blocs.....	94
9.3.3 Plages	96
9.3.4 Platière	98
9.3.5 Talus organique en érosion	99
9.4 Cartes thématiques des caractéristiques géomorphologiques et physiques des rives	100
9.4.1 Rivages du lac Rodayer	100
9.4.2 Rivages du lac Mirabelli	104
9.4.3. Rivages du lac Miron	111

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4-1 : Caractéristiques des bassins-versants et des lacs à l'étude	20
Tableau 4-2: Caractéristiques des échantillons de cicatrices glacielles	25
Tableau 4-3 : Caractéristiques des échantillons de début de séquence de bois de réaction	26
Tableau 4-4: Périodes utilisées pour les corrélations de Spearman entre les chronologies	26
Tableau 4-5: Corrélation des données hydro-climatiques avec les chronologies glacielles	27
Tableau 4-6: Variables hydrologiques utilisées pour l'analyse des apports harmonisés des bassins-versants LG2-lac Sakami et Eastmain-1	28
Tableau 4-7: Variables climatiques utilisées	30
Tableau 4-8 : Périodes d'analyse utilisées pour les cinq variables climatiques	30
Tableau 4-9: Critères de segmentation des rives sur le terrain	33
Tableau 5-1: Coefficients de corrélation (Spearman) des chronologies glacielles entre les lacs pour différentes périodes	38
Tableau 5-2: Coefficients de corrélation de Spearman entre les chronologies de début de séquence de bois de réaction entre les trois lacs	42
Tableau 5-3: Corrélation de Spearman entre les chronologies glacielles et de bois de réaction pour chaque lac pour différentes périodes	44
Tableau 5-4: Répartition des années des chronologies glacielles pour la réalisation des hydrogrammes de crue pour les trois lacs	45
Table 5-5: Coefficients de corrélation de Spearman entre le nombre de cicatrices et la hauteur moyenne des cicatrices avec les variables PC1 et PC2 transformées des variables hydrologiques provenant des apports harmonisés des bassins versants LaGrande-2 et lac Sakami et Eastmain-1 pour les lacs Miron, Mirabelli et Rodayer	50

Tableau 5-6: Coefficients de corrélation de Spearman entre le nombre de cicatrices et la hauteur moyenne des cicatrices avec les variables hydrologiques des apports harmonisés des bassins-versants LaGrande 2 et lac Sakami et Eastmain-1 pour le lac Rodayer	51
Tableau 5-7: Coefficients de corrélation de Spearman entre le nombre de cicatrices et la hauteur moyenne des cicatrices avec les variables hydrologiques des apports harmonisés des bassins versants LaGrande 2 et lac Sakami et Eastmain-1 pour le lac Mirabelli	52
Tableau 5-8: Coefficients de corrélation de Spearman entre le nombre de cicatrices et la hauteur moyenne des cicatrices avec les variables hydrologiques provenant des apports harmonisés des bassins versants LaGrande-2 et lac Sakami et Eastmain-1 pour le lac Miron.....	53
Tableau 5-9: Coefficients de corrélation de Spearman entre le nombre de cicatrices glacielles et la hauteur moyenne des cicatrices glacielles avec les variables climatiques pour le lac Rodayer	55
Tableau 5-10: Coefficients de corrélation de Spearman entre le nombre de cicatrices glacielles et la hauteur moyenne des cicatrices glacielles avec les variables climatiques pour le lac Mirabelli.....	57
Tableau 5-11: Coefficients de corrélation de Spearman entre le nombre de cicatrices glacielles et la hauteur moyenne des cicatrices glacielles avec les variables climatiques pour le lac Miron.....	59
Tableau 5-12: Coefficients de corrélation de Spearman entre les chronologies d'abrasion glacielle des trois lacs à l'étude et la variable climatique degré jour de gel (DJG) pour trois différentes périodes de l'année	60

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1: Variation en pourcentage des précipitations annuelles moyennes pour la période 1976-2005	1
Figure 3-1 : Données météorologiques des archives climatiques d'Environnement Canada de la station de l'aéroport de La Grande (LGA) entre 1981 et 2010	15
Figure 3-2 : Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec subarctique	16
Figure 4-1 : Localisation des sous-bassins-versants et des lacs. 1 : sous-bassin-versant du cours inférieur de la Sakami, 2 : sous-bassin-versant Jolicoeur/Pontax et 3 : sous-bassin-versant du cours inférieur de la Broadback.....	21
Figure 4-2 : Localisation des arbres échantillonnés (points).	23
Figure 4-3: Rives cartographiées en gris et non-cartographiées en noir.....	32
Figure 4-4: Types de rivages échantillonnés	33
Figure 5-1: Chronologies glacielles des trois lacs à l'étude de 1760 à 2012.....	38
Figure 5-2: Comparaison des pourcentages cumulatifs d'arbres établis et de la fréquence des cicatrices glacielles pour les lacs Miron, Mirabelli et Rodayer.....	39
Figure 5-3: Chronologies de cicatrices glacielles à partir de la première cicatrice de chaque lac.....	40
Figure 5-4: Chronologies complètes des débuts de séquences de bois de réaction pour les trois lacs à l'étude.	42
Figure 5-5: Comparaison des pourcentages cumulatifs d'arbres établis et de la fréquence des débuts de séquence de bois de réaction aux lacs Miron, Mirabelli et Rodayer.....	43
Figure 5-6: Hydrogrammes moyens des apports harmonisés du bassin-versant LG2 et lac Sakami pour la période 1950-2010.	46
Figure 5-7: Cercle de corrélation de l'analyse en composantes principales des variables hydrologiques provenant des apports harmonisés du bassin versant LaGrande-2 et lac Sakami.....	48
Figure 5-8: Cercle de corrélation de l'analyse en composantes principales des variables hydrologiques provenant des apports harmonisés du bassin Eastmain-1	49
Figure 5-9: Nombre et pourcentage de segments de rivage touchés par l'activité glacielle	64

Figure 9-1: Chronologies glacielles des trois lacs à l'étude de 1920 à 2011.....	87
Figure 9-2: Chronologies des débuts de séquence de bois de réaction pour la période 1940-2011	88
Figure 9-3: Statistiques des rives du lac Rodaye	89
Figure 9-4: Statistiques des rives du lac Mirabelli.....	90
Figure 9-5: Statistiques des rives du lac Miron	91
Figure 9-6: Dessin à l'échelle d'un affleurement rocheux du lac Miron (A).....	92
Figure 9-7: Composition floristique d'un affleurement rocheux du lac Miron (A)	93
Figure 9-8: Dessin à l'échelle d'un affleurement rocheux du lac Miron (B).....	93
Figure 9-9: Dessin à l'échelle d'un cordon de blocs du lac Miron (A).....	94
Figure 9-10: Composition floristique d'un cordon de blocs du lac Miron (A)	94
Figure 9-11: Dessin à l'échelle d'un cordon de bloc du lac Miron (B)	95
Figure 9-12: Dessin à l'échelle d'une plage du lac Miron (A)	96
Figure 9-13: Composition floristique d'une plage du lac Miron (A)	96
Figure 9-14: Dessin à l'échelle d'une plage du lac Miron (B).....	97
Figure 9-15: Dessin à l'échelle d'une platière du lac Miron.....	98
Figure 9-16: Composition floristique d'une platière du lac Miron	98
Figure 9-17: Dessin à l'échelle d'un talus en érosion du lac Miron	99
Figure 9-18 : Longueur du fetch total (m) par segment de rive au lac Rodayer.....	100
Figure 9-19 :Orientation de l'exposition des rives au lac Rodayer	101
Figure 9-20 : Type de substrats riverains au lac Rodayer.....	101
Figure 9-21 : Pente infra-riveraine au lac Rodayer.....	102
Figure 9-22 : Pente supra-riveraine au lac Rodayer.....	102
Figure 9-23 : Densité de la végétation arbustive protégeant les zones arborées riveraines au lac Rodayer.....	103
Figure 9-24: Longueur du fetch total par segment de rive du lac Mirabelli	104

Figure 9-25: Orientation de l'exposition des rives au lac Mirabelli	105
Figure 9-26: Type de substrat au lac Mirabelli	106
Figure 9-27: Pente infra-riveraine au lac Mirabelli	107
Figure 9-28: Pente supra-riveraine au lac Mirabelli	108
Figure 9-29: Densité de la végétation arbustive protégeant les zones arborées riveraines au lac Mirabelli	109
Figure 9-30: Pourcentage de forêt brûlée des zones riveraines au lac Mirabelli	110
Figure 9-31: Longueur de fetch total par segment de rive au lac Miron	111
Figure 9-32: Orientation de l'exposition des rives au lac Miron	112
Figure 9-33: Type de substrats riverains au lac Miron	113
Figure 9-34: Pente infra-riveraine au lac Miron	114
Figure 9-35: Pente supra-riveraine au lac Miron	115

Chapitre 1 : INTRODUCTION

1.1 Les apports en eau dans un contexte de changement climatique dans la région d'étude

Selon le dernier rapport du GIEC (2018), les conditions climatiques actuelles sont exceptionnelles dans l'histoire de la planète Terre et c'est dans les régions nordiques que sont anticipés les plus importants effets des changements climatiques. Les régions froides de l'Amérique du Nord ont connu une augmentation marquée des températures dans les dernières décennies, une tendance qui se prolongera vraisemblablement dans le futur. Par ailleurs, selon les données krigées du Climatic Research Unit (CRU 2021a) de l'Université East Anglia, à l'échelle des dernières décennies, la région centrale du Québec est une des trois régions dans le monde où la diminution des précipitations a été la plus marquée pour la période comprise entre 1976 et 2005, alors qu'une baisse de 12 à 15% a été observée en comparaison aux deux décennies précédentes (Figure 1.1).

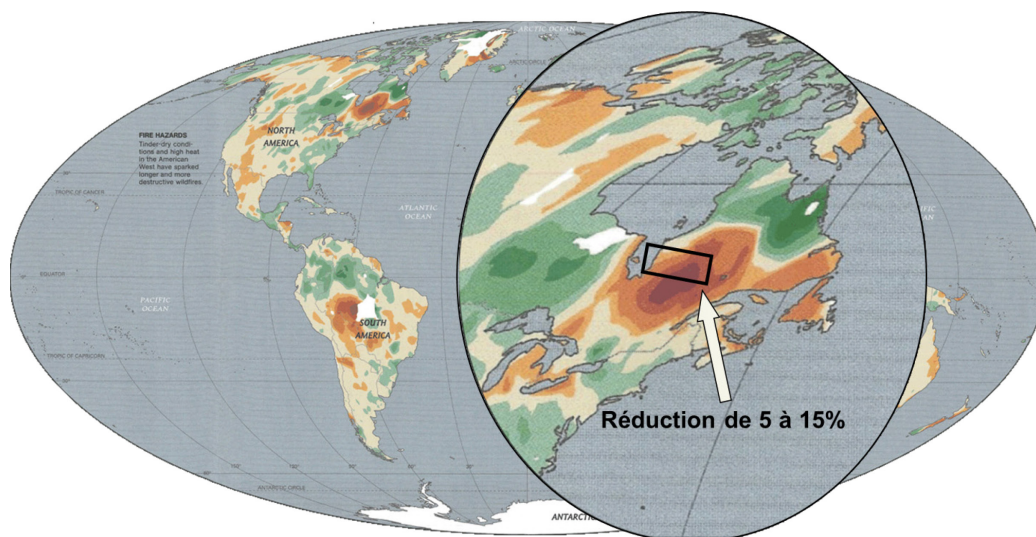


Figure 1-1: Variation en pourcentage des précipitations annuelles moyennes pour la période 1976-2005 (adapté de la carte du National Geographic Magazine, 2007, d'après les données du Climatic Research Unit)

Ces changements de régime hydroclimatiques sont particulièrement préoccupants au Québec nordique où l'activité économique est étroitement dépendante du climat en raison de la production hydro-électrique et de l'exploitation des ressources. En effet, le secteur de l'énergie et plus particulièrement l'hydroélectricité occupe une part importante de l'économie. De plus, la majeure partie de la puissance hydroélectrique installée se trouve dans la région du Québec nordique, notamment les complexes La Grande et Eastmain (Bourque et Simonet 2008, MERN, 2021). Une telle baisse apparente des apports en eau représente-t-elle une nouvelle tendance pour l'avenir? Le cas échéant, on aurait surestimé les ressources en eau et les ouvrages du Nord seraient surdimensionnés par rapport à la quantité d'eau qu'ils peuvent/ pourront contenir. Mais s'il ne s'agit que d'un écart négatif dans les fluctuations naturelles, il est critique, pour des raisons économiques, d'estimer l'amplitude de telles variations pour obtenir une prévision adéquate de l'offre d'hydroélectricité. De plus, si ce n'était qu'une variation naturelle, dans combien de temps les apports reviendront-ils à la normale?

Ces questions renforcent le besoin d'informations historiques pour l'obtention d'un système prévisionnel optimal des ressources en eau. Or, les registres instrumentaux servant à évaluer les apports en eau pour la production hydro-électrique au Québec sont de relative courte durée (moins de 50 ans) et discontinus dans le temps et les stations d'enregistrement sont peu nombreuses et distribuées de façon sporadique. Selon Hydro-Québec, l'écart-type des variations interannuelles de la production hydroélectrique vaut environ 1,3G\$, lorsque les volumes d'eau sont traduits successivement en térawatts/heures et puis en dollars actualisés (Hydro-Québec 2006). Comme ces grandes variations sont cohérentes dans le temps et l'espace, elles répondent certainement à des conditions « naturelles » (c'est-à-dire non produites par la gestion des barrages elle-même) qu'il faut chercher à comprendre. S'agit-il de variations négatives ou positives autour d'une tendance séculaire ou d'un véritable changement de régime? Pour cerner cette question, on doit allonger la période instrumentale au moyen de données indirectes en utilisant des archives naturelles. L'utilisation d'indicateurs paléoclimatiques (proxies) semble alors un bon choix pour compléter les registres instrumentaux, à savoir ici les arbres et leurs cernes de croissance.

1.2 La dendrochronologie comme moyen de reconstitution des conditions hydroclimatiques passées

Les cernes de croissance des arbres sont des archives climatiques reconnues (Fritts et al. 1971, Fritts 1976, Schweingruber 1996, Ballesteros-Cánovas et al. 2015). Leur anatomie et leur architecture sont conditionnées par différents facteurs ambiants, notamment climatiques, mais aussi écologiques, environnementaux et édaphiques. La rythmicité de leur croissance dans les zones tempérées et froides crée des anneaux de bois qui s'accumulent et qui offrent un registre du passé avec une résolution annuelle, marquée par un arrêt total pendant la période hivernale (Fritts et al. 1971, Payette et Fillion 2010). Ils présentent donc un bon contrôle temporel en raison de leur rythmicité annuelle et même intra-annuelle. À cet effet, la dendrochronologie utilise les cernes annuels datés comme proxy des conditions environnementales entourant la croissance des arbres. De plus, la dendrochronologie présente un énorme potentiel d'interprétation spatiale en raison de l'abondance des arbres sur le territoire et la diversité des sites qu'ils occupent (Payette et Fillion 2010, Villeneuve et Richard 2007).

Lors de conditions climatiques extrêmes, les arbres réagissent par leur croissance. Le cumul d'événements météorologiques crée une ambiance définissant les conditions dans lesquelles les arbres auront produit leur cerne annuel de bois. La réaction de l'arbre peut alors être quantitative (cernes de largeur variable selon les années, variation de proportion de bois initial et de bois final) et qualitative (répartition et taille inégales des cellules de bois formées). On peut alors utiliser les indications que nous fournissent les cernes pour tenter de reconstituer les facteurs qui ont caractérisé les ambiances propices à leur mise en place (Fritts, 1976).

La reconstitution des paramètres hydrologiques à partir des cernes de croissance dans les milieux nordiques est parfois compliquée par le fait que les cernes répondent davantage aux températures qu'aux précipitations. À cet effet, on doit souvent se tourner vers les marqueurs directs des fluctuations des plans d'eau (Boucher, Bégin et Arseneault. 2010, Boucher et al., 2011). Ainsi, les arbres peuvent enregistrer des événements discrets liés aux conditions hydroclimatiques, suivant la notion de « processus-événement-réponse » (Shroder, 1980). Dès lors, les arbres occupant des positions les exposants à des perturbations, comme les arbres

riverains subissant épisodiquement les crues glacielles ou l'érosion par les vagues, réagissent spontanément. Cela permet d'enregistrer de façon discontinue, avec une datation et une localisation précise, les événements d'érosion qui peuvent avoir une origine climatique et hydrologique (Bégin 2000a, Bégin 2000b; Bégin 2001, Boucher 2008, Ballesteros-Cánovas 2011, Ballesteros-Cánovas 2015, Ballesteros-Cánovas et al. 2020, St.George 2010, St.George et al. 2020).

De plus, bien que la croissance annuelle des arbres puisse être affectée par leur biotope (fertilité du sol, proximité de compétiteurs, drainage...), la réaction commune à un ensemble d'arbres dans une vaste région ne peut être autre que climatique (Fritts 1976) à moins d'une perturbation majeure ponctuelle telle qu'une épidémie. C'est ainsi qu'il est possible de reconstituer le climat à l'échelle régionale. Les arbres ont donc une capacité d'enregistrement des conditions climatiques à long terme et de grande portée géographique.

1.3 Étude dendrochronologique des variations séculaires du niveau d'eau des lacs

L'étude des fluctuations du niveau des lacs est intéressante dans le cadre des reconstitutions et de la modélisation paléoclimatique, alors que les fluctuations sont étroitement corrélées aux variations du climat (Berglund, 1983; Digerfeldt, 1986; Bégin et Payette, 1988; Payette et Delwaide, 1991). Les variations du niveau d'eau sont directement reliées au régime des précipitations, et donc aux grands courants atmosphériques (Barry et Hare, 1974).

La dendrochronologie permet la reconstitution des variations du passé, notamment la température et les précipitations, alors que les arbres offrent un enregistrement continu des conditions particulières à un lieu donné, réagissant aux facteurs ambiants. Également, ceux occupant des positions les exposant à des perturbations, comme les arbres riverains subissant épisodiquement les crues glacielles ou l'érosion par les vagues, permettent d'enregistrer de façon discontinue les événements d'érosion qui peuvent avoir une origine climatique et hydrologique (Bégin 2000a, Bégin 2001, Boucher 2008, Ballesteros-Cánovas 2015).

Par ailleurs, de nombreux auteurs considèrent les fluctuations du niveau d'eau et les conditions associées, comme des facteurs physiques importants dans la répartition, la structure et la composition des communautés végétales riveraines (Bégin et Lavoie 1988).

Plusieurs chercheurs ont travaillé à reconstituer le climat (températures et précipitations) à l'aide de la dendrochronologie (Arseneault et Payette 1997a, 1997b, Mann 2002, Guiot *et al.* 2005; Moberg et al. 2005, NRC 2006, Guiot et Nicault 2010). Par ailleurs, la dendrochronologie est souvent utilisée pour reconstituer l'historique des événements extrêmes en milieu lacustre (Schweingruber 1996; Bégin et Payette 1988; Tardif et Bergeron 1992, 1993 et 1997; Bégin 1999, Bégin 2000a, Bégin 2000b; Lemay et Bégin 2008, Boucher 2011). Dans les régions boréales et subarctiques du Québec, la dendrochronologie a permis de constater que la fréquence des crues glacielles a augmenté durant la deuxième partie du XXe siècle, principalement en raison d'une augmentation des précipitations hivernales (Bégin et Payette 1988; Tardif et Bergeron 1997; Bégin 2000b; Lemay et Bégin 2008).

1.3.1 Croissance des arbres riverains

Les arbres riverains s'établissent généralement sur des sites stables sur le plan hydrogéomorphologique, et évoluent localement à l'intérieur de leurs limites de tolérance. Mais si le régime hydrologique du plan d'eau ou du cours d'eau les expose soudainement ou progressivement à l'immersion ou l'érosion, ils porteront les traces de ces aléas par un changement de leur rythme de croissance ou par un changement morphologique. Ces arbres peuvent ainsi servir de marqueurs pour établir une reconstitution des variations hydrologiques. La position des arbres sur les rives (distance par rapport à l'eau, position par rapport aux talus d'érosion, arbres ennoyés en position de vie, etc.), donne des informations sur les grandes tendances des niveaux d'eau passés (Payette 1980, Schweingruber 1996, Boucher, Bégin et Arseneault 2010).

Les arbres réagissent de diverses façons aux épisodes de haut niveau et il est possible de dater les événements causés par des crues. Selon les recherches antérieures, plusieurs marqueurs dendrohydrologiques et dendrogéomorphologiques ont rendu possibles les reconstitutions paléoclimatiques. Les marqueurs utilisés le plus souvent sont les suivants : les cicatrices

d'abrasion glacielle (Bégin et Payette 1988, Tardif et Bergeron 1997, Bégin 1999, Bégin 2000a, Lemay et Bégin 2008, Boucher et al. 2011) et le bois de réaction formé par suite de l'inclinaison des tiges (arbres penchés ou déchaussés) (Scurfield 1973, Alestalo 1971, Lepage et Bégin 1996, Bellasteros-Cánovas et al. 20).

1.4 Processus hydrodynamiques annuels en milieu lacustre

Le niveau des lacs boréaux fluctue selon les conditions pluvionivales au rythme des saisons. De plus, ces lacs sont couverts de glace tous les ans. Selon les caractéristiques morphologiques du lac et les processus hydroclimatiques régissant le déglacement, la transition entre le régime glacielle et le régime d'eau libre peut prendre entre quelques heures et plusieurs semaines (Beltaos 1997, Bégin 2001) sous l'effet à la fois de conditions hydrologiques, thermiques et éoliennes.

Durant la période hivernale, le niveau des lacs est au plus bas, en raison des précipitations neigeuses qui s'accumulent partout dans le bassin versant. Une épaisse couche de glace inactive se forme. Il s'agit du « pléniglacielle » (Bégin et Allard 1982). La glace joue alors un rôle protecteur pour les milieux riverains. L'activité géomorphologique riveraine ne peut avoir lieu que si la glace se fracture et que l'eau gèle à nouveau, forçant ainsi l'expansion du couvert de glace sur des rives (Alestalo 1971). À la fonte de la neige au printemps, la crue soulève le couvert de glace et une bande d'eau libre à sa marge lui permet d'être mobile sous la poussée du vent. Le déplacement de glaces sur la rive constitue une « crue glacielle ». L'abrasion des arbres par la glace en mouvement et la formation de cicatrices glacielles y sont associées. La période printanière correspond au temps où l'activité géomorphologique est la plus importante. Si le niveau du lac reste élevé après la disparition du couvert de glace, les vagues peuvent déstabiliser des arbres par érosion et leur substrat. C'est durant cette période que des arbres peuvent basculer et produire du bois de réaction (Scurfield 1973) et des changements dans la croissance dus à l'immersion. À la fin de la période de croissance, c'est un retour progressif aux conditions hivernales, et puis le cycle recommence (Bégin 2001).

Sur les lacs du boréaux et subarctiques, le couvert de glace demeure longtemps après la fonte de la neige. Portée par la crue des eaux de fonte, cette glace est apte à produire un travail

mécanique lorsqu'elle est poussée sur la rive par le vent. Le rôle de la glace est passif et ce sont les vents qui la rendent active. Il s'agit alors de la période d'«activité glacielle» ou de «glace active». Le risque d'érosion des rives en raison de la présence des glaces flottantes, des hauts niveaux d'eau et du vent qui pousse les glaces sur les rives, est plus grand (Dionne 1976, 1978, 1979, Bégin 2000, Boucher 2008, Boucher, Bégin et Arseneault 2010, Lemay et Bégin 2008). Durant les tempêtes et les épisodes particulièrement venteux, l'action soutenue des vagues entraîne l'érosion des rives exposées et les radeaux de glace engendrent de l'abrasion (La Moe et Winters 1989). De plus, dans la région subarctique, les conditions hydroclimatiques printanières ont une importance particulière, alors que l'épaisseur des glaces est grande et que les redoux hivernaux sont rares, l'ensemble du déglacement survient donc au printemps (Beltaos et Burrell 2003). Par ailleurs, sous l'action des glaces et des vagues, les crues printanières sculptent les rives de diverses façons (Dionne 1976, 1978, 1979).

1.5 Réactions des arbres aux variations du niveau d'eau

Les réactions potentielles des arbres riverains aux variations du niveau d'eau et aux perturbations y étant associées sont nombreuses, suivant la séquence « processus-événements-réponse » (Schroder 1980). Il est alors possible de trouver sur un seul arbre, plusieurs indicateurs ou réponses associés aux phénomènes d'abrasion ou d'inclinaison de la tige, par exemple. Selon la littérature scientifique, ce sont la réplication et le cumul des événements qui permettent de valider les événements tels que les crues (Bégin 2000a).

1.5.1 Les cicatrices glacielles

La glace flottante est un agent géomorphologique actif en zone subarctique, lorsque jumelée à l'effet du vent. Les radeaux de glaces entraînent l'érosion des rives, la création de cordons glaciels, mais aussi l'apparition de cicatrices d'abrasion sur les arbres (Bégin et Payette 1988, Tardif et Bergeron 1997, Bégin 2000b, Lemay et Bégin 2008).

Lors d'un épisode de crue glacielle, l'abrasion de la glace endommage le cambium des arbres et la division cellulaire est interrompue à cet endroit, mais continue le long de la tige. Par la suite, la périphérie de la zone où l'abrasion a eu lieu se couvre de bois et il se forme alors un

tissu (tissu «calleux») qui permet à l'arbre de poursuivre sa croissance. Dans les années suivantes, selon leur taille, les cicatrices peuvent se refermer totalement, au moyen de la formation de bourrelets marginaux de part et d'autre (le «calle»), ou encore partiellement (Tardif et Bergeron 1997, Boucher 2008). Par contre, les cicatrices complètement fermées sont rares dans la zone d'étude, puisque la croissance est lente (Bégin 2000b).

La technique la plus courante pour utiliser les cicatrices glacielles est leur datation par le dénombrement des cernes dans le calle. La méthode de datation des crues à l'aide des cicatrices «est fondée sur le fait que le nombre, la forme et la hauteur relative des cicatrices datant d'une année donnée sont des indicateurs de l'intensité des événements discrets ayant perturbé le milieu» (Boucher 2008). De plus, il est exceptionnel que des cernes manquent, à tout le moins pour l'épinette.

1.5.2 Inclinaison des tiges

Lors des hauts niveaux d'eau et des tempêtes, l'érosion du matériel organique et du sable peut provoquer le basculement des tiges riveraines. À ce moment, comme les arbres tendent à pousser de façon verticale («géotropisme négatif»), ils produisent du bois de réaction pour regagner leur équilibre géotropique et la croissance devient alors excentrique (Scurfield 1973, Timell 1983). L'excentricité maximum se retrouve dans la portion courbée de la tige.

Chez le conifère, le cambium augmente son activité sur la face externe de la courbure. Il s'agit donc d'une contraction longitudinale en maturation et la paroi secondaire est fortement lignifiée (Timell 1983, Timell 1986). Normalement, le début d'une séquence de bois de réaction correspond au moment de l'inclinaison d'une tige. Au Québec, dans la région subarctique, les événements d'inclinaison des tiges surviennent principalement un peu avant et pendant le début de la saison de croissance (Bégin 2000b).

1.6 Géomorphologie riveraine et processus géomorphologiques

Les rives des plans d'eau subarctiques sont très diversifiées. Les principaux types sont les suivants : les plages, les affleurements rocheux, les platières végétales, les amoncellements de blocs glaciels et les cordons rocheux. Dans les milieux les plus exposés, la puissance des agents hydrodynamiques est telle qu'ils peuvent déplacer des blocs rocheux de grande dimension. Il peut y avoir alors une concentration des éléments les plus grossiers et conséquemment peu mobiles sur le haut de la rive. Cet étagement des cailloux selon leur taille s'appelle un «bechevnic», un terme russe consacré par Louis Edmond Hamelin (1969). Les différents types de rives sont caractérisés par leur géomorphologie, leur sédimentologie et leur composition écologique, soit par leur substrat, la pente infra-riveraine et supra-riveraine, leur exposition, le contact entre la végétation riveraine et supra-riveraine et la végétation en place. Ces caractéristiques sont principalement dépendantes du régime hydrologique, alors que celui-ci est conditionné par le type et la taille du plan d'eau, le régime des précipitations, les vents dominants, les vagues et les glaces (Bégin, 1986; Bégin et Payette, 1989; Dionne, 1979).

Le nombre d'indicateurs ponctuels (cicatrices et bois de réaction) peut être corrélé à l'exposition d'une rive. L'exposition des rives dépend de 1) la quantité et l'étendue des obstacles qui pourraient agir à titre de récif protecteur (le «brisant»), 2) la pente littorale et son extension sous-marine et 3) l'orientation du littoral (Bégin 2000b). L'exposition des rives est, par ailleurs, dépendante de la taille et de la longueur du lac et donc, du fetch, de l'abondance et de la répartition des îles (Denneler et al. 2000, Bégin 2000b).

C'est aux endroits où l'amplitude des variations est faible et la fréquence élevée que les perturbations sont optimales. Les sites qui sont trop exposés sont perturbés d'une telle façon que la survie des tiges y est difficile. À l'opposé, les sites peu exposés aux perturbations sont peuplés par des peuplements très denses de tiges. Il n'y a que les perturbations exceptionnelles qui peuvent arriver à être enregistrées sur ce type de rive. Selon cette distribution, les sites exposés au vent, aux vagues et aux glaces doivent enregistrer l'ensemble des événements qui surviennent dans les sites protégés. De plus, comme il est possible de voir avec l'étude de Bégin et Payette 1991, les rives d'un même type devraient porter les traces des mêmes événements. À cet effet,

lorsque leur orientation est la même, les marques sur les arbres devraient se trouver à une hauteur similaire.

1.7 Approche théorique

Dans une étude portant sur les variations séculaires des niveaux de lacs, les différents concepts mis de l'avant sont tirés de principes généralement appliqués en géomorphologie et en écologie. En premier lieu, les relations entre les causes et les effets au cours des processus étudiés sur les rivages lacustres sont stationnaires dans le temps. En d'autres mots, les facteurs qui agissent dans ces systèmes sont sensiblement les mêmes dans le temps. En second lieu, les événements de hauts niveaux sont généralement destructeurs (crues) et peuvent avoir influencé l'historique des événements que l'on arrivera à reconstituer. À cet effet, la destruction de témoins fait en sorte que l'absence d'événement répertorié n'est pas nécessairement la preuve que les événements n'ont pas eu lieu. (Payette 1980; Bégin 2000; Boucher 2008; Boucher, Bégin et Arseneault 2010).

Chapitre 2 : OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES

2.1 Objectif principal

L'objectif principal de cette recherche est de reconstituer, à l'aide d'indicateurs dendrochronologiques, l'historique des fluctuations de l'hydraulicité depuis environ les 200 dernières années dans la région de la Jamésie, au Québec, en établissant des chronologies des événements de crues glacielles printannières et de hautes eaux en période inter-glacielle.

2.2 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques sont :

1. Établir une chronologie des crues glacielles reconstituées au cours des deux derniers siècles et la calibrer aux données hydroclimatiques en utilisant les registres d'apports harmonisés produits par Hydro-Québec pour la région et établir une chronologie des hautes eaux causant de l'érosion riveraine en période sans glace (début de séquence de bois de réaction).
2. Analyser la cohérence spatiale latitudinale des enregistrements d'événements d'érosion glaciels et hydro-dynamique selon la latitude en Jamésie en comparant les résultats issus des trois lacs à l'étude.
3. Chercher à relier des faciès de rivages (géomorphologie et écologie) à des états dynamiques riverains.

2.3 Hypothèses

1. L'amplitude des fluctuations de l'hydraulicité depuis 1963 est de l'ordre des fluctuations historiques régionales, mais s'inscrit dans une tendance générale à la hausse à l'échelle des deux derniers siècles.
2. Il devrait y avoir une cohérence spatiale latitudinale entre les chronologies d'érosion riveraine dans l'ensemble de la région, à la fois pour les événements se produisant en saison glacielle et en période interglacielle.
3. Les types géomorphologiques de rivage devraient révéler leur état dynamique en réponse aux événements glaciels et hydro-dynamiques. Ces types seraient fonction de l'exposition des rives aux perturbations dont la fréquence et l'intensité seraient tributaires des conditions hydroclimatiques régionales.

Chapitre 3 : RÉGION D'ÉTUDE

3.1 Géomorphologie, relief et hydrologie

Le territoire d'analyse est situé dans la région de la Baie de James, dans le Moyen Nord du Québec. Cette région fait partie de l'ensemble physiographique du Bouclier canadien et se situe à l'intérieur de la province géologique du Supérieur (de 4,3 à 2,5 milliard d'années) composée de collines de faible altitude (Hardy 1976, Hardy 1977). La Jamésie est un territoire d'environ 350 000 km² qui s'étend d'ouest en est de la côte de la Baie de James jusqu'au 68^e méridien ouest et du sud au nord entre le 49^e et le 55^e parallèles. Le territoire regroupe les bassins versants de plusieurs rivières à grand débit : la Grande Rivière, la Sakami, l'Opinaca, l'Eastmain, la Pontax, la Rupert, la Broadback, la Nottaway et l'Harricana. L'ensemble du territoire est parsemé d'un nombre élevé de lacs, de cours d'eau et de milieux humides se drainant dans ces grandes rivières, utilisées pour la production d'hydro-électricité (SEBJ 1987, Dionne 1978).

Le territoire est divisé en deux grandes unités : les basses-terres de la Baie de James et les hautes-terres. Les basses-terres correspondent au terrain situé approximativement entre 0 et 200 mètres d'altitude et qui a été recouvert par la mer postglaciaire de Tyrrell et le lac périglaciaire Ojibway. D'une largeur maximale d'environ 200 kilomètres à partir de la côte à l'ouest, le territoire des basses-terres couvre environ de 100 à 125 kilomètres de longitude. Au nord de la rivière Eastmain, on retrouve le relief assez homogène d'une plaine glacio-marine où il est possible de voir diverses formes d'accumulations fluvio-glaciaires comme les eskers et les plaines d'épandage et formes d'accumulations (moraines). Au sud de la rivière, il s'agit de grandes plaines argileuses au relief faible. L'altitude des hautes-terres augmente progressivement et culmine à l'est avec les monts Otish (environ 1200 mètres). Il s'agit d'une zone où le relief est assez modéré et le terrain parsemé de collines rocheuses (Dionne 1978, Hardy 1977). La zone

d'étude se situe près de la limite entre les deux grandes unités, alors que les lacs à l'étude dans le présent projet sont à une altitude d'environ 190 mètres.

Pendant le Quaternaire, la Jamésie était entièrement recouverte d'un inlandsis qui aurait eu une épaisseur de plus de 2000 mètres (Sugden 1977). Le retrait des glaciers et l'enfoncement isostatique ont permis l'invasion marine par la mer de Tyrrell et le lac Ojibway et ont façonné le paysage actuel entre 8000 et 7000 BP. Ainsi, l'action géomorphologique et climatique des grands glaciers a laissé d'importantes quantités de dépôts sur la majeure partie du territoire (sable, gravier). Les formes d'érosion causées par l'avancée glaciaire sont encore présentes aujourd'hui (moraines de Rogan, drumlins et vallées de surcreusement) de même que celles causées par le retrait de l'inlandsis (moraines de De Geer, moraines frontales, eskers, kettles et kames). L'invasion de la mer de Tyrrell a aussi laissé d'importants dépôts (sable, gravier, argile et limon) (Dionne 1978, Hardy 1977, Hardy 1976).

3.2 Climat

Selon la classification de Koeppen-Geiger, le climat de la Jamésie est de type continental froid. Il est caractérisé par des étés aux températures fraîches et des hivers très froids (Peel et al. 2007). À cet effet, selon les archives climatiques d'Environnement Canada (2014), les données de la station météorologique de La Grande (53°38'00''N; 77°42'00''W) pour le calcul des normales climatiques de 1981 à 2010 indiquent que la moyenne quotidienne de température pour le mois de janvier est de -23,2°C et celle de juillet est de 14,2°C. La température moyenne annuelle est de -2,9°C (Figure 3.1). Le nombre de degrés-jours au-dessus de 5°C est de 916,2 et est réparti principalement du mois de juin au mois de septembre. La date moyenne du dernier jour de gel est le 19 juin et celle du premier jour de gel le 20 septembre. Cela représente une période sans gel de seulement 92 jours et correspond assez bien à la période de croissance des arbres. En forêt boréale québécoise, la majorité du cerne d'un arbre se forme sur un intervalle d'environ 30 jours entre les mois de juin et juillet et la croissance cesse normalement au cours du mois de septembre (Deslauriers et al. 2003ab).

Les vents dominants sont d'ouest tout au long de l'année à l'exception des mois d'octobre à novembre. Les vents extrêmes sont du sud-est et sud-ouest, et majoritairement sud-ouest dans

les mois où il y a de l'activité glacielle en bordure des lacs. Les précipitations totales annuelles sont de 697,2 cm/an, alors que 453,8 centimètres tombent en moyenne en pluie. C'est pendant les mois d'août et de septembre que les précipitations sont les plus importantes en pluie et pendant les mois de novembre et décembre qu'elles sont les plus importantes en neige (Figure 3.1) (Environnement Canada 2014).

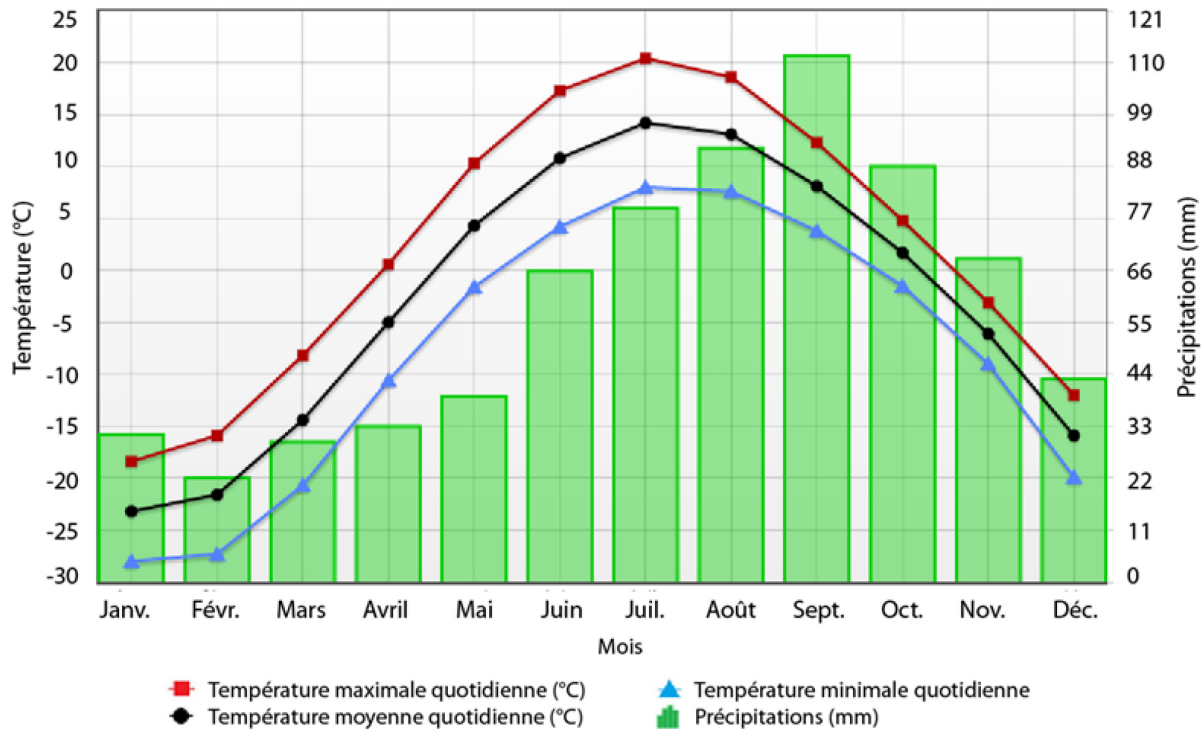


Figure 3-1 : Données météorologiques des archives climatiques d'Environnement Canada de la station de l'aéroport de La Grande (LGA) entre 1981 et 2010

3.3 Végétation

La Jamésie se situe au cœur de la forêt boréale. Le territoire est dominé par des peuplements de conifères, alors que seules les espèces les plus résistantes et celles capables de s'adapter aux conditions rigoureuses de l'environnement peuvent s'établir. Le territoire d'étude est à la limite entre deux sous-zones. Au nord, la taïga et au sud, la forêt boréale continue. La limite se situant approximativement au 52° parallèle, ce qui coïncide aussi avec la limite entre les domaines bioclimatiques de la pessière à lichens au nord et de la pessière à mousses, sous-domaine de l'ouest au sud (Figure 3.2) (MFFP, 2014). Les perturbations les plus importantes de

la région d'étude sont les feux de forêt (Payette 1992). Le secteur à l'étude se situe aussi au nord de la zone de forêt actuellement exploitée.

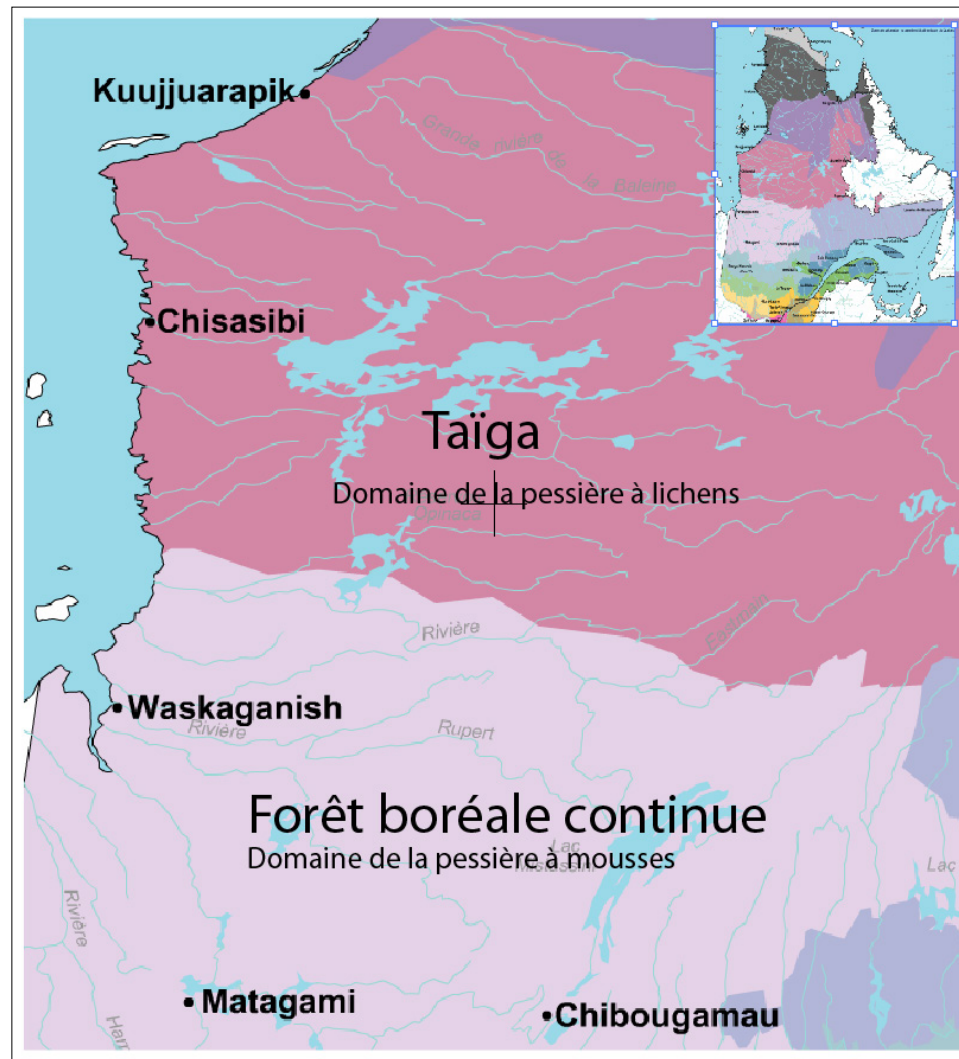


Figure 3-2 : Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec subarctique (adapté de la Carte des domaines bioclimatiques du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2014)

La pessière à lichens est caractérisée par des peuplements ouverts (environ 40% de recouvrement). L'espèce arborescente principale est l'épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.), alors que le sous-bois est recouvert d'un tapis de lichens et d'éricacées. Les deux autres espèces arborescentes les plus abondantes sont le pin gris (*Pinus banksiana*, (Lamb.) et le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.) (Ressources Naturelles Canada, 2019). La pessière à mousses est aussi composée d'un paysage forestier dominé par l'épinette noire, bien que le

couvert forestier soit plus fermé que dans la pessière à lichens et les précipitations un peu plus abondantes. Le pin gris et le mélèze larcin (*Larix laricina* DuRoi, K. Koch.) sont aussi des arbres dominants du territoire. On trouve aussi d'autres espèces arborescentes en moindre abondance : le sapin baumier (*Abies balsamea* [L.] Mill.), le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.), le bouleau blanc (*Betula papyrifera* March.) et, dans la zone côtière, l'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss). Le sol forestier est couvert de plantes arbustives et d'une épaisseur variable de mousses hypnacées. En bordures des lacs et des cours d'eau des deux domaines bioclimatiques de la zone d'étude, on retrouve plusieurs espèces arbustives; principalement l'aulne vert (*Alnus viridis* (Chaix) et les saules (*Salix bebbiana* (Sarg.), *Salix planifolia* (Pursh) et *Salix argyrocarpa* (Andersson) (MFFP, 2014; Payette 1983, Hare et Ritchies, 1972).

Chapitre 4 : MÉTHODES

4.1. Sites d'étude

Trois lacs sont à l'étude dans ce mémoire : Rodayer, Mirabelli et Miron (aussi appelé Nitiwapisunan) (Tableau 4.1). Localisés en Jamésie (Figure 4.1) et se drainant vers la Baie de James, les trois lacs se situent dans des sous-bassins différents. Le lac Rodayer, le plus au sud, est situé dans le domaine bioclimatique de la pessière à mousses, dans le sous-bassin versant du cours inférieur de la Broadback. Le lac Mirabelli, est situé dans le domaine bioclimatique de la pessière à lichens, à la frontière avec le domaine de la pessière à mousses, dans le sous-bassin versant Jolicoeur/Pontax. Finalement, le lac Miron, le plus au nord, est situé dans le domaine de la pessière à lichens dans le sous-bassin versant du cours inférieur de la Sakami.

Les trois lacs sont situés à la tête de leur sous-bassin versant (Figure 4.1). À cet effet, ils sont alimentés principalement par les précipitations, le débit des petits affluents étant assez négligeable. Théoriquement, leur position dans leur bassin versant permet de poser l'hypothèse que les variations du niveau d'eau seraient dues exclusivement aux variations du régime des précipitations et reflèteraient ainsi l'historique des fluctuations de l'hydraulicité de la région.

Les lacs ont aussi été choisis en fonction de leur taille pour permettre le développement de vagues conséquentes et offrir assez d'emprise au vent pour que les déplacements glaciels aient lieu. Plus particulièrement, une forme relativement arrondie a été privilégiée (fetch similaire dans toutes les orientations du vent) (Tableau 4.1). Les trois lacs ont peu d'îles et donc, peu d'obstacles aux agents géomorphologiques actifs. Les forêts riveraines sont également relativement denses et la géomorphologie riveraine est passablement diversifiée. Les zones riveraines sont composées de plages, de cordons de blocs, d'affleurements rocheux, de platiers et de talus organiques en érosion. L'ensemble de ces critères permettait de s'assurer que ces lacs seraient de bons sites d'étude de la variabilité spatiale de l'exposition des rives et de l'activité

glacière et hydrodynamique (Lemay et Bégin 2008). Aussi, les lacs ont été choisis en fonction de leur proximité de la route de la Baie-James, ce qui permettait du même coup de créer un gradient latitudinal du 50° au 53° parallèle pour l'étude afin de bien représenter la région et d'analyser la cohérence spatiale latitudinale des enregistrements glaciels.

Tableau 4-1 : Caractéristiques des bassins-versants et des lacs à l'étude

	Lac Rodayer	Lac Mirabelli	Lac Miron
<i>Caractéristiques des sous-bassins-versants</i>			
<i>Grand bassin-versant</i>	Baie d'Hudson		
<i>Aire de drainage</i>	Nord du Québec et du Labrador, Baie d'Hudson		
<i>Bassin versant</i>	Broadback et Rupert	Broadback et Rupert	La Grande-Côte
<i>Sous-bassin-versant</i>	Cours inférieur de la Broadback	Jolicoeur /Pontax	Cours inférieur de la Sakami
<i>Superficie (km²)</i>	9030,40	9324,35	9200,66
<i>Périmètre (km)</i>	605,61	728,72	706,56
<i>Caractéristiques des lacs</i>			
<i>Latitude</i>	50°51'58''N	51°52'33''N	53°03'00''N
<i>Longitude</i>	77°41'58''W	77°22'33''W	77°20'58''W
<i>Superficie (km²)</i>	21,9	11,0	5,96
<i>Altitude (m)</i>	244	190	198
<i>Périmètre (km)</i>	31,47	19,13	25,67

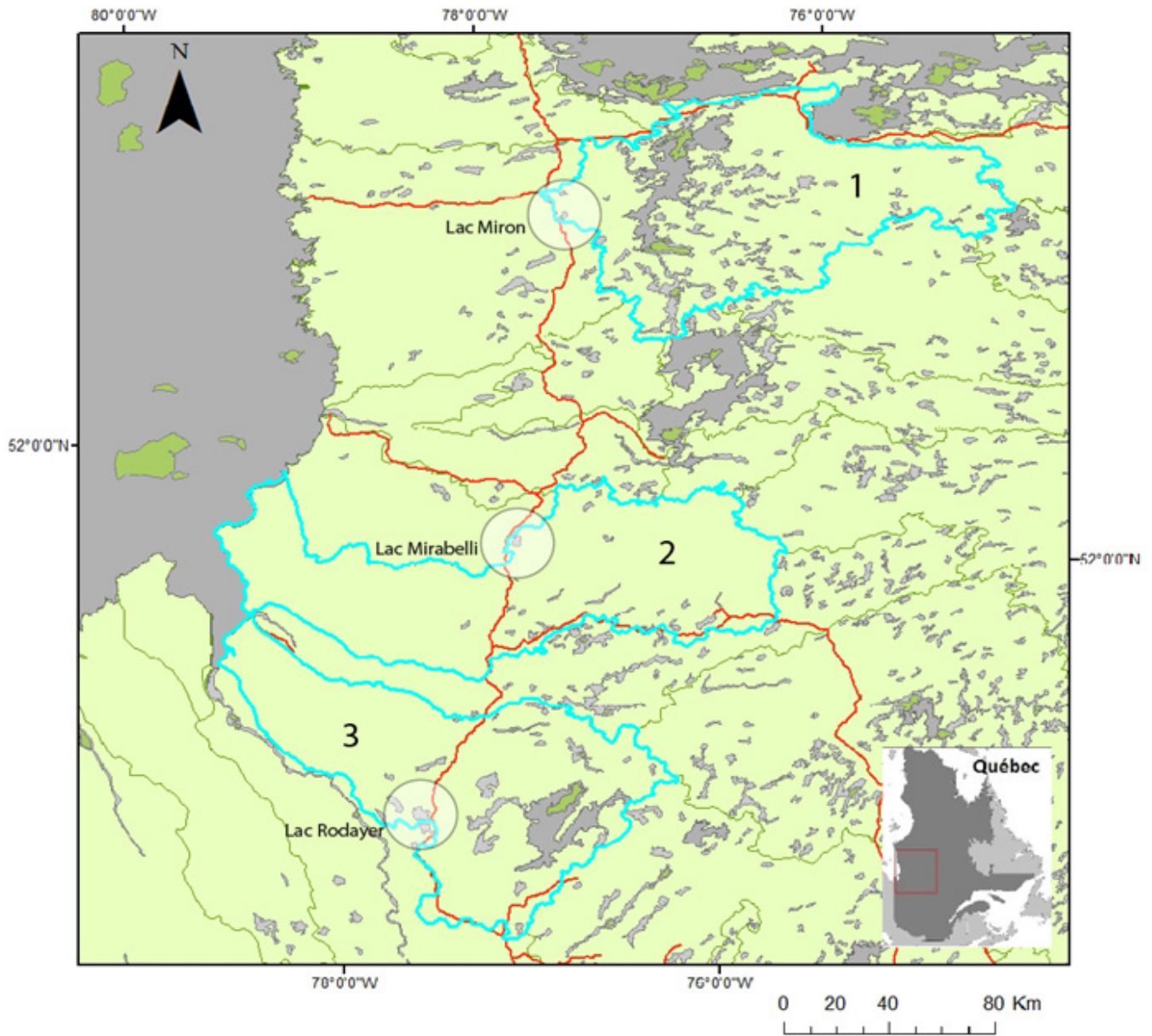


Figure 4-1 : Localisation des sous-bassins-versants (contours bleus) et des lacs (encerclés). 1 : sous-bassin-versant du cours inférieur de la Sakami, 2 : sous-bassin-versant Jolicoeur/Pontax et 3 : sous-bassin-versant du cours inférieur de la Broadback.

4.2. Échantillonnage

Les arbres riverains des trois lacs à l'étude ont été échantillonnés au printemps (Mirabelli en 2012 et Rodayer et Miron en 2013). L'échantillonnage s'est fait avant le début de la saison de croissance, c'est-à-dire de la fin mai à la mi-juin. Les arbres de toutes espèces ont été considérés. Cependant, comme l'épinette noire est fortement dominante sur les rives des trois lacs, 98% des échantillons appartiennent à cette espèce. Les quelques échantillons restants proviennent de pins gris, de mélèzes larcin et de sapins baumier. Les zones riveraines en milieu de forêt brûlée (lacs Mirabelli et Miron) n'ont pas été échantillonnées afin de s'assurer que les cicatrices étaient dues aux glaces et que le bois de réaction des arbres n'était pas causé par la déstabilisation des sols suite aux incendies forestiers. Les sections transversales complètes ont été favorisées pour minimiser la perte d'information et conserver toute la séquence de cernes. Seuls les arbres vivants ont été échantillonnés. La datation s'est donc faite à partir de l'année de leur mort, c'est-à-dire l'année précédant l'échantillonnage.

4.2.1. Cicatrices glacielles

Pour la sélection des arbres portant des cicatrices de glace, l'échantillonnage a été effectué sur toute la périphérie des lacs lorsqu'il y avait présence d'arbres cicatrisés (Figure 4.2). Au total, 210 arbres ont été échantillonnés, soit 101 au lac Rodayer, 48 au lac Mirabelli et 61 au lac Miron. Les zones riveraines où il y avait une importante accumulation de débris ont été évitées, de même que celles où il y avait plusieurs arbres déracinés afin d'éviter la surestimation des événements cicatriciels reliés aux événements de tempêtes et aux radeaux de glace (Tardif et Bergeron 1997). L'accent a été mis sur les arbres qui semblaient porter plus d'une cicatrice. De plus, lorsqu'il y avait plusieurs arbres voisins qui semblaient clairement porter une cicatrice provenant du même événement (principalement des événements récents), seulement un a été échantillonné afin de ne pas en surestimer l'importance. Pour chacun des arbres cicatrisés échantillonnés, le diamètre à la hauteur de poitrine (dhp : 1,30 mètre), l'aspect général de l'arbre et du milieu dans lequel il a poussé, la distance par rapport à l'eau et la pente ont été notés. Aussi, les hauteurs minimum et maximum des cicatrices par rapport au niveau d'eau du lac ont été notées. Les cicatrices d'une longueur verticale trop importante ont été rejetées pour éviter l'effet de radeau (écorçage d'une

tige sous une trainée glacielle). Les coupes transversales ont été prises au milieu des cicatrices. Plusieurs coupes transversales ont été prises si nécessaire lorsque l'arbre portait plus d'une cicatrice de façon à répertorier l'ensemble des événements qu'il contient.

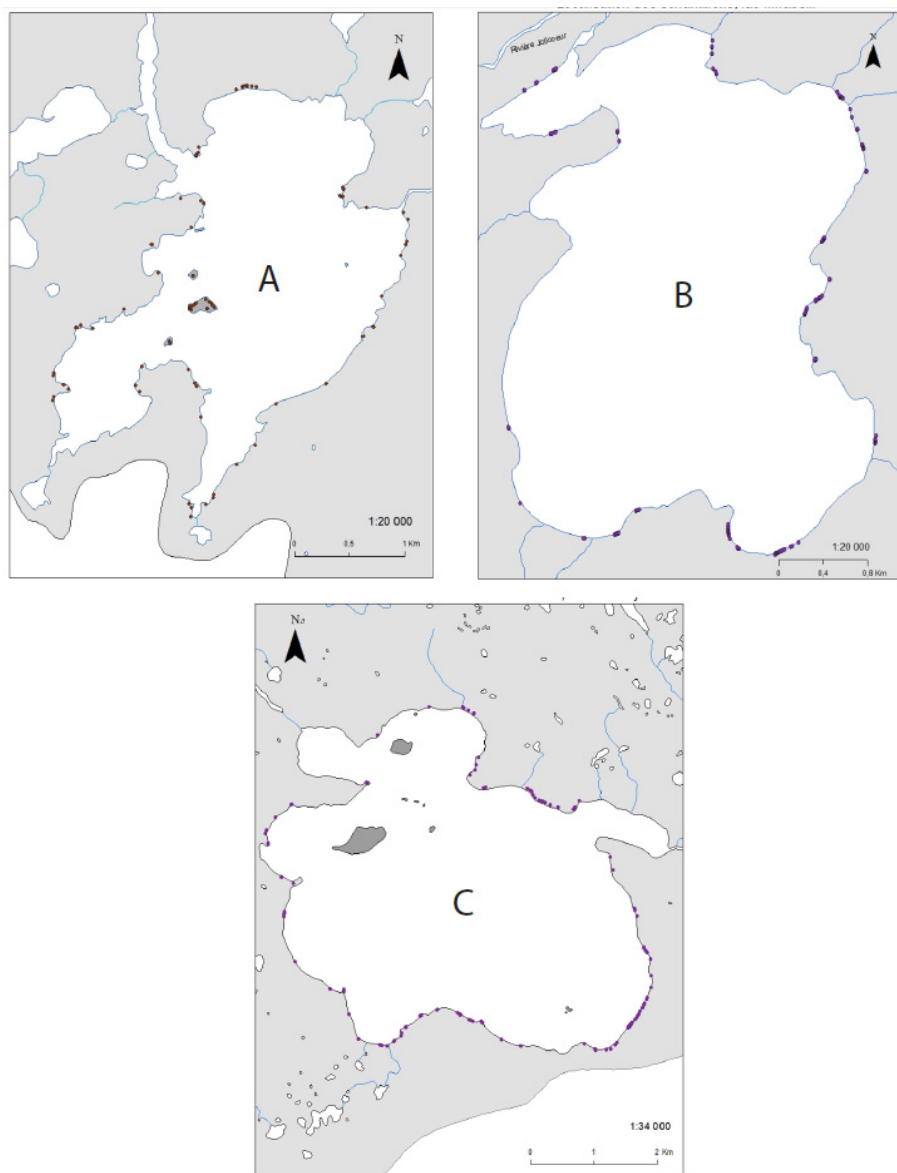


Figure 4-2 : Localisation des arbres échantillonnés (points). A : Lac Miron, B : lac Mirabelli et C : lac Rodayer

4.2.2. Bois de réaction

Pour la sélection des arbres déchaussés et inclinés, l'échantillonnage a aussi été effectué sur toute la périphérie des trois lacs lorsqu'il y avait présence d'arbres riverains (Figure 4.2). Les arbres qui semblaient avoir poussé de façon inclinée tout au long de leur vie ont été rejetés, car il peut s'agir de marcottes. Nous avons daté la première année d'une séquence de bois de réaction correspondant habituellement au moment de l'inclinaison d'un arbre. Pour éviter d'intégrer à la chronologie les séquences de bois de réaction produite suite au ploiement des tiges sous le poids de la neige, seuls les arbres avec un diamètre à hauteur de poitrine de plus de 10 cm ont été considérés. Au total, 133 arbres ont été échantillonnés, 37 au lac Rodayer, 74 au lac Mirabelli et 26 au lac Miron. Le diamètre à la hauteur de taille (1,30 m), l'aspect général de l'arbre et du milieu dans lequel il a poussé, la distance par rapport à l'eau et la pente ont été notés. Les coupes transversales ont été prises au maximum de la courbure.

4.3. Traitement des échantillons

Après avoir été coupés, les échantillons ont été séchés à l'air libre pendant plusieurs semaines puis poncés avec du papier aux grains de différentes tailles, de plus en plus fins, soit de 40 à 400 μm . Ensuite, les cernes de croissance des arbres ont été dénombrés sous une loupe binoculaire. L'année d'apparition du premier cerne au niveau d'échantillonnage de chaque arbre de même que les années des différents événements ont été notées. Un minimum de deux rayons par échantillon a été daté, afin d'éviter les erreurs de datation. Lorsqu'un arbre avait plus d'une coupe transversale, l'année d'établissement de la coupe la plus près du collet a été considérée pour l'ensemble des sections de cet arbre. Les échantillons dont l'état de conservation ne permettait pas la datation de même que ceux dont la datation était incertaine ont été rejetés de l'échantillon final.

4.3.1. Cicatrices glacielles

En ce qui a trait à la méthodologie du traitement des échantillons propre aux arbres cicatrisés, lorsque plusieurs cicatrices d'une même année ont été trouvées sur un arbre, une seule a été retenue. Au total, 192 arbres et 270 cicatrices glacielles ont été considérés (Tableau 4.2).

Dix-huit arbres ont été éliminés de l'échantillon puisqu'il était impossible de dater leur(s) cicatrice(s) avec précision. Pour les analyses, la hauteur moyenne de la cicatrice a été considérée. De plus, lorsqu'il y avait plus d'une cicatrice pour une année, la moyenne des hauteurs moyennes a été calculée.

Tableau 4-2: Caractéristiques des échantillons de cicatrices glacielles

	Lac Rodayer	Lac Mirabelli	Lac Miron
<i>Nombre d'arbres cicatrisés retenus</i>	88	48	56
<i>Nombre de cicatrices</i>	119	72	79
<i>Intervalle de la chronologie glacielle</i>	1760-2013	1789-2011	1795-2013
<i>Année de la 1ère cicatrice</i>	1920	1924	1928

4.3.2. Bois de réaction

Pour ce qui est des coupes transversales d'arbres inclinés ou déchaussés, le bois de réaction à l'intérieur d'un rayon de cinq centimètres à partir du cœur des coupes transversales n'a pas été considéré afin d'éviter l'effet de ploiment. Cent-vingt-trois arbres et 274 premières années de séquence de bois de réaction ont été dénombrés dans l'échantillon final (Tableau 4.3). Les arbres ayant du bois de réaction tout au long de leur vie ont été rejetés puisqu'ils ne représentent pas d'événements ponctuels.

Tableau 4-3 : Caractéristiques des échantillons de début de séquence de bois de réaction

	Lac Rodayer	Lac Mirabelli	Lac Miron
<i>Nombre d'arbres inclinés ou déchaussés retenus</i>	33	64	26
<i>Nombre de début de séquences de bois de réaction</i>	79	149	46
<i>Période couverte de la chronologie d'événements hydrodynamiques</i>	1824-2012	1789-2011	1816-2012
<i>Année de la première séquence de bois de réaction</i>	1903	1908	1931

4.3.3. Analyses statistiques des chronologies

Corrélations de Spearman

Des corrélations de Spearman ont été calculées entre les chronologies d'abrasion glacielle des trois lacs, entre les chronologies de début de séquence de bois de réaction des trois lacs et entre la chronologie glacielle et celle de début de séquence de bois de réaction pour chaque lac et ce pour différentes périodes (Tableau 4.4). Les calculs ont été effectués à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2014).

Tableau 4-4: Périodes utilisées pour les corrélations de Spearman entre les chronologies

Entre chronologies glacielles	Entre chronologies de début de séquence de bois de réaction	Entre la chronologie glacielle et la chronologie de début de séquence de bois de réaction de chaque lac
1795-2011 ^a	1824-2011 ^a	1795-2011 ^a
1920-2011 ^b	1903-2011 ^c	1900-2011 ^d
1950-2010 ^e	1950-2010 ^e	1950-2010 ^e

^a : Toutes les chronologies ont au moins un arbre

^b : À partir de la première cicatrice glacielle pour un des trois lacs

^c : À partir du premier début de séquence de bois de réaction pour un des trois lacs

^d : 20^e siècle

^e : Période qui sert à la corrélation avec les données hydro-climatiques

Test de Kolmogorov-Smirnov

Un test de Kolmogorov-Smirnov a été effectué sur les chronologies d'abrasion glacielle et les chronologies de début de séquence de bois de réaction des trois lacs pour vérifier si l'enregistrement des événements étaient influencés par la structure démographique des populations porteuses et l'inverse. Les calculs ont été effectués à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2014)

Intervalle de confiance bilatérale d'une proportion

L'intervalle de confiance bilatérale de la proportion d'arbres touchés par l'activité glacielle par année a été calculé pour les chronologies glacielles des trois lacs (à partir de l'année de la première cicatrice de chaque chronologie) (voir tableau 4.2). La méthode de score ou encore méthode de Wilson a été utilisée. Les calculs ont été effectués à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2014).

4.4. Analyse des données climatiques et hydrologiques

Les variables utilisées pour l'analyse hydro-climatique se divisent en trois catégories : hydrologiques, climatiques et degrés-jour de gel (DJG). Le nombre d'années utilisé pour la corrélation et la période de couverture des données diffèrent entre chaque catégorie (Tableau 4.5). Des corrélations de Spearman ont été faites avec les chronologies glacielles des lacs Miron, Mirabelli et Rodayer (nombre de cicatrices par année et hauteur moyenne des cicatrices) pour les trois catégories.

Tableau 4-5: Corrélation des données hydro-climatiques avec les chronologies glacielles

Catégorie de données	Nombre d'années de la corrélation	Période de couverture
Hydrologique	51	1960-2010
Climatiques	46	1960-2005
Degrés-jour de gel (DJG)	39	1961-1999

4.4.1. Analyse des données hydrologiques

Variables hydrologiques

Les variables hydrologiques ont été étalonnées avec les apports harmonisés de deux bassins versants se retrouvant sur le territoire d'étude : LaGrande 2 et lac Sakami et Eastmain-1 (Tableau 4.6). L'information a été fournie par Hydro-Québec. Comme les données proviennent d'apports harmonisés de bassins versants, elles ne donnent pas l'information spécifique aux trois lacs de l'étude. Le bassin versant LG2-lac Sakami se situe au nord de la zone d'étude et le bassin versant Eastmain-1 au sud. Cependant, bien que les apports harmonisés ne donnent pas d'information spécifique aux sites d'études, il est possible d'étudier grâce à eux la réponse de chaque lac aux conditions hydrologiques générales de la Jamésie.

Les données hydrologiques choisies ont été rapportées sur différentes périodes d'analyse. Certaines données hydrologiques ont nécessité une analyse de l'hydrogramme de crue afin de définir les périodes ou jours de certaines variables (jour Julien du début de la crue, jour Julien du débit maximal de la crue, durée de la montée de la crue, débit moyen de la crue, durée de la décrue et débit moyen de la décrue).

Tableau 4-6: Variables hydrologiques utilisées pour l'analyse des apports harmonisés des bassins-versants LG2-lac Sakami et Eastmain-1

Variable*	Identifiant
Débit total 1er au 31 mai m ³ /s	Qmay
Débit total 1er au 30 juin m ³ /s	Qjun
Débit total 1 mai au 10 juin m ³ /s	QM10j
Débit maximal de la crue en m ³ /s	Pic
Débit moyen de la crue (moyenne par jour)	Qmoy_crue
Débit moyen de la montée de la crue m ³ /s	Qmoy_mcrue
Débit moyen de la décrue m ³ /s	Qmoy_dcrue
Jour (jour julien) du débit maximal de la crue en m ³ /s	Date_Pic
Jour du début de la crue (jour julien)	Debut_crue
Durée de la crue	Duree_crue
Durée de la montée de la crue	Duree_Mcrue
Durée de la décrue	Duree_Dcrue

Hydrogrammes de crue glacielle

Les données utilisées pour créer les hydrogrammes ont été extraites des apports harmonisés des bassins-versants de LG2-lac Sakami et Eastmain-1 et couvrent la période allant de 1950 à 2010. Les hydrogrammes sont d'une période de trois mois; du 1^{er} avril au 30 juin, ce qui correspond à la période de la fonte de la neige et de la crue printanière en Jamésie. Les années ont été classées en quatre catégories : avec de crues glacielles majeures, années avec présence d'activité glacielle sur un lac, années avec présence d'activité glacielle sur au moins deux lacs et années sans activité glacielle. Les moyennes des débits journaliers des années de chaque catégorie ont été utilisées.

Analyse en composantes principales des données hydrologiques

Une analyse en composantes principales a été effectuée de manière à réduire la redondance et la colinéarité entre les variables hydrologiques du jeu de données. Pour chaque bassin versant, toutes les séries temporelles des caractéristiques de l'hydrogramme de crue ont été rassemblées dans une même matrice de variables hydrologiques. Puis, les deux premières composantes principales ont été extraites de cette matrice pour chaque bassin versant. Ces composantes principales ont été corrélées aux chronologies de cicatrices glacielles, de la même manière que toutes les autres variables (R Core Team, 2020).

4.4.2. Analyse des données climatiques

Variables climatiques

Les données climatiques proviennent du Climatic Research Unit (CRU 2021). Le point le plus proche sur la grille de chaque lac a été défini et les données mensuelles ont été extraites, la technique de krigeage de Taboza et al. (2005) a été utilisée. Cinq variables de température ou de précipitations ont été choisies pour l'analyse (Tableau 4.7).

Tableau 4-7: Variables climatiques utilisées

Variables	Identifiant
Moyenne mensuelle de la température maximale	Mmens_tmax
Moyenne mensuelle de la température minimale	Mmens_tmin
Total mensuel des précipitations sous forme de pluie	Tmens_pluie
Total mensuel des précipitations sous forme de neige	Tmens_neige
Total mensuel des précipitations (pluie et neige)	Tmens_tot

Les données climatiques des cinq variables de température et de précipitations ont été rapportées sur différentes périodes d'analyses mensuelles (12) et pluri-mensuelles variant entre trois (4) et sept mois (1). (Tableau 4.8). Pour l'analyse, les périodes précédant les crues glacielles ont été utilisées. Par exemple, la période septembre à novembre (SON) de l'année 1960 a été utilisée pour comparer les résultats de l'année 1961 de la chronologie d'abrasion glacielle.

Tableau 4-8 : Périodes d'analyse utilisées pour les cinq variables climatiques

Période	Identifiant
Mois de janvier	M1
Mois de février	M2
Mois de mars	M3
Mois d'avril	M4
Mois de mai	M5
Mois de juin	M6
Mois de juillet	M7
Mois d'août	M8
Mois de septembre	M9
Mois d'octobre	M10
Mois de novembre	M11
Mois de décembre	M12
Décembre-janvier-février	DJF
Mars-avril-mai	MAM
Juin-juillet-août	JJA
Septembre-octobre-novembre	SON
Septembre à mars inclusivement	SONDJFM

Analyse des données de degrés-jours de gel (DJG)

Les données journalières des températures provenant des trois mêmes points utilisés pour les données climatiques ont été utilisées pour calculer les degrés-jour de gel mensuels (DJG). Les données ont été rapportées sur différentes périodes pour l'analyse : octobre à décembre inclusivement (3 mois) (OND), janvier à avril inclusivement (4 mois) (JFMA) et octobre à avril inclusivement (7 mois) (ONDJFMA). Pour l'analyse, les périodes précédant les crues glacielles ont été utilisées. Par exemple, la période octobre à décembre de l'année 1960 a été utilisée pour comparer les résultats de l'année 1961 de la chronologie d'abrasion glacielle.

4.5. Cartographie et segmentation des rives

La segmentation des rives est une méthode couramment utilisée dans les environnements comme les lacs (Bégin 1986, Lemay et Bégin 2008, Lemay et Bégin 2011). Cette étape s'est déroulée en deux volets distincts : sur le terrain à l'aide d'un bateau à moteur et en laboratoire, à l'aide du logiciel de cartographie ArcGIS (ESRI, 2014). Comme les crues glacielles ont des impacts géomorphologiques et écologiques qui varient grandement le long des rives d'un lac selon le degré d'exposition aux vents et aux vagues, notamment, les rives ont été segmentées en unités homogènes en fonction de plusieurs caractéristiques physiques et géomorphologiques afin d'étudier et caractériser le régime de l'activité glacielle pour chaque type de rivage (Bégin 2000b).

Aux printemps 2012 et 2013, les rives des trois lacs ont été cartographiées à l'exception des baies très étroites et des exutoires (Miron et Mirabelli) et certaines îles (Miron et Rodayer). (Figure 4.3). Chaque segment a été géoréférencé. Pour ce faire, le début et la fin de chaque type de rivage ont été marqués à l'aide d'un point GPS.

Sur le terrain, les critères suivants ont été utilisés pour diviser les sections de rives et les caractériser (Tableau 4.9): orientation de la rive, type de substrat (Figure 4.4), niveau de la pente infra-riveraine et niveau de la pente supra-riveraine et densité de la végétation arbustive protégeant les zones arborées riveraines. Les pentes ont été classées de façon quantitative. Le lac

Miron a ainsi été divisé en 71 segments, le lac Mirabelli en 86 segments et le lac Rodayer en 51 segments.

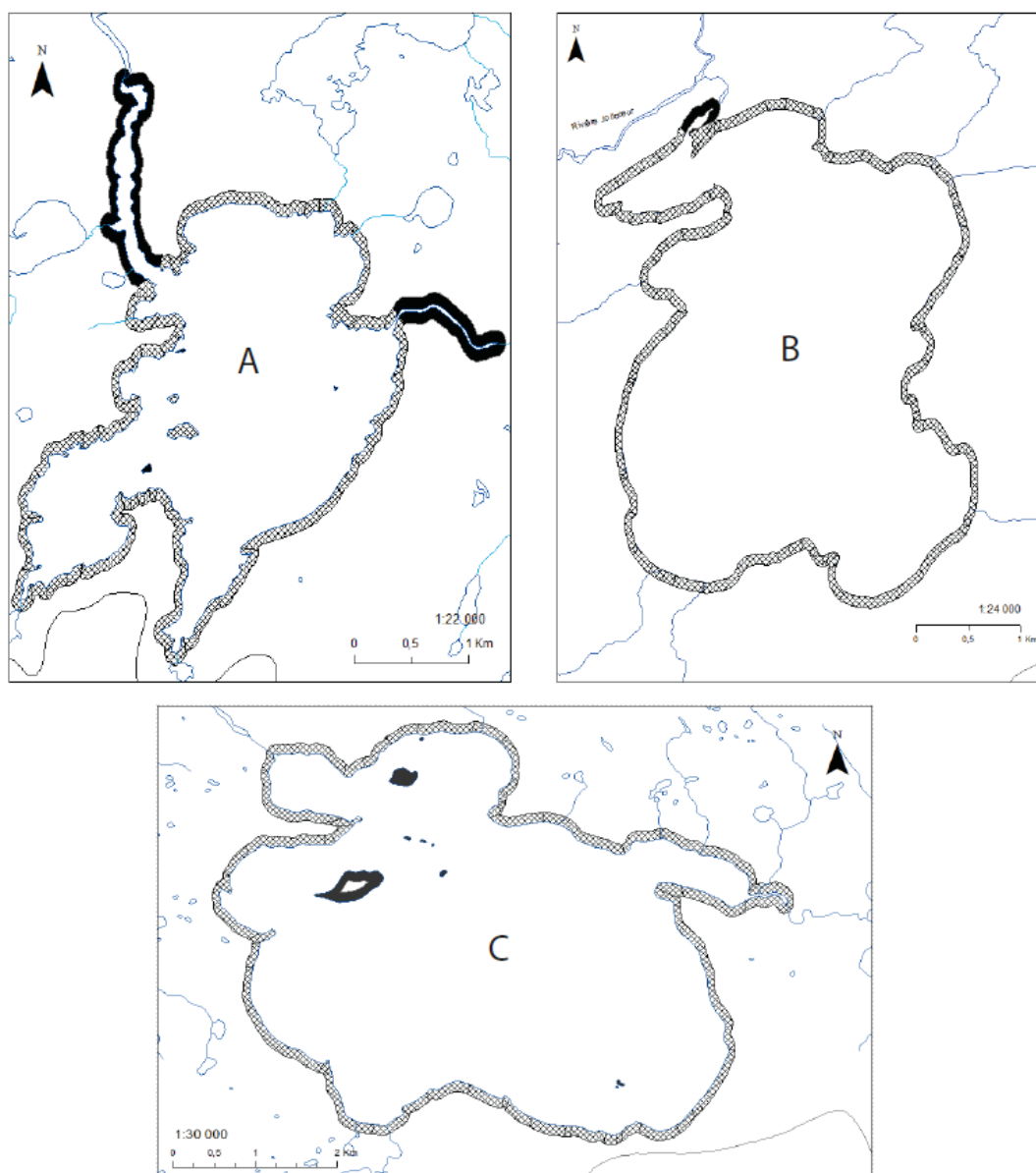


Figure 4-3: Rives cartographiées en gris et non-cartographiées en noir. A : Lac Miron, B : Lac Mirabelli et C : Lac Rodayer

Tableau 4-9: Critères de segmentation des rives sur le terrain

Critères de segmentation	Possibilités	
Orientation de la rive	Nord Nord-Est Est Sud-Est	Sud Sud-Ouest Ouest Nord-Ouest
Type de substrat	Plage, Cordon de blocs Platière,	Affleurement rocheux, Fabrique glacielle, Talus organique en érosion Segment inondé
Pente infra-riveraine	Faible, moyenne, élevée	
Pente supra-riveraine	Faible moyenne, élevée	
Densité de la végétation arbustive protégeant les zones arborées (%)	0-10	41-60
	11-20	61-80
	21-40	81-100

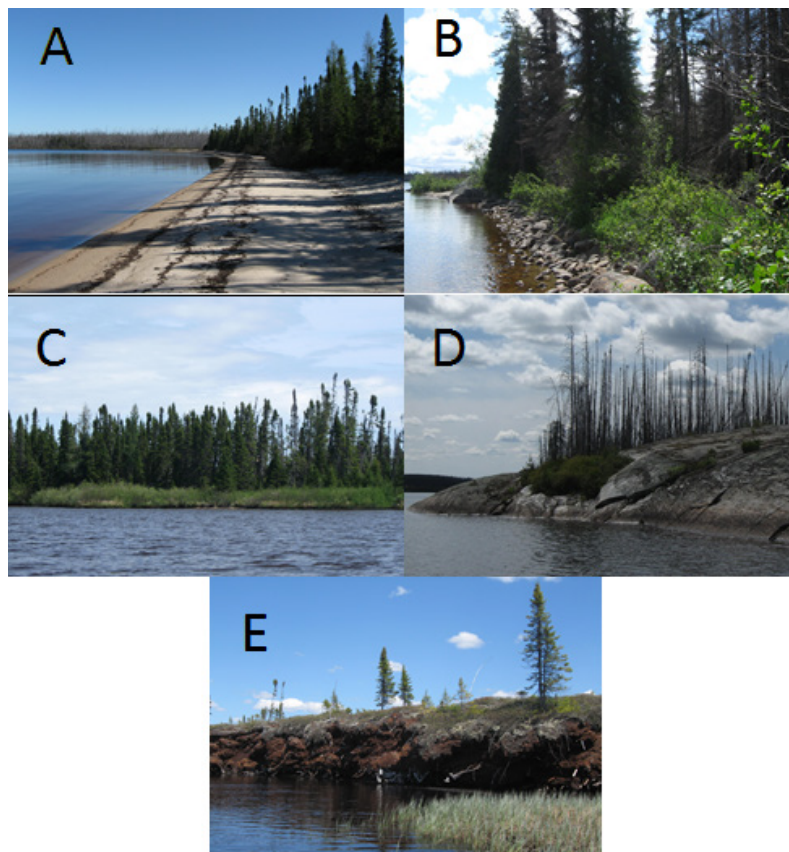


Figure 4-4: Types de rivages échantillonnés : Plage (A), Cordon rocheux (B), Platière (C), Affleurement Rocheux (D) et talus organique en érosion (F).

4.6. Analyse spatiale et cartographie

4.6.1. Calcul du fetch total

Selon Environnement Canada (2016), le fetch est la « longueur du trajet, au-dessus d'une grande surface d'eau, d'un vent soufflant dans une direction et à une vitesse généralement uniforme. La hauteur des vagues produites par le vent est proportionnelle au fetch. Plus le fetch est long, plus les vagues produites par le vent sont hautes ».

Dans le cas des trois lacs à l'étude, le fetch était calculé entre le point médian d'un segment de rivage jusqu'à la rencontre avec le prochain obstacle, soit une île ou le rivage opposé. Pour prendre en compte la totalité des directions des vents, la mesure du fetch total a été calculée. La mesure du fetch total est l'addition de la mesure de fetch par rapport au point médian d'un segment de rivage et ce, à tous les 10 degrés sur 360 degrés. La valeur «0» étant attribuée pour la distance entre la rive et la forêt supra-riveraine adjacente au point médian servant de base au calcul. 981 mesures de fetch ont été faites pour le lac Miron, 1399 pour le lac Mirabelli et 799 pour le lac Rodayer. Les mesures de distances ont été effectuées à l'aide de l'outil «Mesurer» du logiciel ArcGIS (ESRI, 2014).

4.6.2. Production de cartes

En parallèle à l'analyse dendrochronologique, une cartographie exhaustive des rives et des différentes caractéristiques qui les composent a été réalisée. Les limites des cellules riveraines (segments de rivage), de même que la localisation de chaque arbre ont été préalablement marquées au moyen d'un point GPS pendant l'échantillonnage sur le terrain. Des cartes ont été produites pour chaque caractéristique des rives (orientation de l'exposition, type de substrat, pente infra-riveraine, pente supra-riveraine et densité de la zone de végétation arbustive protégeant la zone arborée riveraine).

Grâce à l'analyse spatiale, il a été possible d'intégrer de nouveaux paramètres d'analyse tels que la longueur du fetch total pour chaque arbre de l'échantillon. À cet effet, puisque le fetch total a été calculé par segment de rivage, pour alléger l'analyse, tous les arbres de ce segment de

rivage se sont vu attribuer le total du segment de rivage dont ils font partie. Par la suite, la relation entre le positionnement spatial des échantillons et les caractéristiques descriptives des rives a pu être établie.

4.7. Profils topographiques et inventaires écologiques par type de rivage

4.7.1 Profils topographiques

Les profils topographiques par type de rivage ont été réalisés au mois de juin 2013 au lac Miron. Pour les affleurements rocheux, les cordons de blocs et les plages, une rive touchée par l'activité glacielle et hydrodynamique, de même qu'une rive stable sans présence d'activité glacielle et hydrodynamique ont été mesurés à l'échelle. Une platière de même qu'une tourbière riveraine en érosion ont aussi été mesurées. Pour chaque rive choisie, les mesures X (distance par rapport au lac (centimètres)) et Y (élévation par rapport au lac (centimètres)) ont été prises pour un transect représentatif du milieu et des types de rivages, en partant du bord de l'eau et allant jusqu'à la rencontre avec le milieu forestier afin que toute la zone riveraine soit mesurée à l'échelle. En tout huit dessins à l'échelle ont été réalisés à l'aide du logiciel Adobe Illustrator (Adobe Inc., 2014).

4.7.2 Inventaires écologiques

Un inventaire écologique de la flore en place a été réalisé pour quatre types de rives : affleurement rocheux, cordon de blocs, plage et platière. À partir de la limite infra-riveraine entre le lac et la rive et jusqu'à la limite supra-riveraine avec le milieu forestier, l'inventaire des plantes et des arbres en place a été effectué à chaque mètre et sur une superficie d'un mètre carré. Pour chaque mètre carré, un inventaire en pourcentage de recouvrement a également été réalisé. L'ensemble des strates de végétation superposées présentes ont été calculées en pourcentage. Ainsi, il est possible que les résultats donnent des pourcentages supérieurs à 100.

Chapitre 5 : RÉSULTATS

5.1. Chronologie de l'abrasion glacielle sur les arbres riverains

L'âge minimum recensé pour un arbre de chaque chronologie glacielle remonte au 18^e siècle pour les trois lacs (Miron en 1795, Mirabelli en 1789 et Rodayer en 1760 (Figure 5.1). Les premières cicatrices datent toutefois des années 1920 (Miron 1928, Mirabelli 1924 et Rodayer 1920) (Annexe 9.1). Il y a donc un grand délai entre le moment où les franges forestières s'établissent et celui où elles subissent les effets des crues glacielles. Les années majeures d'activité glacielle au lac Miron sont 1990 et 2009, et 1976, dans une moindre mesure. Au lac Mirabelli, il s'agit de 1976, 1999 et 2009. Au lac Rodayer, les années de haute fréquence d'activité glacielle sont 1999 et 2009, et il y a eu plusieurs arbres cicatrisés en 1969, 1975, 2003 et 2008, notamment. À cet effet, trois années ressortent sur les trois lacs : 1976, 1999 (sauf au lac Miron) et surtout 2009. Ensemble, les trois lacs ont enregistré 69 années d'activité glacielle, dont 46 années ayant été enregistrées sur au moins deux lacs. De plus, les chronologies montrent que l'activité glacielle a augmenté dans la deuxième moitié du XX^e siècle, alors que seulement 13 années marquées par l'activité glacielle (cinq sur au moins deux lacs) ont été enregistrées avant 1950. La fréquence des années avec activité glacielle sur au moins deux lacs est d'une par décennie dans la première moitié du XX^e siècle, mais de 6,6 dans la deuxième moitié.

La corrélation entre les chronologies des cicatrices glacielles répertoriées (nombre d'arbres cicatrisés par année) aux trois lacs révèle une certaine similarité régionale (corrélations de Spearman, tableau 5.1). La corrélation est assez forte lorsque l'on prend la période 1795-2011 (au moins un arbre dans chaque chronologie) puisqu'il n'y a pas eu d'activité glacielle recensée avant les années 1920. Il y a toutefois quand même une corrélation entre les chronologies pour la période 1920-2011.

Tableau 5-1: Coefficients de corrélation (Spearman) des chronologies glacielles entre les lacs pour différentes périodes

	1795-2011	1920-2011	1950-2010
Miron-Mirabelli	0,428**	0,295**	0,219
Miron- Rodayer	0,503**	0,262*	0,092
Mirabelli- Rodayer	0,494**	0,320**	0,246*

p-values

** $p < 0,01$;

* $0,01 < p < 0,05$

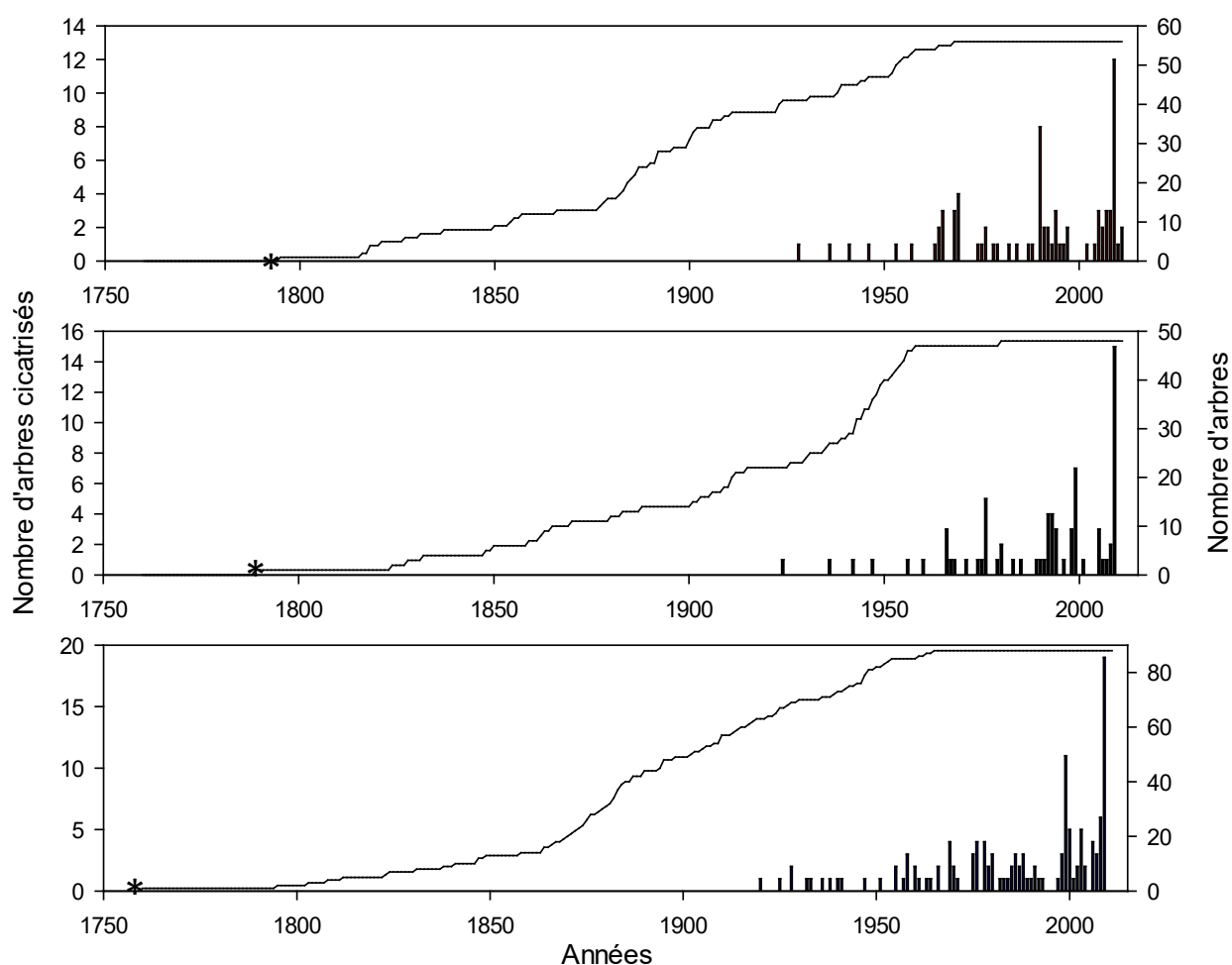


Figure 5-1: Chronologies glacielles des trois lacs à l'étude de 1760 à 2012. Miron en haut en rouge, Mirabelli au milieu en noir et Rodayer en bas en bleu. *représente l'établissement du premier arbre de chaque chronologie. Les courbes indiquent la fréquence cumulée des arbres selon leur année d'établissement.

5.1.1. Délai de réponse des franges forestières riveraines aux crues glacielles.

Pour chacun des trois lacs, il y a un long délai entre l'établissement des arbres et le moment où ils ont enregistré des dommages par les glaces. Pour évaluer l'indépendance de la chronologie du glacier de la démographie des arbres qui l'enregistre, un test de Kolmogorov-Smirnov a été réalisé. Il s'appuie sur la plus forte différence entre le pourcentage cumulatif d'arbres établis et le pourcentage cumulé de la fréquence de cicatrices glacielles à un moment de l'histoire de chaque lac. Avec une valeur de $p < 0,001$, on conclut que la distribution de fréquence des cicatrices dans le temps est significativement indépendante de celle des arbres porteurs. Ainsi, le test s'est avéré significatif chez les populations des trois lacs (Figure 5.2).

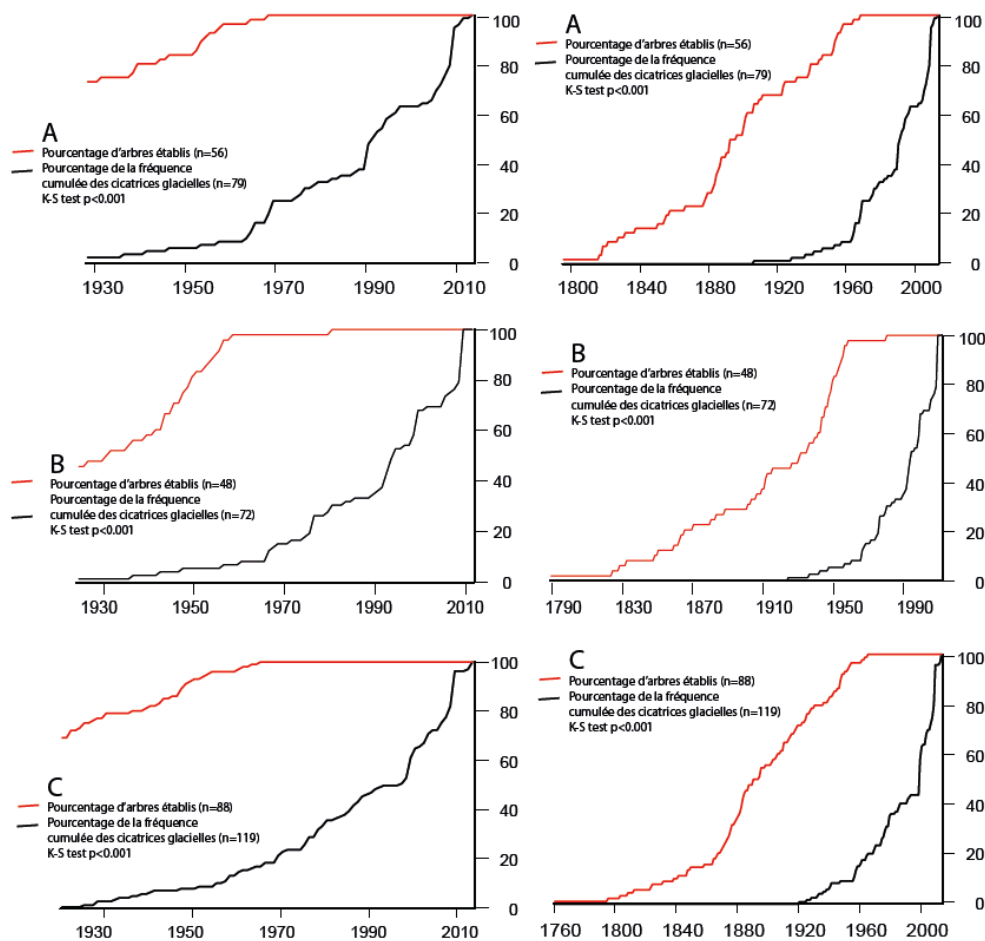


Figure 5-2: Comparaison des pourcentages cumulatifs d'arbres établis (ligne rouge) et de la fréquence des cicatrices glacielles (ligne noire) pour les lacs Miron (A), Mirabelli (B) et Rodayer (C). À gauche à partir de la première cicatrice recensée et à droite pour la chronologie entière.

5.1.2 Intervalle de confiance bilatérale d'une proportion

La figure 5.3 montre les résultats du calcul de l'intervalle de confiance bilatérale (test de Wilson) de la proportion d'arbres cicatrisés dans l'échantillon de chacun des lacs (Boucher et al. 2011). L'intervalle devient moins précis plus on s'éloigne dans le temps, alors que la taille de l'échantillon rapetisse. De plus, l'intervalle de confiance au lac Rodayer est le plus petit, alors que ce lac avait le plus gros échantillon (88 arbres et 149 cicatrices) en comparaison au lac Mirabelli (48 arbres et 72 cicatrices) et Miron (56 arbres et 79 cicatrices).

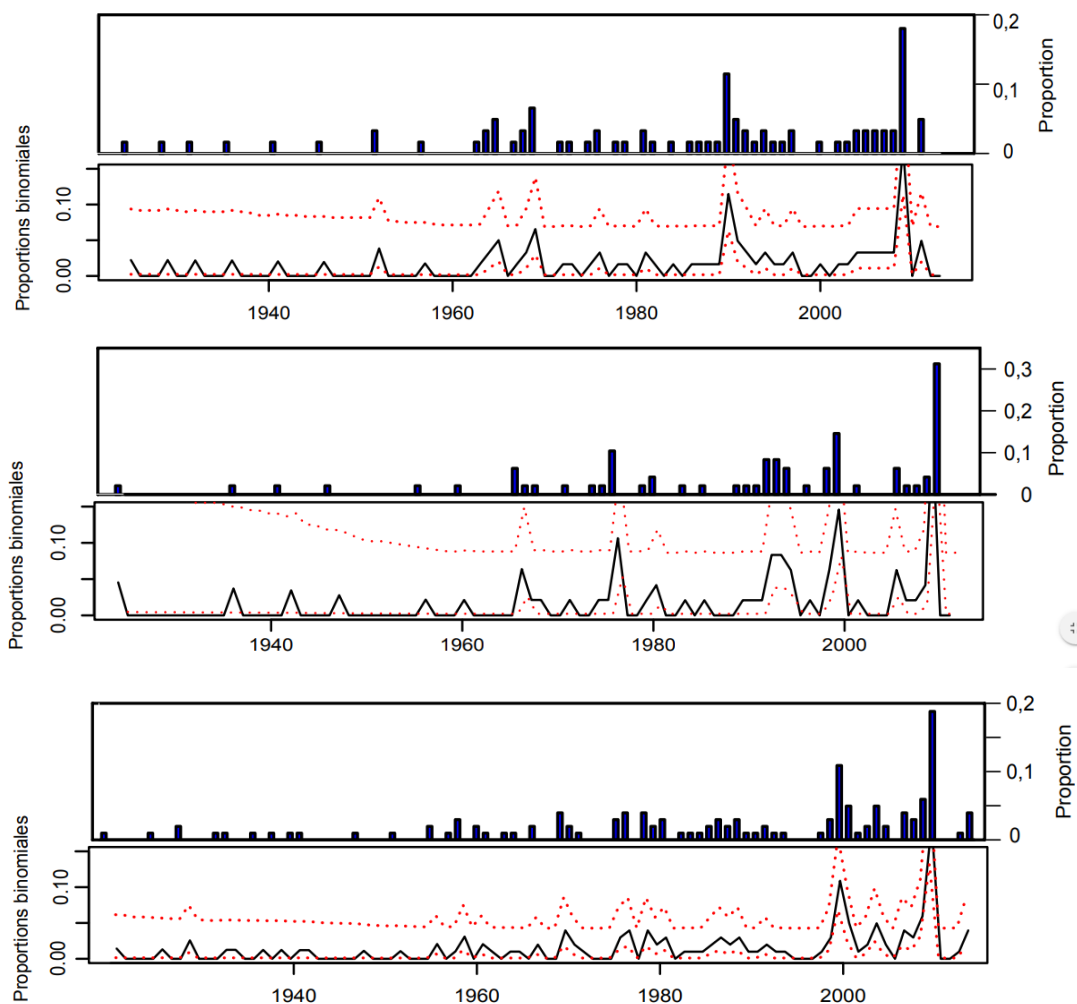


Figure 5-3: Chronologies de cicatrices glacielles à partir de la première cicatrice de chaque lac. Miron en haut, Mirabelli au milieu et Rodayer en bas. La partie supérieure (bleu) montre la proportion d'arbres de l'échantillon touchés par l'activité glacielle par année et la partie inférieure l'intervalle de confiance bilatérale de la proportion. Les lignes pointillées rouges montrent les limites inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance et la ligne noire la moyenne.

5.2. Chronologie des débuts de séquence de bois de réaction

La première année recensée chez un arbre de chaque chronologie remonte à 1816 au lac Miron, 1789 au lac Mirabelli et 1824 au lac Rodayer (Figure 5.4), alors qu'il n'y a pas eu de début de séquence de bois de réaction enregistré avant le début du XX^e siècle. À cet effet, les premiers événements enregistrés par les lacs remontent respectivement à 1931 au lac Miron, 1908 au lac Mirabelli et 1903 au lac Rodayer (Annexe 9.2).

Au lac Miron, bien que l'échantillon soit petit (seulement 26 arbres), au moins trois arbres ont simultanément basculé pour la première fois depuis leur établissement aux années 1976, 1986, 1999 et 2001. Au lac Mirabelli, au moins cinq arbres ont basculé aux années 1972, 1975, 1976, 1988, 1991, 1992 et 2001; les années majeures étant 1975 (10), 1976 (15) et 1988 (10). Enfin, au lac Rodayer, quatre arbres ont basculé une première fois aux années 1975, 1976, 1991 et 2001. Un minimum de deux arbres par lac ont enregistré un début de séquence de bois de réaction aux années suivantes : 1967, 1972, 1976 1977, 1986, 1992, 1999 et 2001. Les années 1976 (23 arbres) et 2001 (15 arbres) sont les plus marquantes. Par ailleurs, les chronologies des lacs Mirabelli et Rodayer révèlent de hautes fréquences d'arbres déstabilisés aux années 1975, 1976, 1991, 1992 et 2001. Ensemble, les trois lacs ont enregistré 74 années avec des début de séquence de bois de réaction causant des basculements d'arbres et donc un début de séquence de bois de réaction et 35 années sur au moins deux lacs. De plus, les chronologies montrent que les événements hydrodynamiques causant des basculements ont augmenté dans la deuxième moitié du XX^e siècle, alors que seulement 18 années ont enregistré des séquences de bois de réaction débutant avant 1950 et seulement une année sur au moins deux lacs. La fréquence d'années avec des débuts de séquence de bois de réaction (sur au moins deux lacs) est de 0,2 par décennie dans la première moitié du XX^e siècle et de 6,2 dans la deuxième moitié.

Les chronologies sont similaires selon les lacs (Corrélations de Spearman entre les trois lacs pour le nombre de débuts de séquence de bois de réaction, Tableau 5.2). La corrélation est assez forte pour la période 1824-2011 (au moins un arbre dans chaque chronologie) puisqu'il n'y a pas eu de début de séquence de bois de réaction avant 1903. Il y a toutefois quand même une corrélation entre les chronologies pour la période 1920-2011 et même celle de 1950-2010.

Tableau 5-2: Coefficients de corrélation de Spearman entre les chronologies de début de séquence de bois de réaction entre les trois lacs

	1824-2011	1903-2011	1950-2010
Miron-Mirabelli	0,441**	0,329**	0,310*
Miron-Rodayer	0,467**	0,398**	0,371**
Mirabelli-Rodayer	0,503**	0,427**	0,352**

p-values

** $p < 0,01$,

* $0,01 < p < 0,05$

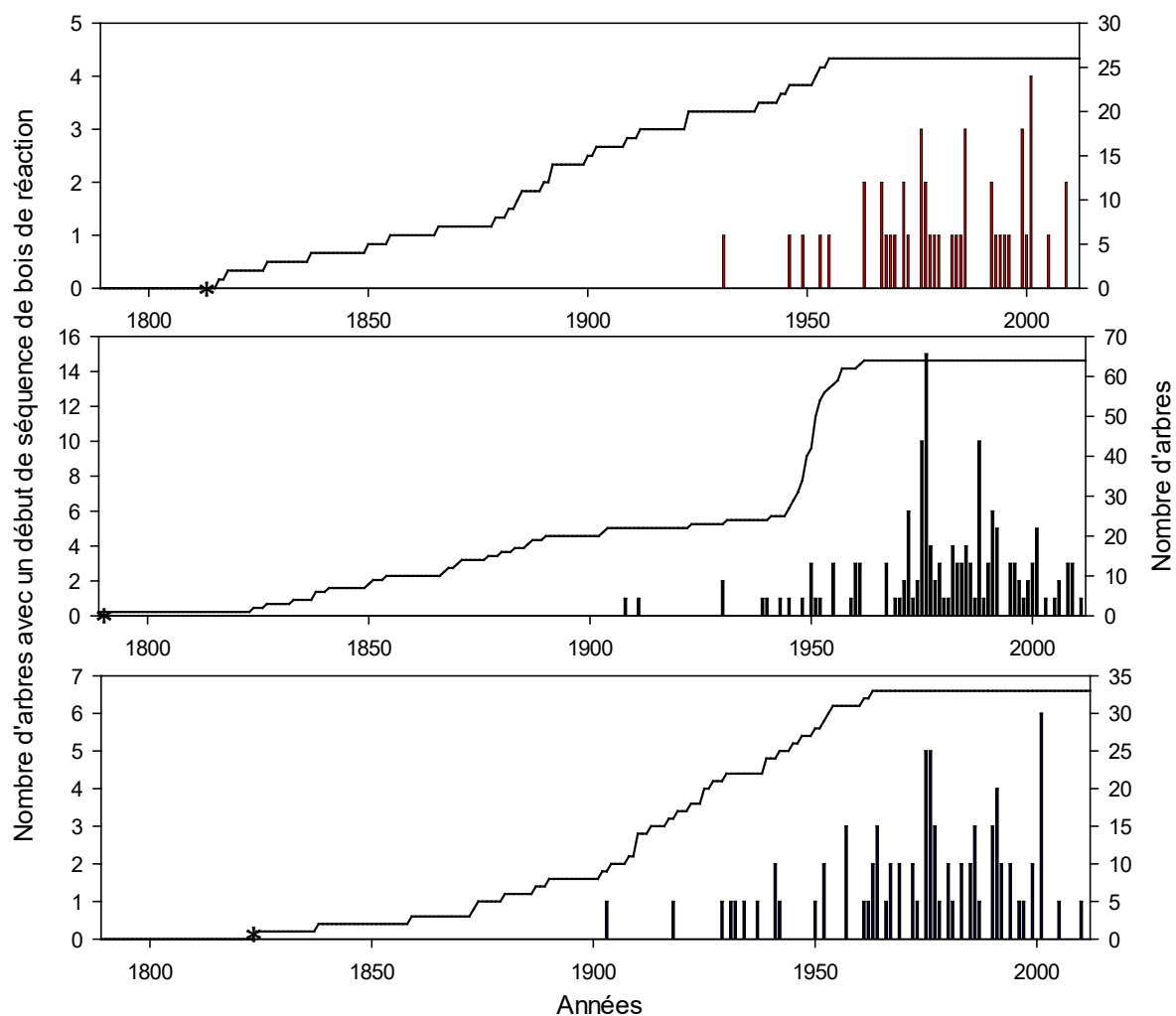


Figure 5-4: Chronologies complètes des débuts de séquences de bois de réaction pour les trois lacs à l'étude. Miron en rouge, Mirabelli en noir et Rodayer en bleu. *représente l'établissement du premier arbre de chaque chronologie. Miron: 1816, Mirabelli 1789, Rodayer 1824. Les courbes indiquent la fréquence cumulée des arbres selon leur année d'établissement.

5.2.1 Délai entre l'établissement des arbres et la chronologie des événements hydrodynamiques menant à leur déstabilisation

Pour chacun des trois lacs, le test de Kolmogorov-Smirnov entre le pourcentage cumulatif d'arbres établis et le pourcentage cumulatif de la fréquence de début de séquence de bois de réaction obtient une valeur de $p < 0,001$. On peut donc conclure que l'enregistrement des événements n'est pas influencé par la structure démographique des populations d'arbres riverains porteurs. (Figure 5.5).

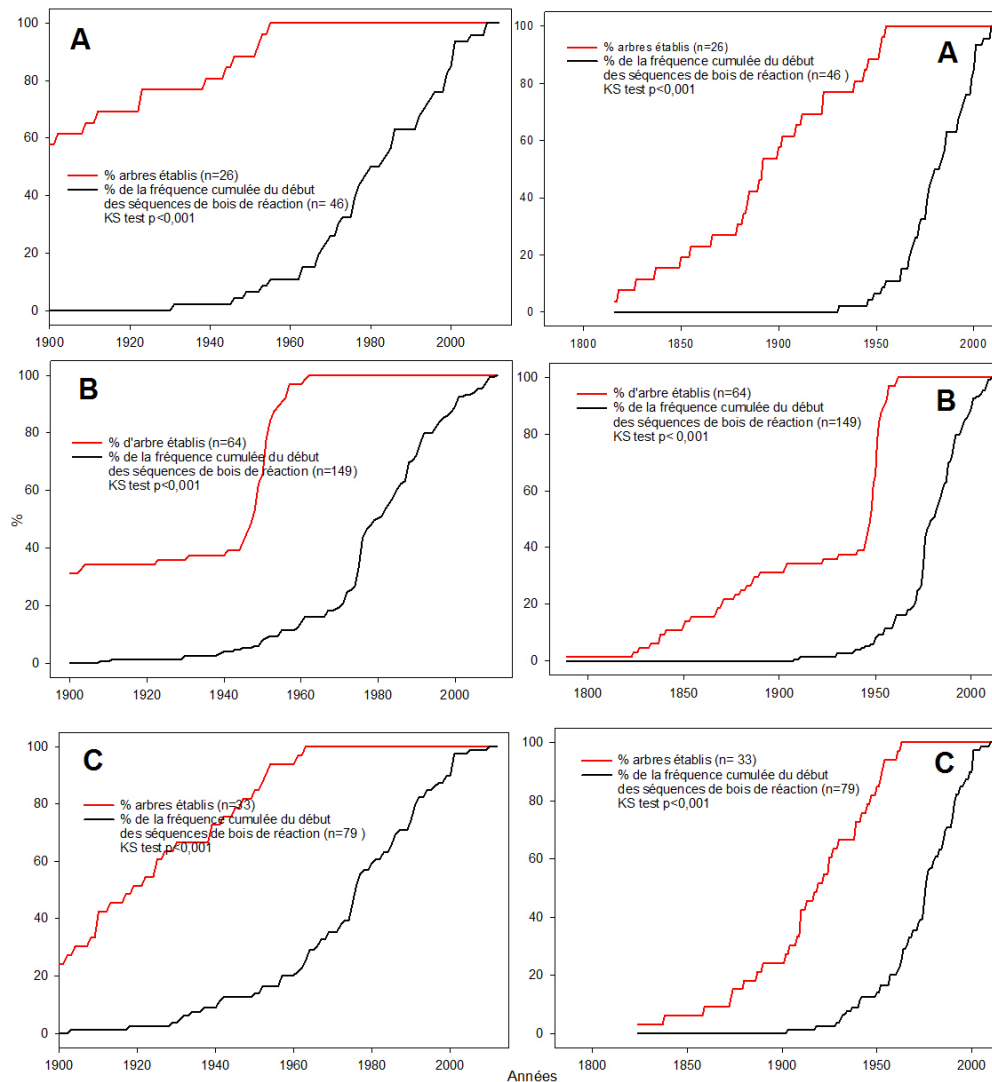


Figure 5-5: Comparaison des pourcentages cumulatifs d'arbres établis (ligne rouge) et de la fréquence des débuts de séquence de bois de réaction (ligne noire) aux lacs Miron (A), Mirabelli (B) et Rodayer (C). La colonne de gauche montre le 19^e siècle et la colonne de droite l'ensemble des chronologies

5.3. Comparaison des chronologies de cicatrices glacielles et de bois de réaction

Les populations d'arbres riverains du lac Miron ont enregistré trois années (1976, 1992 et 2009) où il a y eu au moins deux arbres cicatrisés et 2 débuts de séquence de bois de réaction. Au lac Mirabelli, c'est plutôt cinq années où il y a eu au moins 2 occurrences pour les deux indicateurs (1976, 1992, 1999, 2008 et 2009) et au lac Rodayer six (1969, 1965, 1965, 1986, 1991 et 1999). Dans la deuxième moitié du XX^e siècle, il y a eu 21 années où au moins deux lacs sur trois ont enregistré des événements par les deux indicateurs. Les années marquantes étant 1976 : occurrence sur les trois lacs des deux indicateurs (34 occurrences); 1990 : deux lacs ont enregistré des séquences de bois de réaction (pas Miron) et les trois des cicatrices glacielles (20 occurrences); 1999 : trois lacs ont enregistré des débuts de séquence de bois de réaction et deux lacs des cicatrices glacielles (pas Miron) (25 occurrences) et 2009 : deux lacs ont enregistré des débuts de séquence de bois de réaction (pas Rodayer) et les trois des cicatrices glacielles (51 occurrences).

Le tableau 5.3 montre les corrélations de Spearman entre les deux indicateurs pour les trois lacs. C'est le lac Mirabelli qui observe les meilleurs coefficients de corrélation pour les différentes périodes.

Tableau 5-3: Corrélation de Spearman entre les chronologies glacielles et de bois de réaction pour chaque lac pour différentes périodes

	1795-2011	1900-2011	1950-2010
Miron	0,370**	0,233*	-0,015
Mirabelli	0,461**	0,341**	0,180
Rodayer	0,362**	0,175	-0,033

p-values

** $p < 0,01$,

* $0,01 < p < 0,05$

5.4. Conditions hydroclimatiques

5.4.1 Hydrogrammes de crue

L'amplitude des crues glacielles nécessaire pour atteindre les différentes marges forestières riveraines dépend *a fortiori* des niveaux d'eau printaniers susceptibles de porter les glaces au contact des arbres (Lepage et Bégin 1996, Bégin 2000a). À cet effet, l'analyse des hydrogrammes de crue a été réalisée avec les chronologies d'abrasion glacielle des trois lacs. Les années ont été divisées en trois catégories : années de crues glacielles majeures, années avec présence d'activité glacielle et années sans activité glacielle (Tableau 5.4). Les données journalières provenant des apports harmonisés des bassins-versants Eastmain-1 et LG2-lac Sakami, du 1^{er} avril au 30 juin ont été utilisées pour construire les hydrogrammes sur 91 jours, soit pour la période allant de 1950 à 2010 inclusivement (61 ans). Au lac Miron deux années de crues glacielles majeures ont été recensées : 1990 et 2009, au lac Mirabelli trois : 1976, 1999 et 2009 et au lac Rodayer deux : 1999 et 2009. Les années 1976, 1999 et 2009 étaient aussi trois années apparaissant importantes au registre des arbres basculés par l'érosion hydrodynamique, tel que le révèlent les années de début de séquence de bois de réaction chez les arbres riverains. Les hydrogrammes d'Eastmain-1 et LG2-lac Sakami pour chacun des lacs (Figure 5.6) montrent que lors des années de crue glacielle majeure, les débits moyens sont plus élevés que lors des années où l'activité glacielle est modérée ou absente.

Tableau 5-4: Répartition des années des chronologies glacielles pour la réalisation des hydrogrammes de crue pour les trois lacs.

	Nombre d'années de crues glacielles majeures	Nombre d'années d'activité glacielle	Nombre d'années sans activité glacielle
Miron	2	32	29
Mirabelli	3	28	33
Rodayer	2	41	20

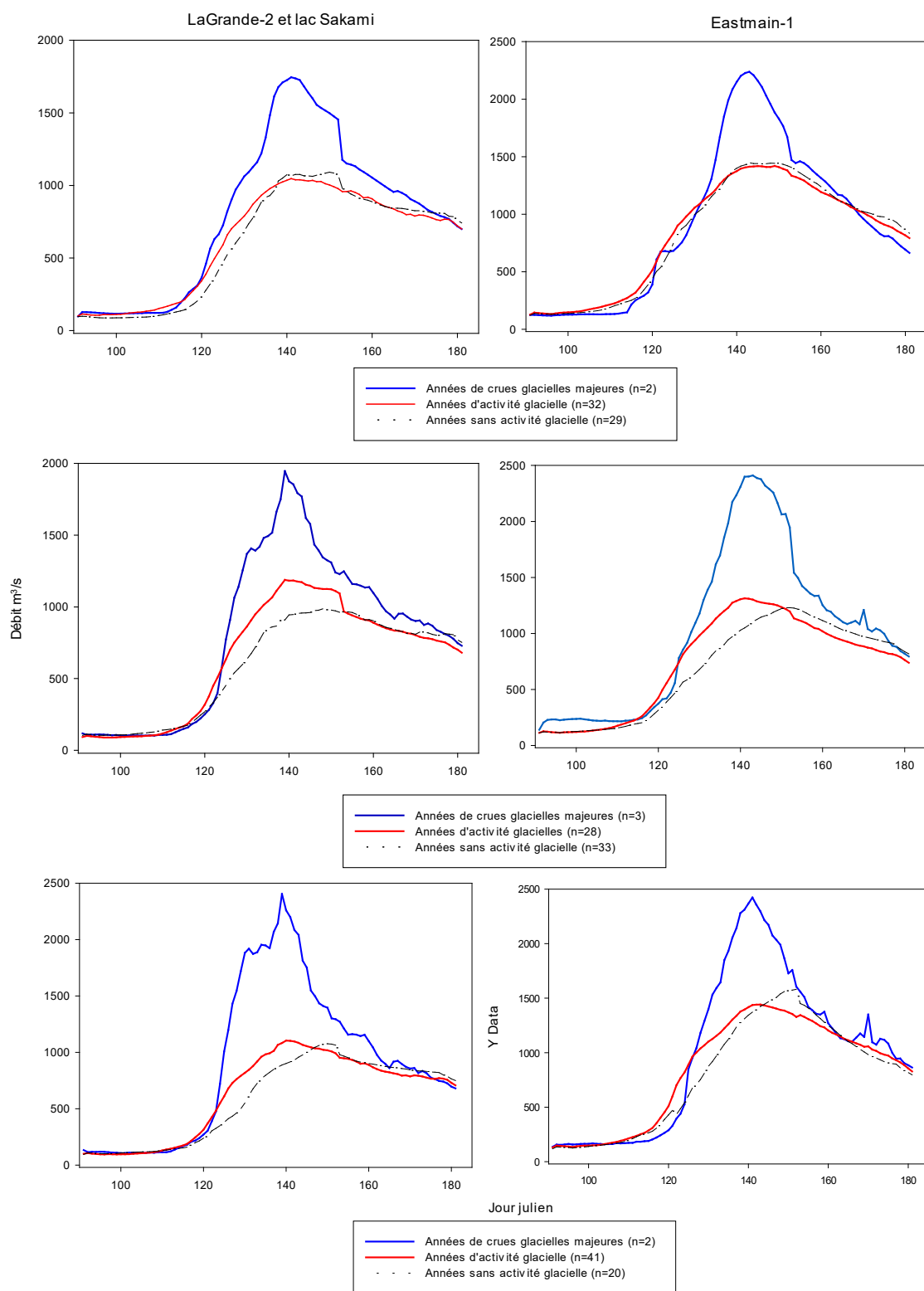


Figure 5-6: Hydrogrammes moyens des apports harmonisés du bassin-versant LG2 et lac Sakami pour la période 1950-2010. Miron en haut, Mirabelli au milieu et Rodayer en bas.

5.4.2 Analyse en composantes principales des variables hydrologiques

L'analyse en composantes principales (ACP) des variables hydrologiques montre que les deux bassins versants ont la même structure (Figure 5.7 et 5.8). Les deux premières composantes principales expliquent respectivement 70,5% de variance totale du jeu de données à LG2, 73,4% de la variance totale à Eastmain-1.

Plusieurs variables hydrologiques sont fortement corrélées entre elles, par exemple le débit maximal (pic) de la crue est fortement corrélé avec le débit de la montée de la crue, le débit de la crue et le débit de la décrue. À cet effet, il est possible de les diviser en deux groupes distincts : les variables d'intensité (7 variables) et les variables de durée (5 variables). Les variables d'intensité, principalement le débit maximal de la crue, le débit de la montée de la crue, le débit de la crue et de la décrue sont regroupées le long de l'axe PC1 (Dim1) et donc, positivement corrélées entre elles. Ces variables d'intensité décrivent la «quantité» d'eau transigeant par les centrales hydroélectriques lors de la crue. Les variables d'intensité expliquent respectivement 47,2% de la variance pour LG2 et 47,9% pour Eastmain-1. Les variables de durée, par ailleurs, expliquent 23,3% de la variance pour LG2 et 25,5% pour Eastmain-1 et sont regroupées autour de l'axe PC2 (Dim2). Cette seconde composante est plutôt associée aux aspects chronologiques (ou timing) de la crue. Les deux axes sont orthogonaux et donc non corrélés entre eux.

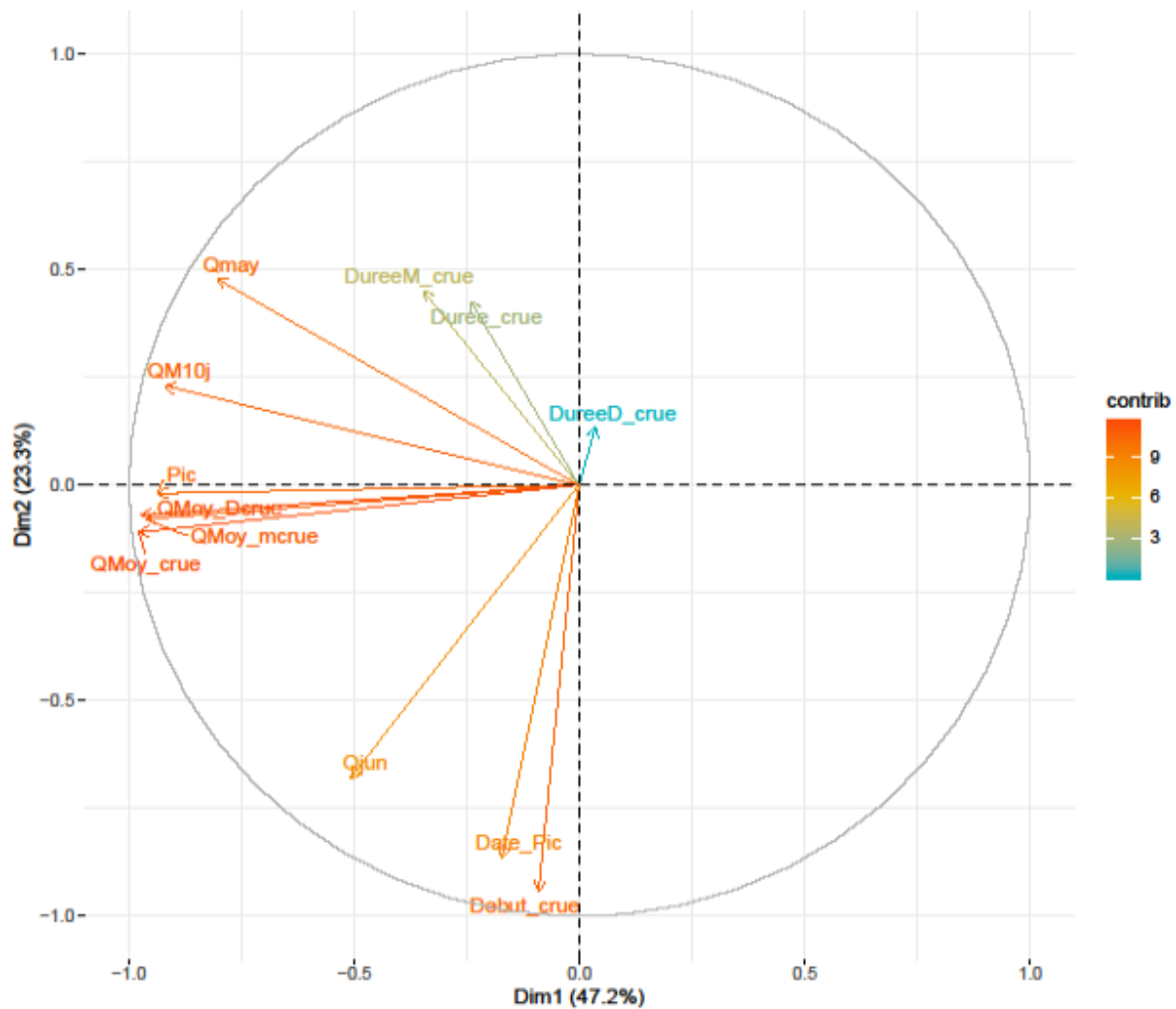


Figure 5-7: Cercle de corrélation de l'analyse en composantes principales des variables hydrologiques provenant des apports harmonisés du bassin versant LaGrande-2 et lac Sakami. Variables d'intensité (7) : débit moyen du mois de mai (Qmay), débit moyen du mois de juin (Qjun), débit moyen du 1^{er} mai au 10 juin (QM10j), débit maximal de la crue (Pic), débit moyen de la crue (Qmoy_crue), débit moyen de la montée de la crue (Qmoy_mcrue), débit moyen de la décrue (Qmoy_Dcrue) et variables de durée (5) : durée de la crue (Duree_crue), durée de la montée de la crue (DureeM_crue), durée de la décrue (DureeD_crue), jour julien du débit maximal de la crue (Date_Pic) et jour julien du début de la crue (Debut_crue)

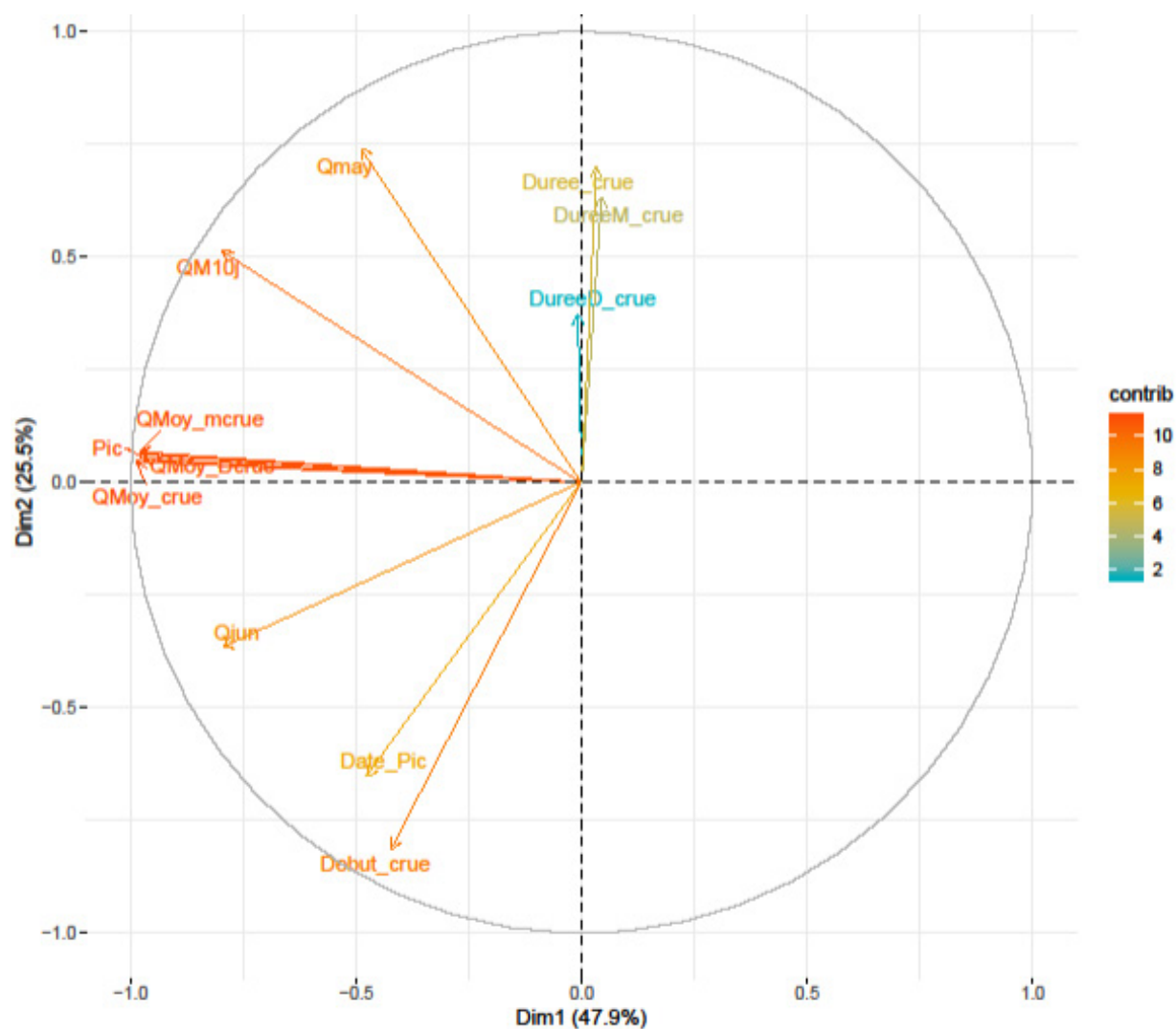


Figure 5-8: Cercle de corrélation de l'analyse en composantes principales des variables hydrologiques provenant des apports harmonisés du bassin Eastmain-1. Variables d'intensité (7) : débit moyen du mois de mai (Qmay), débit moyen du mois de juin (Qjun), débit moyen du 1^{er} mai au 10 juin (QM10j), débit maximal de la crue (Pic), débit moyen de la crue (Qmoy_crue), débit moyen de la montée de la crue (Qmoy_mcrue), débit moyen de la décrue (Qmoy_Dcrue) et variables de durée (5) : durée de la crue (Duree_crue), durée de la montée de la crue (DureeM_crue), durée de la décrue (DureeD_crue), jour julien du débit maximal de la crue (Date_Pic) et jour julien du début de la crue (Debut_crue)

5.4.3 Corrélation des chronologies d'abrasion glacielle des trois lacs avec les variables PC découlant de l'ACP des variables hydrologiques

À l'opposé, les chronologies du lac Rodayer sont très fortement corrélées avec la PC1, représentant les variables d'intensité, pour les bassins versants LG2 et lac Sakami et Eastmain-1, mais pas du tout avec la PC2 représentant les variables de durée. Également, la chronologie du lac Mirabelli montre la même réponse que Rodayer pour les variables PC-LG2 et lac Sakami (forte corrélation avec la variable PC1 et pas de corrélation avec la variable PC2). Cependant, ce n'est pas le cas pour Eastmain-1, alors que la corrélation est étrangement plus forte avec la variable PC2. Les chronologies d'abrasion glacielle du lac Miron ne sont pas significativement corrélées avec les variables PC1 et PC2 découlant de l'ACP des variables hydrologiques (Tableau 5.5).

Table 5-5: Coefficients de corrélation de Spearman entre le nombre de cicatrices et la hauteur moyenne des cicatrices avec les variables PC1 et PC2 transformées des variables hydrologiques provenant des apports harmonisés des bassins versants LaGrande-2 et lac Sakami et Eastmain-1 pour les lacs Miron, Mirabelli et Rodayer

	LG2 et lac Sakami		Eastmain-1	
Composantes principales	PC1 (Intensité)	PC2 (Durée)	PC1 (Intensité)	PC2 (Durée)
Miron				
<i>Nombre de cicatrices</i>	-0,059	0,196	-0,043	0,207
<i>Hauteur des cicatrices</i>	0,088	0,050	-0,022	0,143
Mirabelli				
<i>Nombre de cicatrices</i>	-0,401***	0,084	-0,252*	0,289**
<i>Hauteur des cicatrices</i>	-0,405***	0,090	-0,181	0,276**
Rodayer				
<i>Nombre de cicatrices</i>	-0,388***	0,055	-0,478***	0,094
<i>Hauteur des cicatrices</i>	-0,248*	-0,089	-0,452***	-0,003

p-values

***= $p < 0,01$

**= $0,01 < p < 0,05$

*= $0,05 < p < 0,1$

5.4.4 Corrélation des chronologies d'abrasion glacielle avec les variables hydrologiques

Lac Rodayer

La chronologie d'abrasion glacielle du lac Rodayer est bien corrélée à plusieurs variables hydrologiques d'intensité des deux bassins-versants d'où proviennent les apports harmonisés (Tableau 5.6) : débit du mois de mai, débit du 1^{er} mai au 10 juin, débit maximal de la crue, débit moyen de la crue, débit moyen de la crue et de la décrue, mais pas aux variables de durée. Les coefficients de corrélation sont légèrement plus élevés avec les apports harmonisés d'Eastmain-1, ce qui est normal vu la proximité du lac Rodayer avec ce bassin versant. De plus, alors que les coefficients de corrélation sont significatifs en croisant le nombre de cicatrices et leur hauteur, ils sont un peu plus élevés avec le nombre de cicatrices.

Tableau 5-6: Coefficients de corrélation de Spearman entre le nombre de cicatrices et la hauteur moyenne des cicatrices avec les variables hydrologiques des apports harmonisés des bassins-versants LaGrande 2 et lac Sakami et Eastmain-1 pour le lac Rodayer

Variables hydrologiques	LaGrande-2 et lac Sakami		Eastmain-1	
	Nombre de cicatrices	Hauteur des cicatrices	Nombre de cicatrices	Hauteur des cicatrices
<i>Variables d'intensité</i>				
Débit total du 1 ^{er} mai au 31 mai (m ³ s)	0,355**	0,172	0,370***	0,249*
Débit total du 1 ^{er} juin au 30 juin (m ³ s)	0,153	0,177	0,218	0,258*
Débit total du 1 ^{er} mai au 10 juin (m ³ s)	0,355**	0,173	0,423***	0,346**
Débit maximal de la crue (m ³ s)	0,424***	0,295**	0,497***	0,474***
Débit moyen de la crue (moyenne/jour)	0,411***	0,305**	0,525***	0,495***
Débit moyen de la montée de la crue (m ³ s)	0,409***	0,296**	0,533***	0,511***
Débit moyen de la décrue (m ³ s)	0,404***	0,264**	0,496***	0,448***
<i>Variables de durée</i>				
Jour julien du débit maximal de la crue	-0,040	0,055	-0,022	0,065
Jour julien du début de la crue	-0,017	0,108	0,019	0,082
Durée de la crue	0,035	-0,053	-0,134	-0,110
Durée de la montée de la crue	0,009	-0,092	-0,091	-0,076
Durée de la décrue	0,070	0,108	-0,098	-0,078

p-values ***= $p < 0,01$, **= $0,01 < p < 0,05$, *= $0,05 < p < 0,1$

Lac Mirabelli

La chronologie d'abrasion glacielle du lac Mirabelli est bien corrélée à plusieurs variables hydrologiques d'intensité des deux bassins-versants (Tableau 5.7) : débit du mois de mai, débit du 1^{er} mai au 10 juin, débit maximal de la crue, débit moyen de la crue, débit moyen de la montée et de la décrue. Il s'agit des mêmes six variables que pour le lac Rodayer. La chronologie du lac Mirabelli n'est pas bien corrélée à aucune des variables hydrologique de durée. Bien que la chronologie du lac Mirabelli soit bien corrélée aux apports harmonisés d'Eastmain-1 et de LG2 et lac Sakami, il semble que les coefficients de corrélation soient un peu plus élevés avec LG2 et lac Sakami. Le lac Mirabelli étant situé environ à mi-chemin des deux bassins-versants.

Tableau 5-7: Coefficients de corrélation de Spearman entre le nombre de cicatrices et la hauteur moyenne des cicatrices avec les variables hydrologiques des apports harmonisés des bassins versants LaGrande 2 et lac Sakami et Eastmain-1 pour le lac Mirabelli

Variables hydrologiques	LaGrande-2 et lac Sakami		Eastmain-1	
	Nombre de cicatrices	Hauteur des cicatrices	Nombre de cicatrices	Hauteur des cicatrices
<i>Variables d'intensité</i>				
Débit total du 1 ^{er} mai au 31 mai (m³s)	0,400***	0,405***	0,397***	0,351**
Débit total du 1 ^{er} juin au 30 juin (m³s)	0,130	0,095	0,118	0,104
Débit total du 1 ^{er} mai au 10 juin (m³s)	0,417***	0,414***	0,427***	0,372***
Débit maximal de la crue (m³s)	0,335**	0,320**	0,245*	0,176
Débit moyen de la crue (moyenne/jour)	0,377***	0,366***	0,255*	0,181
Débit moyen de la montée de la crue (m³s)	0,354**	0,348**	0,318**	0,247*
Débit moyen de la décrue (m³s)	0,373***	0,371***	0,164	0,239*
<i>Variables de durée</i>				
Jour julien du débit maximal de la crue	-0,049	-0,057	-0,092	-0,094
Jour julien du début de la crue	-0,095	-0,094	-0,091	-0,103
Durée de la crue	0,049	0,057	0,136	0,157
Durée de la montée de la crue	0,091	0,076	0,176	0,159
Durée de la décrue	-0,024	0,008	0,040	0,100

p-values

***= $p < 0,01$

**= $0,01 < p < 0,05$

*= $0,05 < p < 0,1$

Lac Miron

La chronologie d'abrasion glacielle du lac Miron n'est pas bien corrélée aux variables hydrologiques (intensité et durée) des apports harmonisés des bassins versants LaGrande-2 et lac Sakami et Eastmain-1 (Tableau 5.8). Seule la durée de la crue pour un seul bassin-versant (LG2-lac Sakami) est reliée significativement au nombre de cicatrices.

Tableau 5-8: Coefficients de corrélation de Spearman entre le nombre de cicatrices et la hauteur moyenne des cicatrices avec les variables hydrologiques provenant des apports harmonisés des bassins versants LaGrande-2 et lac Sakami et Eastmain-1 pour le lac Miron

Variables hydrologiques	LaGrande-2 et lac Sakami		Eastmain-1	
	Nombre de cicatrices	Hauteur des cicatrices	Nombre de cicatrices	Hauteur des cicatrices
<i>Variables d'intensité</i>				
Débit total du 1 ^{er} mai au 31 mai (m³s)	0,168	0,030	0,187	0,092
Débit total du 1 ^{er} juin au 30 juin (m³s)	-0,008	-0,028	-0,075	-0,005
Débit total du 1 ^{er} mai au 10 juin (m³s)	0,169	0,063	0,104	0,087
Débit maximal de la crue (m³s)	-0,004	-0,115	0,047	-0,017
Débit moyen de la crue (moyenne/jour)	0,042	-0,075	0,047	0,006
Débit moyen de la montée de la crue (m³s)	0,026	-0,064	0,129	0,094
Débit moyen de la décrue (m³s)	0,078	-0,059	0,078	0,059
<i>Variables de durée</i>				
Jour julien du débit maximal de la crue	-0,096	-0,058	-0,082	-0,013
Jour julien du début de la crue	-0,138	0,038	-0,068	-0,025
Durée de la crue	0,229*	-0,081	0,048	0,012
Durée de la montée de la crue	0,174	-0,068	0,135	0,185
Durée de la décrue	0,107	-0,068	0,079	0,058

p-values

*= $0,05 < p < 0,1$

5.4.5. Corrélation des chronologies glacielles aux variables climatiques

Lac Rodayer

La chronologie d'abrasion glacielle du lac Rodayer n'est pas bien corrélée avec les températures ou encore les précipitations (Tableau 5.9). Les coefficients de corrélation sont faibles et seulement le total des précipitations mensuelles sous forme de pluie au mois d'août, le total des précipitations mensuelles combinées (pluie et neige) au mois d'août, de même que la moyenne mensuelle de la température minimale pour la période de allant de juin à août inclusivement sont significatifs.

Tableau 5-9: Coefficients de corrélation de Spearman entre le nombre de cicatrices glacielles et la hauteur moyenne des cicatrices glacielles avec les variables climatiques pour le lac Rodayer

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Moyenne mensuelle de la température maximale									
Nombre de cicatrices	-0,167	0,144	0,085	-0,020	0,072	-0,092	0,138	0,162	-0,076
Hauteur des cicatrices	-0,173	0,162	0,066	-0,003	0,097	-0,083	0,093	0,135	-0,217
Moyenne mensuelle de la température minimale									
Nombre de cicatrices	0,080	0,086	-0,054	-0,082	0,074	-0,148	0,154	0,144	-0,051
Hauteur des cicatrices	-0,041	0,158	-0,054	-0,066	0,103	-0,119	0,167	0,185	-0,205
Total mensuel des précipitations (pluie)									
Nombre de cicatrices	-0,084	-0,078	-0,139	-0,040	0,236	0,178	0,115	-0,335**	-0,066
Hauteur des cicatrices	-0,097	-0,102	-0,176	-0,050	0,196	0,124	0,010	-0,285*	-0,103
Total mensuel des précipitations (neige)									
Nombre de cicatrices	-0,141	0,146	0,196	-0,035	-0,065	0,148	---	-0,138	-0,095
Hauteur des cicatrices	-0,249	0,168	0,179	-0,046	-0,125	0,078	---	-0,137	0,087
Total mensuel des précipitations totales (pluie et neige)									
Nombre de cicatrices	-0,147	0,106	0,197	-0,102	0,221	0,180	0,115	-0,335**	-0,063
Hauteur des cicatrices	-0,254	0,122	0,157	-0,111	0,172	0,126	0,010	-0,285*	-0,086
	M10	M11	M12	DJF	MAM	JJA	SON	SONDJFM	
Moyenne mensuelle de la température maximale									
Nombre de cicatrices	-0,066	0,105	0,025	-0,004	0,049	0,186	0,026	-0,029	
Hauteur des cicatrices	-0,071	0,149	-0,028	-0,003	0,056	0,135	-0,027	-0,064	
Moyenne mensuelle de la température minimale									
Nombre de cicatrices	-0,070	0,151	-0,011	-0,012	-0,037	0,269*	0,059	-0,039	
Hauteur des cicatrices	-0,125	0,224	-0,092	0,014	-0,031	0,267*	-0,006	-0,031	
Total mensuel des précipitations (pluie)									
Nombre de cicatrices	0,053	0,124	-0,018	-0,208	0,167	-0,002	0,099	-0,062	
Hauteur des cicatrices	-0,066	0,103	-0,038	-0,222	0,128	-0,023	-0,006	-0,071	
Total mensuel des précipitations (neige)									
Nombre de cicatrices	0,005	0,031	0,046	0,134	0,097	-0,078	-0,024	0,133	
Hauteur des cicatrices	0,046	0,000	0,100	0,157	0,074	-0,136	-0,026	0,159	
Total mensuel des précipitations totales (pluie et neige)									
Nombre de cicatrices	-0,002	0,039	0,031	-0,023	0,223	-0,002	0,000	0,001	
Hauteur des cicatrices	-0,075	0,008	0,091	-0,021	0,152	-0,023	-0,085	-0,099	

p-values

******=0,01 < p < 0,05

*****= 0,05 < p < 0,1

Lac Mirabelli

Au lac Mirabelli, la chronologie d'abrasion glacielle est bien corrélée aux moyennes mensuelles de températures minimale et maximale pour le mois de juin avec des valeurs de $p < 0,01$ pour le nombre de cicatrices et la hauteur des cicatrices (Tableau 5.10). Le mois de juin correspondant à la fin de la période de crue printanière.

Les coefficients de corrélation de Spearman sont aussi significatifs entre la chronologie et les températures (minimales et maximales) et les précipitations (pluie, neige et combinées) pour le mois de septembre. Également, ils sont significatifs pour la moyenne mensuelle de température maximale et le total mensuel des précipitations sous forme de pluie, sous forme de neige et combinées (pluie et neige) pour la période couvrant les mois de septembre à novembre inclusivement (SON). Aussi, ils sont significatifs pour le total mensuel des précipitations sous forme de neige et combinées pour la période couvrant les mois de septembre à mars inclusivement (SONDJFM). Ces corrélations sont intéressantes puisque selon Environnement Canada (2014), c'est pendant les mois d'août et de septembre que les précipitations liquides sont les plus abondantes de l'année et que les chutes de neige culminent pendant les mois de novembre et décembre dans la région à l'étude. Les précipitations automnales et hivernales correspondent à une grosse partie du volume d'eau libéré pendant les crues printanières causant les cicatrices d'abrasion glacielle sur les arbres riverains.

Enfin, le total mensuel des précipitations sous forme de pluie et le total mensuel des précipitations combinées (pluie et neige) pour la période couvrant les mois de mars à mai inclusivement (MAM) sont significativement corrélés à la chronologie d'abrasion glacielle du lac Mirabelli, ce qui correspond à la période où ont lieu les crues printanières.

Tableau 5-10: Coefficients de corrélation de Spearman entre le nombre de cicatrices glacielles et la hauteur moyenne des cicatrices glacielles avec les variables climatiques pour le lac Mirabelli

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Moyenne mensuelle de la température maximale									
Nombre de cicatrices	0,066	-0,011	-0,012	0,007	0,048	0,448***	0,228	0,114	-0,312**
Hauteur des cicatrices	0,084	-0,050	0,026	-0,023	0,075	0,380***	0,270*	0,106	-0,341**
Moyenne mensuelle de la température minimale									
Nombre de cicatrices	-0,005	-0,046	0,028	0,010	0,131	0,530***	0,064	0,021	-0,242
Hauteur des cicatrices	-0,021	-0,058	0,036	0,048	0,130	0,463***	0,049	0,025	-0,255*
Total mensuel des précipitations (pluie)									
Nombre de cicatrices	0,094	-0,008	0,242	0,162	-0,108	-0,065	0,221	-0,018	0,208
Hauteur des cicatrices	0,055	-0,133	0,294*	0,179	-0,095	-0,032	0,207	0,023	0,251*
Total mensuel des précipitations (neige)									
Nombre de cicatrices	0,201	0,237	-0,001	0,198	0,067	0,032	0,224	0,188	0,314**
Hauteur des cicatrices	0,163	0,219	0,026	0,165	0,060	0,100	0,136	0,213	0,412***
Total mensuel des précipitations totales (pluie et neige)									
Nombre de cicatrices	0,088	-0,062	0,192	0,138	0,048	0,017	0,223	0,188	0,325**
Hauteur des cicatrices	0,050	-0,095	0,223	0,127	0,036	-0,035	0,133	0,213	0,430***
	M10	M11	M12	DJF	MAM	JJA	SON	SONDJFM	
Moyenne mensuelle de la température maximale									
Nombre de cicatrices	-0,088	-0,209	-0,136	-0,040	-0,031	0,190	-0,300**	-0,182	
Hauteur des cicatrices	-0,169	-0,196	-0,158	-0,069	-0,012	0,170	-0,360**	-0,217	
Moyenne mensuelle de la température minimale									
Nombre de cicatrices	-0,004	-0,129	-0,222	-0,220	0,103	0,126	-0,216	-0,219	
Hauteur des cicatrices	-0,080	-0,100	-0,237	-0,226	0,070	0,087	-0,238	-0,243	
Total mensuel des précipitations (pluie)									
Nombre de cicatrices	0,033	0,206	-0,011	-0,074	0,209	-0,190	0,220	-0,019	
Hauteur des cicatrices	0,142	0,225*	0,051	-0,106	0,264*	-0,223	0,294**	-0,014	
Total mensuel des précipitations (neige)									
Nombre de cicatrices	0,065	-0,165	-0,063	0,109	0,156	0,222	0,201	0,319**	
Hauteur des cicatrices	0,077	-0,193	-0,061	0,099	0,115	0,202	0,275*	0,376**	
Total mensuel des précipitations totales (pluie et neige)									
Nombre de cicatrices	0,047	0,107	-0,040	-0,020	0,265*	0,225	0,210	0,284*	
Hauteur des cicatrices	0,127	0,021	0,021	-0,020	0,260*	0,203	0,305**	0,357**	

p-values

***= $p < 0,01$

**= $0,01 < p < 0,05$

*= $0,05 < p < 0,1$

Lac Miron

La chronologie d'abrasion glacielle du lac Miron est bien corrélée aux moyennes mensuelles des températures minimales et maximales pour la période couvrant les mois de mars à mai inclusivement (MAM). De plus, les coefficients de corrélation sont significatifs pour les moyennes mensuelles de températures minimales et maximales du mois de mars et pour les moyennes mensuelles des températures de la période couvrant les mois de juin à août inclusivement (JJA) (Tableau 5.11). Pour les températures, les coefficients de corrélation sont plus élevés avec la hauteur des cicatrices qu'avec le nombre de cicatrices.

Pour ce qui est des précipitations, les coefficients de corrélation ne sont pas significatifs pour le total des valeurs mensuelles en pluie, en neige et combinées.

Tableau 5-11: Coefficients de corrélation de Spearman entre le nombre de cicatrices glacielles et la hauteur moyenne des cicatrices glacielles avec les variables climatiques pour le lac Miron

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Moyenne mensuelle de la température maximale									
Nombre de cicatrices	-0,047	-0,061	-0,234	0,021	-0,146	0,015	0,142	-0,083	0,045
Hauteur des cicatrices	-0,069	-0,118	-0,305**	-0,135	-0,239	0,087	0,101	0,098	-0,005
Moyenne mensuelle de la température minimale									
Nombre de cicatrices	-0,046	-0,026	-0,312**	-0,061	-0,092	0,103	0,185	-0,023	-0,021
Hauteur des cicatrices	-0,067	-0,092	-0,372**	-0,176	-0,192	0,210	0,217	0,090	-0,072
Total mensuel des précipitations (pluie)									
Nombre de cicatrices	0,100	-0,050	-0,107	0,183	0,104	0,127	-0,029	0,150	-0,188
Hauteur des cicatrices	0,094	-0,088	-0,155	0,180	0,083	0,176	-0,092	0,080	-0,168
Total mensuel des précipitations (neige)									
Nombre de cicatrices	-0,005	-0,090	-0,031	-0,078	0,133	-0,319**	-0,155	0,272*	-0,086
Hauteur des cicatrices	0,037	-0,134	0,061	0,047	0,122	-0,283*	-0,152	0,158	-0,083
Total mensuel des précipitations totales (pluie et neige)									
Nombre de cicatrices	0,015	-0,117	-0,089	0,073	0,121	0,121	-0,029	0,150	-0,205
Hauteur des cicatrices	0,058	-0,160	-0,032	0,110	0,095	0,169	-0,092	0,080	-0,184
	M10	M11	M12	DJF	MAM	JJA	SON	SONDJFM	
Moyenne mensuelle de la température maximale									
Nombre de cicatrices	0,114	-0,070	-0,050	-0,086	-0,231	0,089	0,061	-0,081	
Hauteur des cicatrices	0,209	0,024	0,040	-0,075	-0,358**	0,281*	0,131	-0,114	
Moyenne mensuelle de la température minimale									
Nombre de cicatrices	0,122	-0,131	-0,041	-0,103	-0,283**	0,140	-0,042	-0,189	
Hauteur des cicatrices	0,237	-0,009	0,041	-0,050	-0,418***	0,259*	0,045	-0,192	
Total mensuel des précipitations (pluie)									
Nombre de cicatrices	0,172	-0,117	-0,157	-0,085	0,120	0,111	0,015	-0,104	
Hauteur des cicatrices	0,139	-0,069	-0,100	-0,118	0,072	-0,071	0,019	-0,130	
Total mensuel des précipitations (neige)									
Nombre de cicatrices	-0,009	0,123	0,184	-0,048	-0,023	-0,059	0,040	-0,037	
Hauteur des cicatrices	-0,177	0,052	0,106	-0,099	0,090	-0,043	-0,035	-0,100	
Total mensuel des précipitations totales (pluie et neige)									
Nombre de cicatrices	0,127	0,051	0,179	0,079	0,054	0,116	-0,008	-0,011	
Hauteur des cicatrices	0,034	0,060	0,093	0,028	0,122	-0,065	-0,045	-0,014	

p-values

***= $p < 0,01$

**= $0,01 < p < 0,05$

*= $0,05 < p < 0,1$

5.4.6. Corrélation entre les chronologies d'abrasion glacielle et les valeurs de degrés-jours de gel (DJG) pour les trois lacs.

Les coefficients de corrélation de Spearman entre la chronologie d'abrasion glacielle du lac Miron et celle des degrés-jour de gel pour la période couvrant les mois de janvier à avril inclusivement (JFMA) et d'octobre à avril inclusivement (ONDJFMA) sont significatifs (tableau 5.12). La chronologie d'abrasion glacielle du lac Miron était aussi bien corrélée aux températures mensuelles minimales et maximales printanières. Il n'y a pas de corrélation significative pour les lacs Mirabelli et Rodayer.

Tableau 5-12: Coefficients de corrélation de Spearman entre les chronologies d'abrasion glacielle des trois lacs à l'étude et la variable climatique degré jour de gel (DJG) pour trois différentes périodes de l'année

	OND	JFMA	ONDJFMA
Lac Miron			
Nombre de cicatrices	0,002	-0,329**	-0,294*
Hauteur des cicatrices	0,155	-0,332**	-0,238
Lac Mirabelli			
Nombre de cicatrices	-0,069	-0,100	-0,115
Hauteur des cicatrices	-0,083	-0,132	-0,157
Lac Rodayer			
Nombre de cicatrices	0,035	0,038	0,043
Hauteur des cicatrices	0,054	0,039	0,074

p-values

**=0,01 < p < 0,05

*= 0,05 < p < 0,1

5.5. Fréquence de perturbation des écosystèmes riverains

Les dessins à l'échelle pour chaque type de rivage (affleurement rocheux, plage, cordon de blocs, platière et talus organique en érosion), de même que les inventaires de la composition floristique entre le lac et la zone arborée qui y sont associés se retrouvent en annexes (9.6 à 9.17).

5.5.1 Influence des attributs physiques et géomorphologiques des rivages sur l'activité glacielle

Les statistiques représentant l'influence des caractéristiques des rivages sur l'activité glacielle se retrouvent dans le tableau 5.13, alors que les statistiques et la cartographie de la segmentation des rives en unités géomorphologiques homogènes (type de substrat, orientation, pente supra-riveraine, pente infra-riveraine et fetch total), sont en annexe (Rodayer 9.3, Mirabelli 9.4 et Miron 9.5). Les cartes sont également en annexes (9.18 à 9.35).

Une grande proportion du nombre de cicatrices d'abrasion glacielle affectent des arbres situés sur les rives caractérisées par des plages ou cordons de blocs (64% Miron, 75% Mirabelli et 81% Rodayer). Aussi, les cicatrices sont les plus abondantes sur les rives exposées à l'ouest, au sud-ouest et au nord-ouest (Rodayer 54,5%, Mirabelli 72,9% et Miron : 41,1%). Les vents dominants de la région sont d'ouest tout au long de l'année à l'exception des mois d'octobre à novembre. Les vents extrêmes sont du sud-ouest, au printemps (Environnement Canada 2014), durant les mois où l'activité glacielle est possible en bordure des lacs. Toutefois, aux lacs Miron et Rodayer, plus de 50% de cicatrices se trouvent sur des rives exposées à d'autres directions. Également, au lac Mirabelli, en raison des feux, l'échantillonnage a été restreint par le faible nombre d'arbres ayant survécu aux feux récents sur certaines rives.

Les cicatrices d'abrasion glacielle sont plus abondantes sur les rivages aux pentes supra-riveraines et infra-riveraines faibles, moyennes-faibles et moyennes. Au lac Rodayer, ces trois catégories représentent respectivement 85,2% des cicatrices trouvées pour les pentes supra-riveraines (S) et 90,1% pour les pentes infra-riveraines (I). Au lac Mirabelli : 77,1 % (S) et 91,7% (I) et au lac Miron 83,9% (S) et 80,4% (I).

En ce qui a trait à l'influence du fetch total, il semblerait que les segments de rives où il y a plus de cicatrices d'abrasion glacielle soient aussi les segments de rives où la longueur du fetch est plus importante. Au lac Rodayer, 96,59% des cicatrices d'abrasion glacielle se trouvaient sur les rives où le fetch total était supérieur à 24 000 mètres et au lac Mirabelli 91,67%. Le lac Rodayer a une superficie de 21,9 km² et un périmètre de 31,5 km² et le lac Mirabelli a une superficie de 11,0 km² et un périmètre de 19,1 km². Le lac Miron est plus petit (superficie 5,96 km²) et sa forme moins arrondie (périmètre de 25,7 km²). Aussi, seulement 35,71% des cicatrices se trouvaient sur les rives où le fetch total était supérieur à 24 000 mètres.

Tableau 5.13: Répartition des arbres cicatrisés (%) selon les différentes caractéristiques physiques et géomorphologiques des rives

	Miron	Mirabelli	Rodayer
Substrat			
Hétérogène	30,36	22,92	13,64
Plage	16,07	33,34	31,82
Affleurement rocheux	5,36	2,08	5,68
Cordon de blocs	48,21	41,47	48,86
Orientation de la rive			
Nord	1,79	12,50	11,36
Nord-Est	16,07	4,17	7,95
Est	14,29	2,08	5,68
Sud-Est	23,21	8,33	3,41
Sud	3,57	----	17,05
Sud-Ouest	10,71	----	14,77
Ouest	10,71	47,92	6,82
Nord-Ouest	19,64	25,00	32,95
Pente supra-riveraine			
Faible	23,21	47,92	34,09
Moyenne-Faible	14,29	2,08	13,64
Moyenne	46,43	27,08	37,50
Moyenne-Forte	12,50	18,75	11,36
Forte	3,57	4,167	3,41
Pente infra-riveraine			
Faible	28,57	50,00	32,95
Moyenne-Faible	19,64	14,58	37,50
Moyenne	32,14	27,08	20,45
Moyenne-Forte	12,50	----	11,36
Forte	7,14	8,33	7,950
Fetch total			
<15 000 m	30,36	8,33	----
15 000 à 24 999 m	33,93	----	3,40
25 000 à 34 999 m	19,64	56,25	5,68
35 000 à 44 999 m	16,07	35,42	27,27
45 000 à 54 999 m	----	----	29,55
>55 000 m	----	----	34,09

5.5.2 Segments de rivages touchés par l'activité glacielle

La figure 5.9 montre le nombre de segments de rivage touchés par l'activité glacielle par lac. Les années de crues glacielles majeures (1990 et 2009 au lac Miron, 1976, 1999 et 2009 au lac Mirabelli et 1999 et 2009 au lac Rodayer), sont aussi visibles dans la chronologie des segments de rivages touchés par l'activité glacielle que dans celle du nombre d'arbres cicatrisés par l'abrasion glacielle (section 5.1).

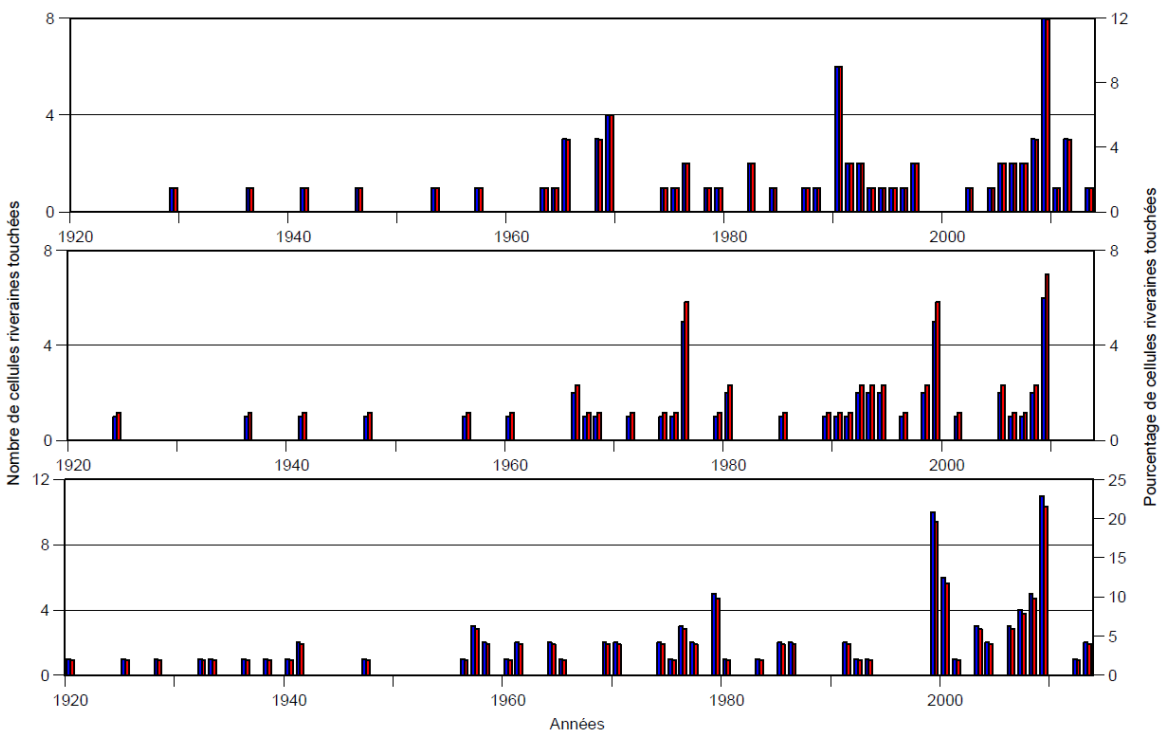


Figure 5-9: Nombre (bleu) et pourcentage (rouge) de segments de rivage touchés par l'activité glacielle. En haut Miron, au milieu Mirabelli et en bas Rodayer

Chapitre 6 : DISCUSSION

6.1 Chronologie de l'activité glacielle riveraine

Les chronologies de la fréquence de cicatrices glacielles répertoriées aux trois lacs révèlent une similarité régionale telle que soulignée par des corrélations significatives entre les trois lacs (par paire) pour la période 1795-2011 (totalité de la chronologie) ($p < 0,01$). Elles le sont aussi ($p < 0,01$) pour les paires de chronologies de cicatrices des lacs (Miron/Mirabelli et Mirabelli/Rodayer) pour la période 1920-2011 (à partir de la première cicatrice) et $p < 0,05$ pour la paire Miron-Rodayer. Cependant, il n'y avait pas de corrélation significative entre les chronologies des trois lacs pour la période la plus récente (1950-2010), bien que ce soit durant cet intervalle d'années que la majorité des événements menant à la cicatrization d'arbres riverains par les crues glacielles ont été enregistrés. Considérant que la probabilité que des cicatrices soient visibles et qu'elles puissent témoigner d'événements passés s'amenuise dans le temps, il appert que les grands événements récents peuvent tout de même se démarquer dans le bruit que présentent les séries détaillées récentes. En effet, trois années d'activité majeure (fréquence de cicatrices) se démarquent : 1976 (pour les 3 lacs), 1999 (pour les lacs Mirabelli et Rodayer) et 2009 (pour les 3 lacs). Or, pour ces trois années, les apports harmonisés fournis par Hydro-Québec (bassins versants LG2 et lac Sakami et Eastmain-1) présentent un débit printanier très élevé au mois de mai et au début du mois de juin. Aussi, l'activité glacielle a augmenté pendant la deuxième moitié du XXe siècle par rapport à la première moitié. Elle est passée d'une fréquence de $0,1 \text{ ev an}^{-1}$ pour la période 1900-1950 à $0,66 \text{ ev an}^{-1}$ pour la période 1950-2010. Ainsi, il semble y avoir une agmentation du niveau d'eau à l'échelle des deux derniers siècles dans la région si l'on se fie aux résultats des chronologies glacielles. Cependant, l'intervalle de confiance est trop grand avant 1950 pour être certain de l'interprétation avant cette période.

Les résultats des chronologies d'abrasion glacielle montrent que bien que l'établissement du premier arbre de chaque chronologie remonte à la fin du 18^e siècle, les premières cicatrices enregistrées datent par ailleurs de la décennie 1920 pour les trois lacs. L'absence de cicatrices glacielles aux 18^e et 19^e siècles, de même que la faible occurrence de ces dernières dans la première moitié du XX^e siècle témoigne probablement d'une augmentation du niveau d'eau des lacs où se situent les arbres porteurs lors de la deuxième moitié du XX^e siècle. C'est d'ailleurs ce qu'ont montré plusieurs autres études (Bégin et Payette 1988; Tardif et Bergeron 1997; Bégin 2000b; Lemay et Bégin 2008). Elle pourrait aussi signifier un nombre moins important d'arbres assez vieux pour avoir enregistré les événements. Il faut aussi considérer la possibilité que les crues glacielles elles-mêmes aient pu avoir provoqué la mortalité des arbres enregistreurs, ce qui aurait effacé une partie de l'historique des événements perturbateurs passés (Shroder 1978, Lemay et Bégin 2008). Or, sur la base d'un test de Kolmogorov-Smirnov vérifiant l'indépendance de la démographie des arbres porteurs et de la chronologie de leurs marques témoins (les cicatrices datées), force est d'admettre que l'enregistrement des événements n'est pas fortement influencé par la structure démographique des populations riveraines. En d'autres mots, les crues glacielles printanières n'auraient pas entraîné de mortalité massive d'arbres, effaçant alors les événements plus anciens de la chronologie.

6.2 Chronologie de début de séquence de bois de réaction causé par l'érosion hydro-dynamique en saison interglacielle

La chronologie de début de séquence de bois de réaction est moins précise que les chronologies d'abrasion glacielle pour donner une idée des conditions hydro-climatiques à l'échelle annuelle. Cela est dû au fait que la période printanière correspond au temps de l'année où l'activité géomorphologique est la plus importante et non la période qui suit, où les rives sont libres de glaces. Or c'est durant cette période que surviennent les basculements. Cependant, la chronologie de début de séquence de bois de réaction apporte une information complémentaire sur les niveaux d'eau du passé. Lorsque le niveau d'un lac reste élevé après la disparition du couvert de glace, les vagues et le vent peuvent déstabiliser les arbres en érodant leur substrat, les faisant basculer et entraînant la création de bois de réaction (Scurfield 1973). Les arbres qui se sont installés en deçà des niveaux d'eau actuels, dans leurs limites de tolérance, portent les traces

de la récente augmentation des niveaux d'eau. (Alestalo 1971, Scurfield 1973, Lepage et Bégin 1996, Boucher, Bégin et Arseneault 2010).

Les niveaux d'eau de la région semblent avoir augmenté au cours de la deuxième moitié du XX^e siècle, malgré les périodes de faible niveau moyen observé dans les années 1980 et 1990. Par conséquent, cette augmentation s'est traduite par une augmentation de la fréquence des basculements dans la deuxième moitié du XX^e siècle. Ainsi, les chronologies de bois de réaction témoignent de cette tendance à long terme. Également, les chronologies des trois lacs étaient significativement corrélées entre elles pour les périodes 1824-2011, 1903-2011 et 1950-2010. Aussi, comme pour les cicatrices, les tests de Kolmogorov-Smirnov consacrent l'indépendance de l'enregistrement des événements et de la structure démographique des populations riveraines porteuses. Enfin, les observations sont donc cohérentes avec les hypothèses de ce mémoire, à savoir que les niveaux d'eau auraient augmenté au cours du XX^e siècle malgré les années de faible débits observés dans les années 1980 et 1990 et qu'il semblerait y avoir une cohérence spatiale latitudinale entre les chronologies de début de séquence de bois de réaction.

6.3 Concordance des chronologies d'activité riveraine

Il n'y a pas de concordance précise à l'échelle annuelle entre les chronologies d'abrasion glacielle et celles de début de séquence de bois de réaction. Les corrélations de Spearman pour la période 1950-2010 (période où la majorité des événements d'abrasion glacielle et de début de séquence de bois de réaction sont survenus ne sont pas significatives. Cependant, elles le sont pour la période couvrant l'ensemble de la chronologie conjointe (1795-2011, $p < 0,01$) pour les trois lacs et pour la période 1900-2011 ($p < 0,05$) pour les lacs Mirabelli et Miron. De plus, les résultats obtenus montrent qu'il y a eu 21 années où au moins deux lacs sur trois ont enregistré des événements pour les deux indicateurs dans la deuxième moitié du XX^e siècle et que certaines années sont marquantes quant au nombre d'arbres riverains touchés : 1976, 1990 et 2009. Ces trois années correspondent aussi à des années où le débit de la crue printanière était élevé, selon les apports harmonisés d'Hydro-Québec.

Ainsi, bien qu'il n'y ait pas de concordance à l'échelle annuelle entre les chronologies d'activité riveraine, on remarque une forte tendance qui semble indiquer que l'hypothèse de ce

mémoire, à savoir que l'amplitude des apports mesurés depuis 1963 soit de l'ordre des fluctuations historiques régionales des niveaux d'eau, mais s'inscrivant dans une tendance générale à la hausse à l'échelle des deux derniers siècles, pourrait être confirmée.

6.4 Relation entre les conditions hydro-climatiques et les chronologies d'abrasion glacielles

Comme mentionné plus tôt dans la discussion, les années de crues glacielles majeures des trois lacs correspondent à des années de fort débit enregistré souligné par les données des apports harmonisés pour les bassins-versants LG2 et lac Sakami et Eastmain-1 par Hydro-Québec. Les hydrogrammes de crues montraient bien la différence entre une année de crue glacielle majeure et les autres années. Dans la région subarctique, les conditions hydro-climatiques printanières ont une importance particulière puisqu'en raison des particularités climatiques régionales (pas de redoux et forte épaisseur des glaces), l'ensemble du déglacement survient au printemps (Beltaos et Burrell 2003). Cela donne un bon aperçu des précipitations qui ont eu lieu pour une bonne partie de l'année.

Plusieurs études ont déjà montré que les fluctuations du niveau d'eau des lacs étaient étroitement liées aux variations du climat (Berglund, 1983; Digerfeldt, 1986; Bégin et Payette, 1988; Payette et Delwaide, 1991). Boucher (2008) a démontré que la méthode de datation des crues à l'aide de cicatrices est un bon indicateur de l'intensité des événements discrets ayant perturbé le milieu en milieu fluvial dans la même région. Lemay et Bégin (2008) ont également montré que les chronologies d'abrasion glacielle étaient bien corrélées au niveau d'eau printanier. La corrélation entre les chronologies d'abrasion glacielles et les variables hydrologiques de cette étude le montre aussi, puisque les chronologies des lacs Mirabelli et Rodayer sont corrélées de façon significative à plusieurs des variables hydrologiques d'intensité, mais pas à celles de durée (*timing*). Cependant, il n'y a pas de corrélation entre la chronologie d'abrasion glacielle du lac Miron aux variables hydrologiques. Cela peut être dû au fait que le lac Miron est plus petit que les deux autres et qu'il a aussi une forme moins arrondie.

La chronologie glacielle du lac Mirabelli est la mieux corrélée aux variables climatiques, autant pour les données de températures, que de précipitations. Les corrélations sont bonnes avec

les températures et les précipitations pour la période automnale, de même que pour le total des précipitations (pluie et neige) et le total des précipitations sous forme de neige pour la période allant de septembre à mars. Les précipitations automnales et hivernales correspondent à une grosse partie du volume d'eau libéré pendant les crues printanières (Environnement Canada 2014). La chronologie du lac Mirabelli était aussi corrélée significativement au total mensuel des précipitations pour la période où surviennent les crues printanières (mars à mai).

La chronologie du lac Miron est principalement bien corrélée aux variables de températures minimales et maximales et les DDF, alors que la chronologie d'abrasion glacielle du lac Rodayer n'est pas très bien corrélée aux variables climatiques. La chronologie d'abrasion glacielle du lac Miron est bien corrélée aux moyennes mensuelles des températures minimales et maximales pour la période couvrant les mois de mars à mai inclusivement (MAM). C'est intéressant puisque c'est dans la deuxième moitié de cette période qu'ont lieu les crues printanières causant des cicatrices glacielles.

Les chronologies des lacs au sud de la zone d'étude sont donc bien corrélées aux variables hydrologiques (Rodayer et Mirabelli), alors que la chronologie du lac Miron (le plus au nord), ne l'est pas. C'est le contraire pour les variables climatiques, puisque les chronologies des lacs Mirabelli et Miron (au nord de la zone d'étude) sont corrélées significativement à certaines données climatiques, mais pas celle du lac Rodayer (le lac le plus au sud). Cette analyse pourrait cependant être plus précise s'il y avait des données pour les bassins versants et sous bassins versants où se situent chaque lac, de même que des stations d'enregistrement météorologiques à proximité de chaque lac. La pluviométrie pourrait avoir un rôle à jouer. Également, les lacs Rodayer et Mirabelli réagissent peut-être d'avantage puisqu'ils sont plus grands et de forme plus arrondie que le lac Miron, ce qui peut favoriser l'activité glacielle et l'érosion des rives en période inter-glacielle. Il serait aussi pertinent de s'intéresser aux différences des conditions de glace entre le nord et le sud de la zone d'étude, alors que cela peut avoir une influence sur l'intensité des crues glacielles.

6.5 Risque de perturbation des écosystèmes riverains

Les statistiques représentant l'influence des caractéristiques de rivages (attributs physiques et géomorphologiques) sur l'activité glacielle, montrent qu'une grande proportion des événements hydrologiques menant à l'abrasion glacielle des tiges ont affecté des arbres bordant des plages, des cordons de blocs et des rives ayant une pente supra-riveraine et infra-riveraine faible à moyenne. Aussi, il y avait une abondance de cicatrices sur les rives exposées à l'ouest, au sud-ouest et au nord-ouest, ce qui est cohérent avec la direction des vents dominants en période d'activité glacielle enregistrés dans la région (Environnement Canada 2014). De plus, les résultats montraient que pour les lacs Mirabelli et Rodayer, plus d'arbres riverains avaient été cicatrisés lorsque le fetch total de la rive où ils se trouvaient était plus grand. Or, des recherches antérieures ont montré que l'intensité glacielle était dépendante de la taille et de la longueur du lac et donc, du fetch (Bégin 2000b, Denneker et al. 2000).

Ces résultats sont cohérents avec la littérature scientifique, alors que les caractéristiques des rives peuvent être influencées par le régime hydrologique en plus de la géologie et de l'héritage quaternaire. Le régime hydrologique est conditionné par le type et la taille de plan d'eau, le régime des précipitations, les vents dominants et les glaces (Dionne 1979, Bégin 1986, Bégin et Payette 1989, Bégin et Payette 1991). Le nombre d'enregistrements est corrélé à l'exposition d'une rive. Les rives sont quant à elles exposées en fonction de la quantité et l'étendue des obstacles qui pourraient agir à titre de récif protecteur, la pente littorale et son extension sous-marine et l'orientation du littoral (Bégin 2000b). Les sites exposés au vent, aux vagues et aux glaces tels que les rives exposées à l'ouest et les rives ayant des pentes supra et infra riveraines plus faibles doivent enregistrer l'ensemble des événements qui surviennent dans les sites protégés comme les platières végétales se retrouvant dans les petites baies où le fetch est moins important.

Également, les résultats obtenus concernant le nombre de segments riverains touchés par l'activité glacielle par lac montrent que les années de crues glacielles majeures étaient aussi visibles dans la chronologie du nombre de segments riverains touchés que dans celle du nombre d'arbres cicatrisés pour chaque lac. Cela vient renforcer l'idée que le total de cicatrices d'abrasion recensé pour les années glacielles majeures n'était pas dû à des poussées glacielles

localisées associées à des événements de tempêtes printanières, mais bien à des hausses printanières généralisées du niveau d'eau des lacs.

Chapitre 7 : CONCLUSION

L'objectif principal de ce mémoire était d'établir la chronologie des événements de hautes eaux de lacs de la basse Jamésie au cours du dernier siècle. Selon les résultats préliminaires, l'hypothèse selon laquelle l'amplitude des apports mesurée depuis 1963 soit de l'ordre des fluctuations historiques régionales, mais s'inscrivant dans une tendance générale à la hausse à l'échelle des deux derniers siècles, semble être fondée. Plusieurs autres études dans le passé en étaient venues à la même conclusion, à savoir que les faibles apports en eau qui ont préoccupé Hydro-Québec dans les années 1980 et 1990 étaient un épisode de faible hydraulicité, mais que les reconstitutions historiques des niveaux d'eau montrent une augmentation au cours du XXe siècle (Bégin et Payette 1988, Payette et Delwaide 1991, Tardif et Bergeron 1997, Bégin 2000, Lemay et Bégin 2008). Également, dans les régions boréales et subarctiques du Québec, les études en dendrochronologie avaient permis de voir que la fréquence des crues glacielles avait augmenté durant la deuxième partie du XXe siècle (Bégin et Payette 1988; Tardif et Bergeron 1997; Bégin 2000b; Lemay et Bégin 2008), ce qui est aussi le cas dans ce mémoire.

Plusieurs autres études ont utilisé la dendrochronologie pour reconstituer l'historique des événements extrêmes en milieu lacustre (Schweingruber 1996; Bégin et Payette 1988; Tardif et Bergeron 1992, 1993 et 1997; Bégin 1999, Bégin 2000a, Bégin 2000b; Lemay et Bégin 2008, Boucher 2011). Les cicatrices d'abrasion glacielle et l'inclinaison des tiges causée par l'érosion hydro-dynamique en période inter-glacielle sont des indicateurs bien connus de l'étude de l'évolution des niveaux d'eau dans la région subarctique québécoise (Boucher, Bégin et Arseneault 2010, Boucher et al. 2011). Pour ce qui est de ce mémoire, les cicatrices glacielles semblent être l'indicateur le plus précis des variations hydro-climatiques. Cependant, les chronologies d'érosion en période inter-glacielle de même que la concordance des chronologies entre elles appuient l'hypothèse de ce mémoire puisqu'ils démontrent qu'il y a eu une

augmentation du niveau d'eau au cours du XXe siècle, bien qu'il n'y ait pas de précision à l'échelle annuelle, sauf pour les chronologies d'abrasion glacielle.

Aussi, bien que les chronologies d'abrasion glacielle soient bien corrélées aux variables hydrologiques et à certaines variables climatiques, les données hydrologiques et climatiques prises de façon séparée n'expliquent pas l'ensemble des variations. Il s'agirait peut-être plutôt d'une combinaison de variables hydrologiques et climatiques (Boucher et al. 2009). À cet effet, comme on ne peut pas expliquer la totalité de la variance seulement avec un groupe ou l'autre de données, il serait intéressant de pousser l'analyse statistique plus loin en utilisant, par exemple, des arbres de classification (CT) pour trouver la combinaison hiérarchique de facteurs expliquant l'intensité du glacielle. Par ailleurs, il pourrait être intéressant de faire des régressions logistiques pour trouver les seuils nécessaires pour qu'il y ait un enregistrement de marqueurs sur les arbres riverains. De plus, bien que plusieurs années de crues majeures aient pu être identifiées, certaines ne l'ont pas été. C'est le cas des années 1974, 1977 et 1979, entre autre, alors que les données des apports harmonisés montraient des débits de crue très importants. Il serait pertinent de pousser l'analyse plus loin pour comprendre quelles étaient les conditions hydro-climatiques à ce moment.

Les chronologies deux lacs au sud de la zone d'étude définie pour la présente recherche (Mirabelli et Rodayer) étaient très bien corrélés aux variables hydrologiques d'intensité et donc, au niveau d'eau des lacs, alors que Miron, au nord, ne l'était pas. Également, le lac le plus au sud (Rodayer) n'était pas bien corrélé aux variables météorologiques en comparaison aux deux autres. Subséquemment, il serait intéressant d'explorer l'influence des propriétés de la glace entre le sud et le nord de la zone d'étude influencé par la quantité de précipitations et les différences de température. Lors des hivers doux et enneigés, le couvert de glace d'un lac peut être trop peu épais, ce qui l'empêche de se maintenir à l'état non dégradé, même en présence d'une forte crue printanière.

Enfin, dans le contexte actuel des changements climatiques, il est très intéressant de reconstituer le passé pour être en mesure de pouvoir prévoir le futur et faire face aux changements attendus. Dans la région du Québec subarctique, des études ont montré que la hausse du niveau de l'eau pouvait être attribuable à de plus importantes quantités de précipitations sous forme de neige causées par un climat plus tempéré (Payette, 1980; Begin and

Payette, 1988; Payette and Delwaide, 1991; Payette and Fillion, 1993). De plus, les fortes précipitations printanières sous forme de pluie maximisent la fonte rapide de la neige et favorisent des crues glacielles importantes (Payette 1980). Ainsi, ce sera très intéressant de voir ce que l'avenir nous réserve, puisque de telles conditions se manifesteront vraisemblablement de plus en plus souvent, alors que selon le 5e rapport du GIEC (2013), ce sont dans les régions nordiques que sont anticipés les impacts les plus importants des changements climatiques.

Chapitre 8 : RÉFÉRENCES

Adobe Inc, 2014. Adobe Illustrator. Disponible au: <https://adobe.com/products/illustrator>

Alestalo, J. 1971. Dendrochronological interpretation of geo-morphic processes. - *Fennia* 105.

Archives, 2012. Analyse Rétrospective des Conditions Hydroclimatiques à l'aide des indicateurs de leur variabilité à l'Échelle Séculaire, <http://archives.ete.inrs.ca/>, site consulté en 2012.

Arseneault, D. et Payette, S., 1997a. Reconstruction of millennial forest dynamics from tree remains in a subarctic tree line peatland. *Ecology*, 73:1067-1081.

Arseneault, D. et Payette, S., 1997b. Landscape change following deforestation at the arctic tree line in Quebec, Canada, *Ecology*, 78: 693-706.

Barry, R. G. et Hare, F. K., 1974. Arctic Climate, p. 17-54. In J. D. Ives et R. G. Barry, edit., *Arctic and Alpine Environments*, Methuen, London.

Bégin, C. et F. Fillion, 1999. Black spruce (*Picea mariana*) architecture, *Can. J. Bot.* 77: 664–672

Bégin, Y., et Allard, M., 1982, Le glacier de Kuujuarapik (Nouveau-Québec). *Collection Nordicana (Volume 46)*, Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, Canada. 100 pp.

Begin, Y., 1986. Dynamique de la végétation riveraine du lac à l'Eau Claire, Québec subarctique. Thèse PH.D., Université Laval, Québec.

Bégin, Y., 1999. Tree-Ring Dating of Extreme Lake Levels at the Subarctic-Boreal Interface. *Quaternary Research*, 55: 133-139.

- Bégin, Y., 2000a. Augmenting the potential for reconstruction of lake ice-floods using treering records, International Workshop on River Environments Considering Hydraulic and Hydrologic Phenomena in Snowy and Cold Régions, INRS-EAU, QC.
- Bégin, Y., 2000b. Reconstruction of subarctic lake levels over past centuries using treerings. *Journal of Cold Régions Engineering*, 14: 192-212
- Bégin, Y., 2001. Tree-Ring Dating of Extreme Lake Levels at the Subarctic Boréal Interface, *Quaternary Research* 55, 133-139.
- Bégin, Y. et Lavoie, J., 1988. Dynamique d'une bordure forestière et variations récentes du niveau du fleuve Saint-Laurent. *Can. J. Bot.* **66** : 1905- 1913.
- Bégin, Y. et Payette, S., 1988. Dendroecological évidence of lake-level changes during the last three centuries in Subarctic Québec. *Quaternary Research*, 30: 210-220.
- Bégin, Y., et Payette, S., 1989. La végétation riveraine du lac à l'Eau Claire, Québec subarctique. *Géographie physique et Quaternaire*, 43: 39-50
- Bégin, Y. and Payette, S. 1991. Population structure of lakeshore willows and ice-push events in subarctic Quebec, Canada. - *Holarct. Ecol.* 14: 9-17.
- Bégin, Y. et al. 2007. Analyse dendrochronologique des variations passées du régime hydro climatique au complexe de la grande rivière dans le Nord du Québec, *La Houille Blanche*, 6 : 70-77
- Ballesteros Canovas, J.A., Eguibar, M., Bodoque, J.M., Diez-Herrero, A., Stoffel, M., Gutierrez-Perez, I., 2011. Estimating flash flood discharge in an ungauged mountain catchment with 2D hydraulic models and dendro-geomorphic palaeo stage indicators. *Hydrol. Process.* 25, 970–979.
- Ballesteros-Cánovas, J. A., Koul, T., Bashir, A., del Pozo, J. M. Bodoque del Pozo., Allen, S., Guillet, S., Rashid, I., Alamgir, S.H., Shah, M., Bhat, M. S., Alam, A., et Stoffel, M. 2020. Recent flood hazards in Kashmir put into context with millennium-long historical and tree-ring records. *Science of The Total Environment*, 722, 137875.

- Ballesteros Canovas, J.A., Márquez-Peñaranda, J.F., Sánchez-Silva, M., Díez-Herrero, A., Ruiz-Villanueva, V., Bodoque, J.M., Eguibar, M.A., and Stoffel, M., 2015. Can tree tilting be used for paleoflood discharge estimations?: *Journal of Hydrology*, v. 529, p. 480-489
- Beltaos, S., 1997. Onset of river ice breakup. *Cold Regions Science and Technology*, 25: 183-196.
- Beltaos, S. et Burrell, B.C., 2003. Climate change and river ice breakup. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30: 145-155.
- Berglund, B. E., 1983. Palaeohydrological studies in lakes and mires: a palaeoecological research strategy, p. 237-254. In K. J. Gregory, edit., *Background to Palaeohydrology*. Wiley, New York.
- Boucher, É., 2008. Analyse hydro-climatique et géomorphologique des déglacements mécaniques de la rivière Neopastic au Québec nordique, Thèse de doctorat, Université Laval, Québec.
- Boucher, É., Bégin, Y. et Arseneault, D. 2010. The Dendrohydrological Approach in Boreal Environments (in french). Dans S. Payette et L. Filion (dir.). *La dendroécologie : principes, méthodes et applications* (p. 573–592). Québec : Les Presses de l'Université Laval.
- Boucher, É., Ouarda, T.B.M.J., Bégin, Y. et Nicault, A. 2011. Spring flood reconstruction from continuous and discrete tree ring series. *Water Resources Research*, 47 (7).
- Bourque, A. et G. Simonet., 2008. Québec, dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada*, Édition 2007, D.S. Lemmen, F.J Warren et E. Bush (éditeurs), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 171-226.
- Climatic Research Unit (CRU). 2012a. Precipitation data. <http://www.cru.uea.ac.uk/data>. Site consulté en 2014.
- Climatic Research Unit (CRU). 2012b. Temperature data. <http://www.cru.uea.ac.uk/data>. Site consulté en 2014.

- Denneler, B., Bergeron, Y., and Bégin, Y., 2000. An attempt to explain the distribution of the tree species composing the riparian forests of Lake Duparquet, southern boreal region of Québec, Canada. *Can. J. Botany*, 77, 1744–1755
- Deslauriers, A., Morin, H., Urbinati, C., et Carrer, M., 2003a. Daily weather response of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) stem radius increment from dendrometer analysis in the boreal forests of Québec (Canada). *Trees* 17, 477-484
- Deslauriers, A., Morin H., Begin, Y., 2003b, Cellular phenology of annual ring formation of *Abies balsamea* (L.) Mill. in the Québec boreal forest (Canada). *Can J For Res* 33:190–200
- Delwaide A., Filion L., 2010. Échantillonnage et datation dendrochronologiques, Pages 167-198, dans S. Payette et L. Filion (eds). *dans La dendroécologie : principes, méthodes et applications*, Presses de l'Université Laval, Québec
- Digerfeldt, G., 1986. Studies on past lake-level fluctuations, p. 127-143. *In* B. E. Berglund, edit., *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*. Wiley, New York.
- Dionne, J. C., 1976. Le glacier de la région de La Grande rivière, Québec subarctique. *Revue de Géographie de Montréal*, 30: 133-153.
- Dionne, J.C., 1978. Formes et phénomènes périglaciaires en Jamésie, Québec subarctique. *Revue de Géographie physique et Quaternaire*, 32 (3) : 187-247.
- Dionne, J.-C., 1979. Ice action in the lacustrine environment: a review with particular reference to subarctic Québec, *Canada. Earth Science Review*, 15: 185-212
- Environnement Canada, 2014 Archives climatiques nationales du Canada, [http : //climat.meteo.gc. ca](http://climat.meteo.gc.ca). Site consulté en 2014.
- Environnement Canada, 2016, Conditions atmosphériques et météorologie- glossaire, Fetch total, <https://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=En&n=B8CD636F-1&def=allShow>. Site consulté en 2016.

ESRI 2014, ArcGIS Desktop: Version 10.2, Redlands, CA. Environmental Systems Research Institute.

Fritts, H. C., T. J. Blasing, B.P. Haydn et J. E. Kutzbach, 1971. Multivariate techniques for specifying tree-growth and climate relationships and for reconstructing anomalies in paleoclimate. *Journal of Applied Meteorology*, 10 : 845-864

Fritts, H.C, 1976. *Tree-rings and Climate*. Académie press, London, 567 pp.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), 2013:. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Résumé à l'intention des décideurs

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) 2018. Rapport du Groupe de travail I du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Résumé à l'intention des décideurs. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4-wg1-spm-fr.pdf>, site consulté en 2021.

Guiot J., Nicault A., Rathgeber C., Edouard J.-L., Guibal F., Pichard G., Till C., 2005. Last-millennium summer-temperature variations in Western Europe based on proxy data. *The Holocene*. 15(4) : 1-12

Guiot, J. et Nicault A., 2010. Méthode de dendroclimatologie à l'échelle continentale : fonctions de réponse et fonctions de transfert, pages 229-254 dans S. Payette et L. Filion (eds). *La dendroécologie : principes, méthodes et applications*, Presses de l'Université Laval, Québec.

Hamelin, L.-E., 1969. Le glacier de lakoutie en Sibérie nordique. *Cahiers de géographie de Québec*, 29 :205-216.

Hare F.K., Ritchies, J.C., 1972. The boreal bioclimates. *Geographical Review* 62: 333-365.

Hardy, L., 1976. Contribution à l'étude géomorphologique de la portion québécoise des basses terres de la Baie de James. Thèse de doctorat, Montréal Université

- Hardy, L., 1977. « La déglaciation et les épisodes lacustres et marins sur le versant québécois des basses terres de la Baie de James ». *Géographie Physique et Quaternaire*, vol. 31, no 3-4, p. 261-273.
- Hydro-Québec, 2006. Plan stratégique 2006-2010. Rapport déposé auprès du Gouvernement du Québec (<http://www.hydroquebec.com/publications/fr/docs/plan-strategique/plan-strategique-2006-2010.pdf>), 55 p.
- La Moe, J. P., et H. A. Winters, 1989. Wave energy estimate and bluff recession along Lake Michigan's southeast shore. *The Professional Geographer*, 41: 349-358
- Lepage, H. et Y. Bégin, 1996. Tree-ring dating of extreme water level events at Lake Bienville, surarctic Québec, *Canada, Arctic and Alpine Research*, 28 : 77-84
- Lemay, M. et Bégin, Y., 2008. Hydroclimatic analysis of an ice-scouring tree-ring chronology of a high Boréal lake, northern Québec, Canada. *Hydrology Research*, 39.5-6 : 451-464
- Mann, M. E., 2002. The value of multiples proxies. *Science*, 297 : 1481-1482
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) 2021, Puissances des centrales électriques, <https://mern.gouv.qc.ca/energie/statistiques-energetiques/puissance-centrales-electriques/>, Site consulté en 2021.
- Ministère des forêts, de la faune et des parcs (MFFP), 2014, Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec, <https://mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/inventaire-zones.jsp>, Site consulté en 2014.
- Ministère des Ressources Naturelles du Québec, 2012. Stratégie énergétique pour construire le Québec de demain, Ministère des Ressources naturelles du Québec, www.mrn.gouv.qc.ca/energie/strategie, Site consulté en 2012.
- Moberg A., Sonechkin D., Holmgren K., Datsenko N., Karlén W. 2005. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*. 433 : 613

- National Geographic Magazine, 2017. <http://www.ngm.com/climateconnections> , Percent Change in Average Annual Précipitations, 1976-2005, Site consulté en 2013.
- National Research Council (NRC), 2006. Surface Temperature Recoustruction for the last 2,000 Years. The National Academies Press, Washington, DC.
- Payette, S., 1980. Les grandes crues glacielles de la rivière aux Feuilles (Nouveau-Québec): une analyse dendrochronologique. *Naturaliste Canadien* 107: 215-225.
- Payette, S. 1983. The forest-tundra and present tree-lines of the northern Québec-Labrador Peninsula. Dans : Morisset, P. et Payette, S. [Éd.] Tree-line ecology : Proceedings of the northern tree-line conference, *Nordicana* 47, 3-23.
- Payette, S., 1992. Fire as a controlling process in the North American boreal forest. in Shugart, H.H., Leemans, R.R. & Bonan, G.B. (éd). *A systems analysis of Global Boreal Forest*. Cambridge University Press, Cambridge: 145-169.
- Payette, S. et Delwaide, A., 1991. Variations séculaires du niveau d'eau dans le bassin de la rivière Boniface (Québec nordique): une analyse dendroécologique. *Géographie physique et Quaternaire*, 45: 59-67.
- Payette, S., Filion, L. et al. 2010. *Dendroécologie : principes, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval. 758 p.
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences II* : 1633-1644.
- R Core Team, 2014. R: A language and environment for statistical computing, <http://www.Rproject.org>, R Foundation for Statistical Computing. Vienna. ISBN 3- 9000 5 I -07 -0, URL [http ://www. R-project.org/](http://www.R-project.org/)
- Ressources naturelles Canada, 2014, Forêt Boréale, <https://www.rncan.gc.ca/nos-ressources-naturelles/forets-foresterie/amenagement-forestier-durable-au/foret-boreale/13072>. Site consulté en 2014

Ressources naturelles Canada, 2019, C1- Pessière à lichens, <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/renseignements/fueltypes/c1> . Site consulté en 2020.

Shroder, J. F. 1978 Dendrogeomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah. *Quatern. Res.* 9, 168–185

Schroder, J.F. 1980. Dendrogeomorphology: Review and new techniques of tree-ring dating. *Progress in Physical Geography* 4, 161-188

Schweingruber F. H., 1996. *Tree rings and environment. Dendroecology*, Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Berne, Stuttgart, Vienna, Haupt. 609 p.

Scurfield, G., 1973. *Reaction wood, its structure and fonction*. Science, 16: 647-655.

Société d'énergie de la Baie James (SEBJ), 1987. Le complexe hydroélectrique de la Grande Rivière - Réalisation de la première phase. SEBJ, Montréal, 465 pp.

St. George, S., Hefner, A.M. et Avila J., 2020. Paleofloods stage a comeback. *Nature Geosciences*, 13: 766–768

St. George, S. et E. Nielsen, 2003. Palaeoflood records for the Red River, Manitoba, Canada, derived from anatomical tree-ring signatures. *The Holocene*, 13: 547-555.

Stockton, C. W. et Fritts, H. C, 1973. Long-term reconstruction of water level changes for Lake Athabaska by analysis of tree rings. *Water Resources Bulletin*, 9: 1006-1027.

Stoffel, M., Bollschweiler, M., Butler, D.R., Luckman, B.H., 2010. *Tree rings and natural hazards: a state-of-the-art*. Springer, Heidelberg, Berlin, New York.

Stone, D.A., A.J. Weaver et E.W. Zwiers, 2000. Trends in Canadian precipitation intensity, *Atmosphere-Ocean*, 32 (8):321-347

Sugden, D. E., 1977. Reconstruction of the morphology, dynamics and thermal characteristics of the Laurentide ice sheet at its maximum. *Arctic and Alpine Research* 9: 21-47

- Tabsova, D., Fortin, V., Anctil, F., et Haché. M., 2005. Apport de la technique du krigeage avec dérive externe pour une cartographie raisonnée de l'équivalent en eau de la neige : Application aux bassins de la rivière Gatineau, *Canadian Journal of Civil Engineering* 32 (1) : 289-297.
- Tardif, J. and Bergeron, Y. 1992. Analyse écologique des peuplements de frêne noir (*Fraxinus nigra* Marsh.) des rives du lac Duparquet, nordouest du Québec. *Canadian Journal of Botany* 70, 2294-302.
- Tardif, J., et Bergeron, Y., 1993. Radial growth of *Fraxinus nigra* in a Canadian boreal floodplain in response to climatic and hydrologic fluctuations. *Journal of Vegetation Science* 4, 751-58.
- Tardif, J. et Bergeron, Y., 1997. Ice-flood history reconstructed with tree-rings from the southern boreal forest limit, western Québec. *The Holocene*, 7: 291-300.
- Timell, T. E., 1983. Origin and evolution of compression wood. *Holzforschung* 37:1-10
- Timell, T. E., 1986. Compression Wood in Gymnosperms, Volume 1. Berlin :Springer Verlag.
- Villeneuve, C., et F. Richard, 2007. *Vivre les changements climatiques : réagir pour l'avenir*, Éditions MultiMondes, Québec

Chapitre 9 : ANNEXES

9.1 Chronologies glacielles des trois lacs à l'étude pour la période 1920-2011

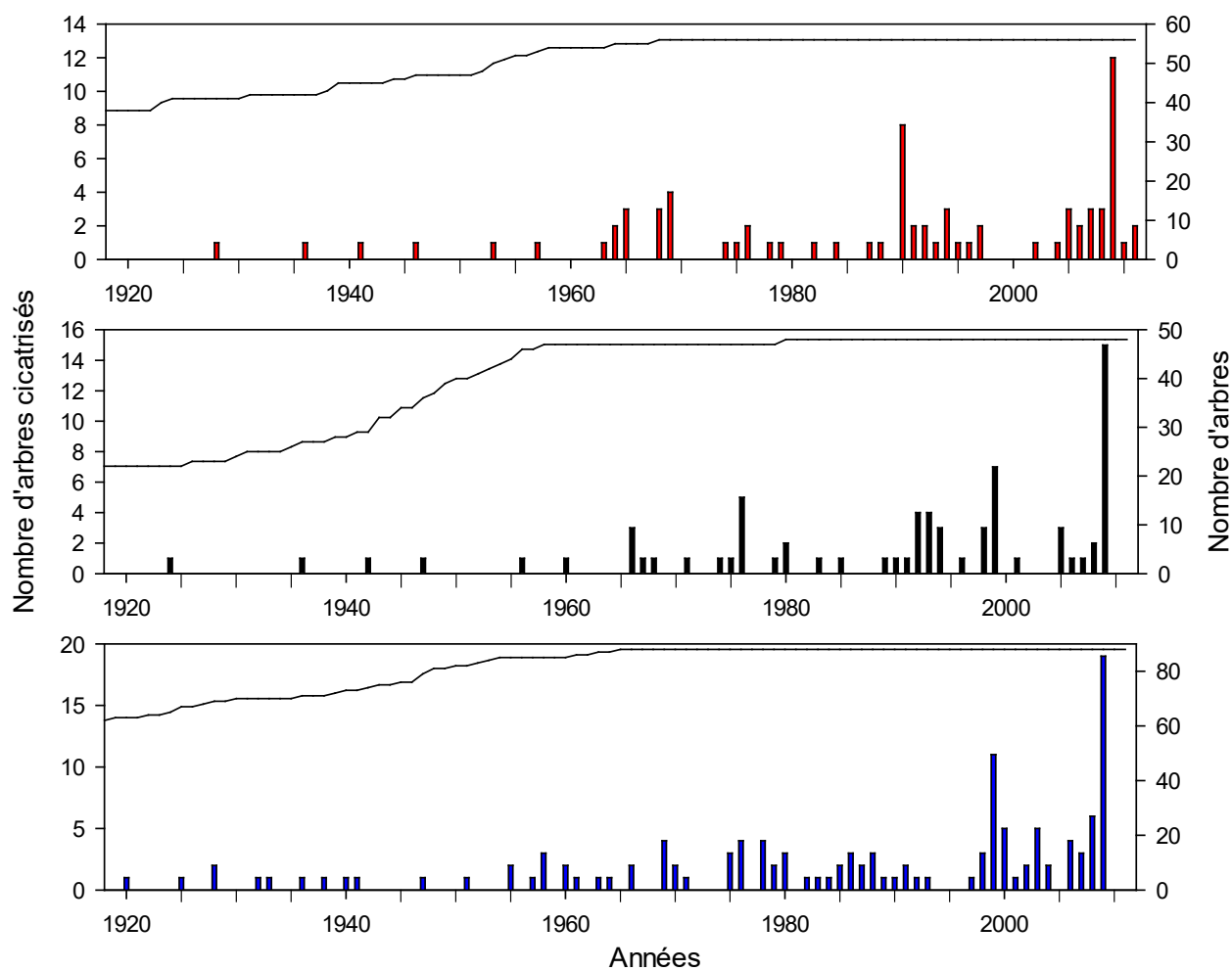


Figure 9-1: Chronologies glacielles des trois lacs à l'étude de 1920 à 2011. Miron en rouge, Mirabelli en noir et Rodayer en bleu. Les courbes indiquent la fréquence cumulée des arbres selon leur année d'établissement.

9.2 Chronologies de début de séquence de bois de réaction pour la période 1940-2011

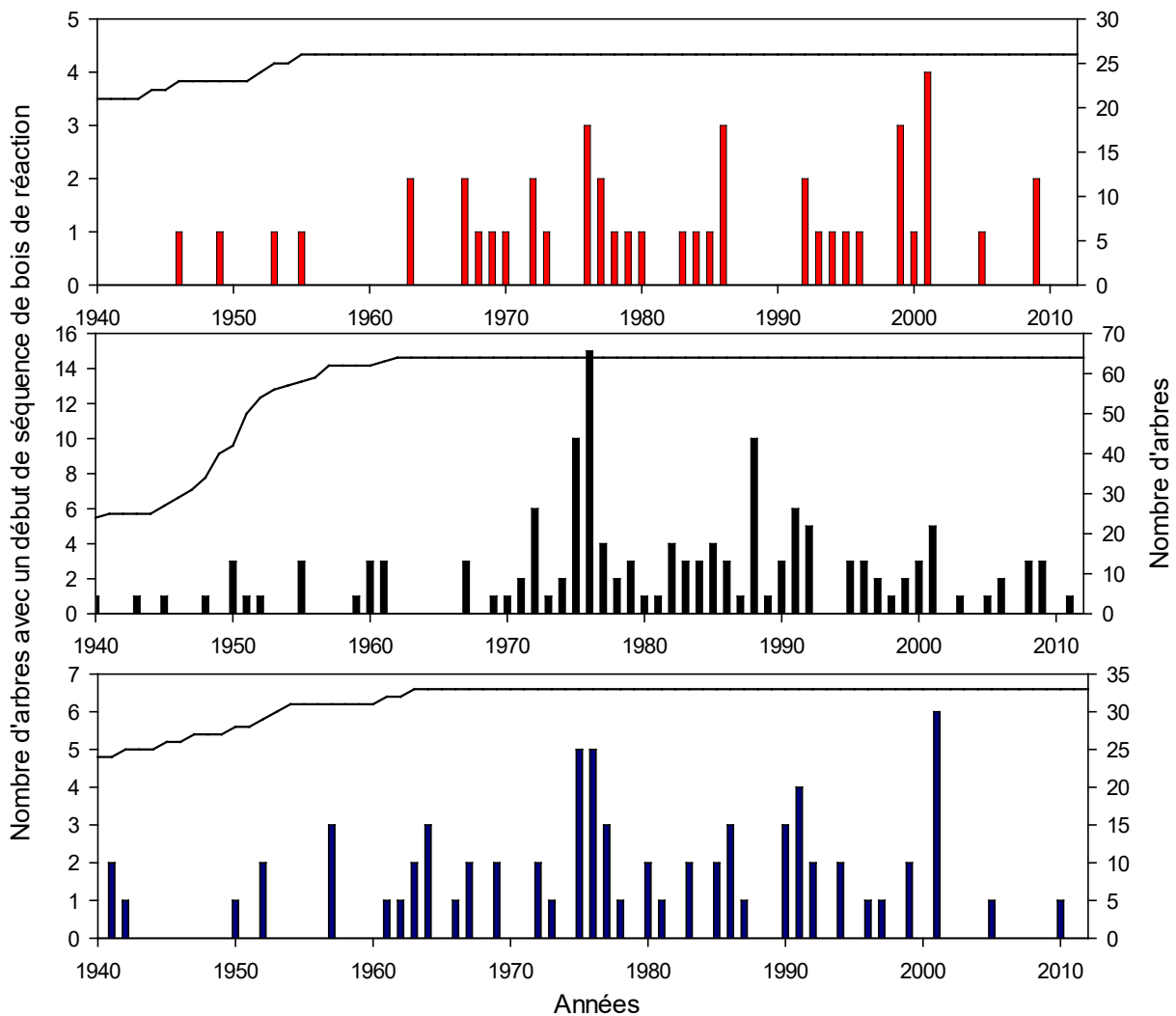


Figure 9-2: Chronologies des débuts de séquence de bois de réaction pour la période 1940-2011. En rouge le lac Miron, en noir le lac Mirabelle et bleu le lac Rodayer. Les courbes indiquent la fréquence cumulée des arbres selon leur année d'établissement.

9.2 Statistiques de la segmentation des rives

9.2.1 Lac Rodayer

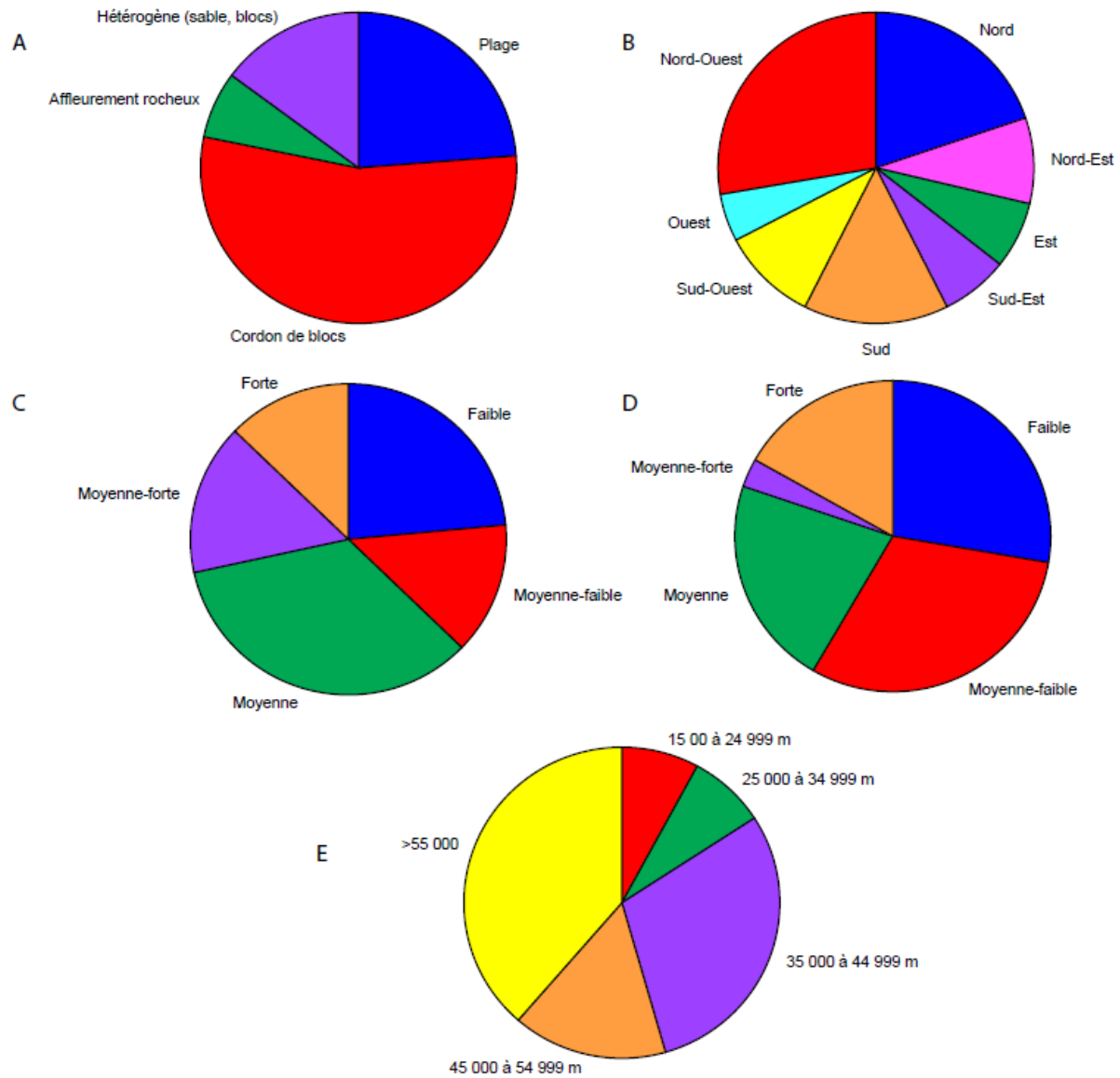


Figure 9-3: Statistiques des rives du lac Rodayer (% du périmètre). A : Type de substrat, B : Orientation des rives, C : Pente supra-riveraine, D : Pente infra-riveraine et E : Fetch total

9.2.2 Lac Mirabelli

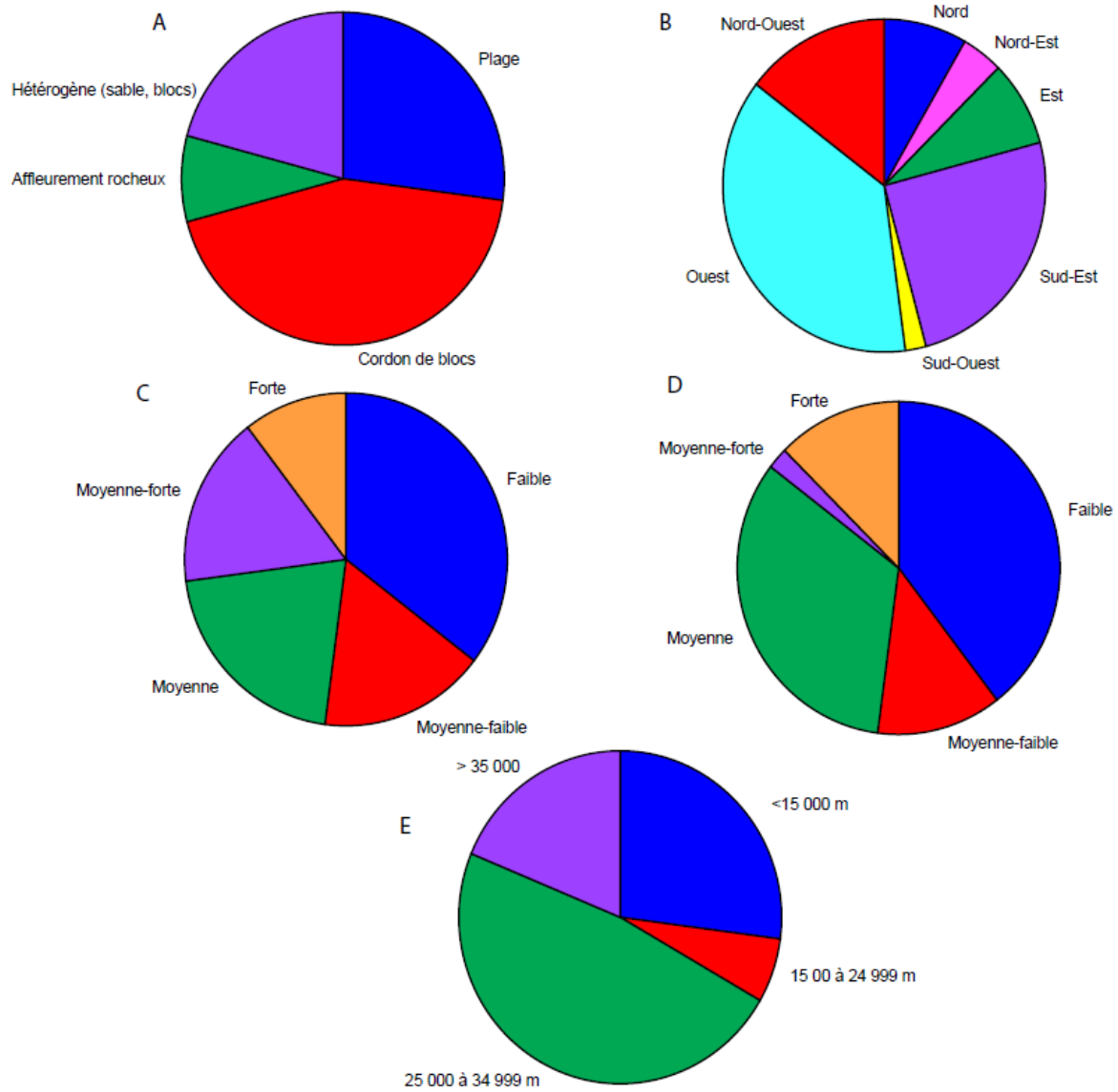


Figure 9-4: Statistiques des rives du lac Mirabelli (% du périmètre). A : Type de substrat, B : Orientation des rives, C : Pente supra-riveraine, D : Pente infra-riveraine et E : Fetch total

9.2.3 Lac Miron

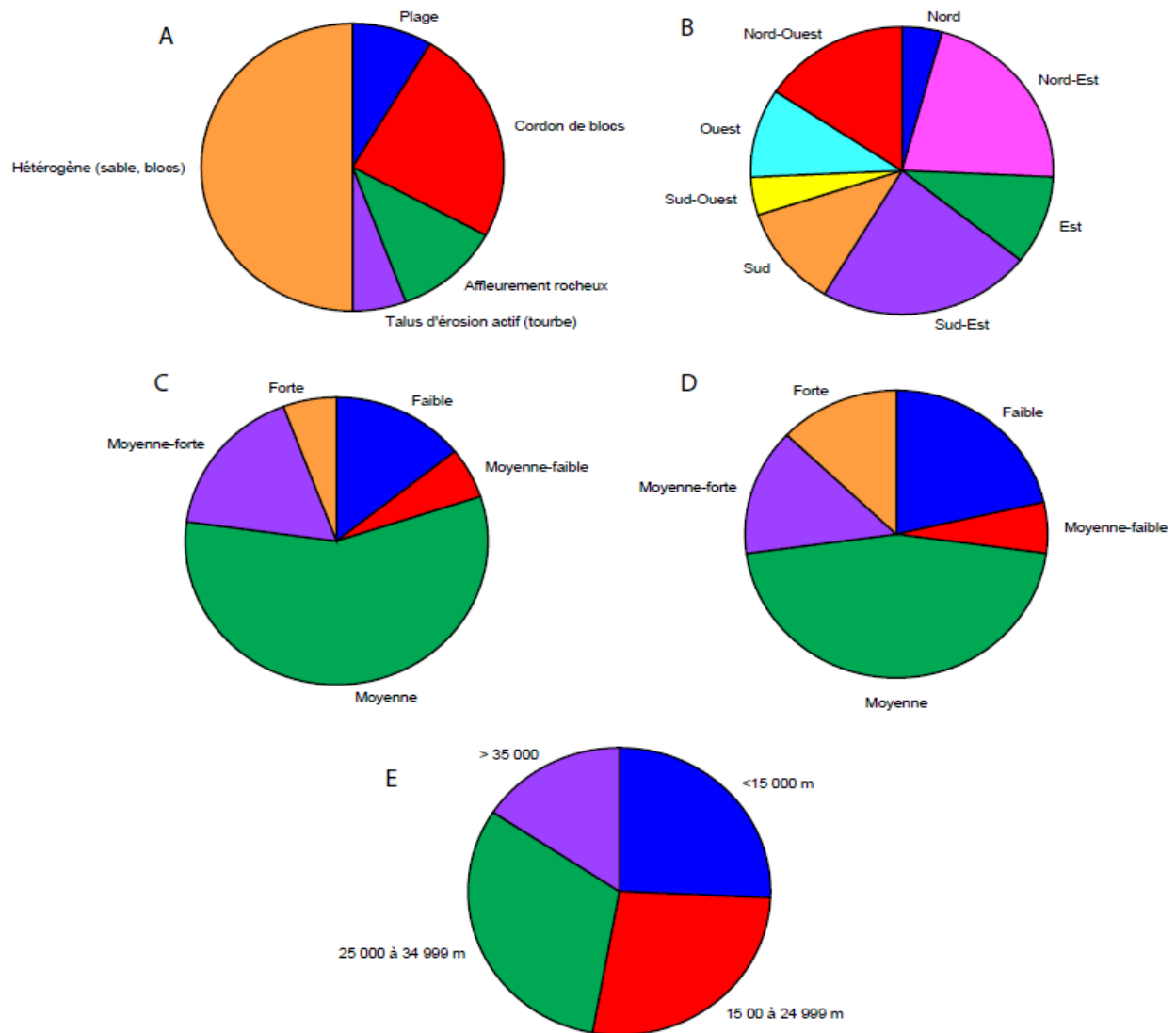


Figure 9-5: Statistiques des rives du lac Miron (% du périmètre). A : Type de substrat, B : Orientation des rives, C : Pente supra-riveraine, D : Pente infra-riveraine et E : Fetch total

9.3 Dessins à l'échelle et composition floristique par type de rivage

9.3.1 Affleurements rocheux



Figure 9-6: Dessin à l'échelle d'un affleurement rocheux du lac Miron (A), 1 : Affleurement rocheux, 2 : Humus forestier, 3 : Aulnaie, 4 : Affleurement rocheux

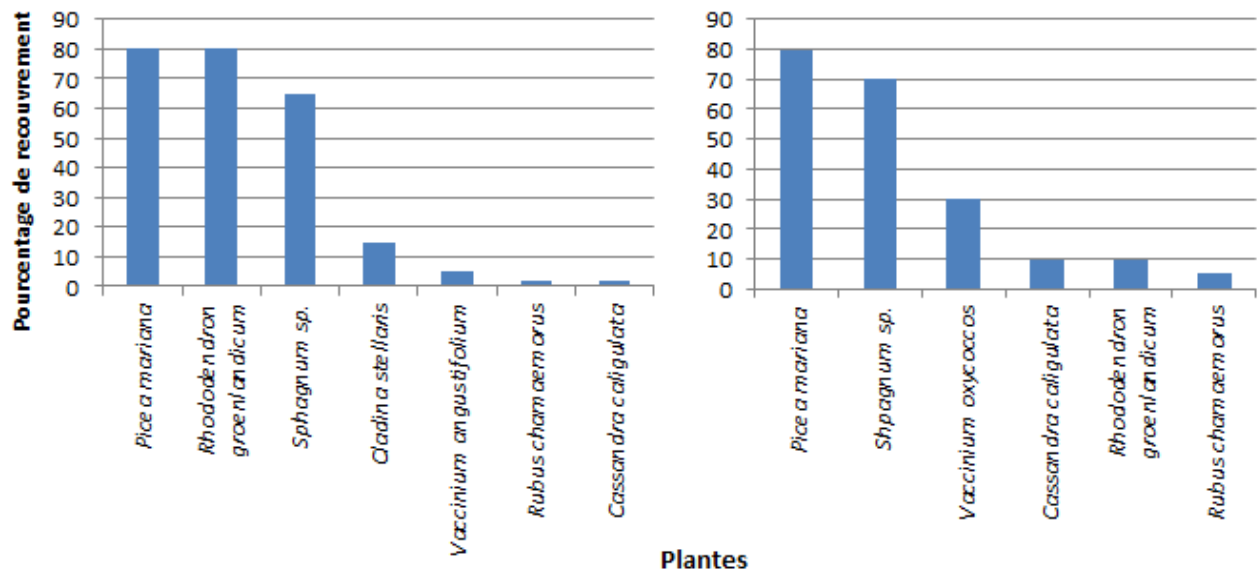


Figure 9-7: Composition floristique d'un affleurement rocheux du lac Miron (A)



Figure 9-8: Dessin à l'échelle d'un affleurement rocheux du lac Miron (B), 1 : affleurement rocheux, 2 : gros blocs, 3 : peissière à lichens

9.3.2 Cordons de blocs

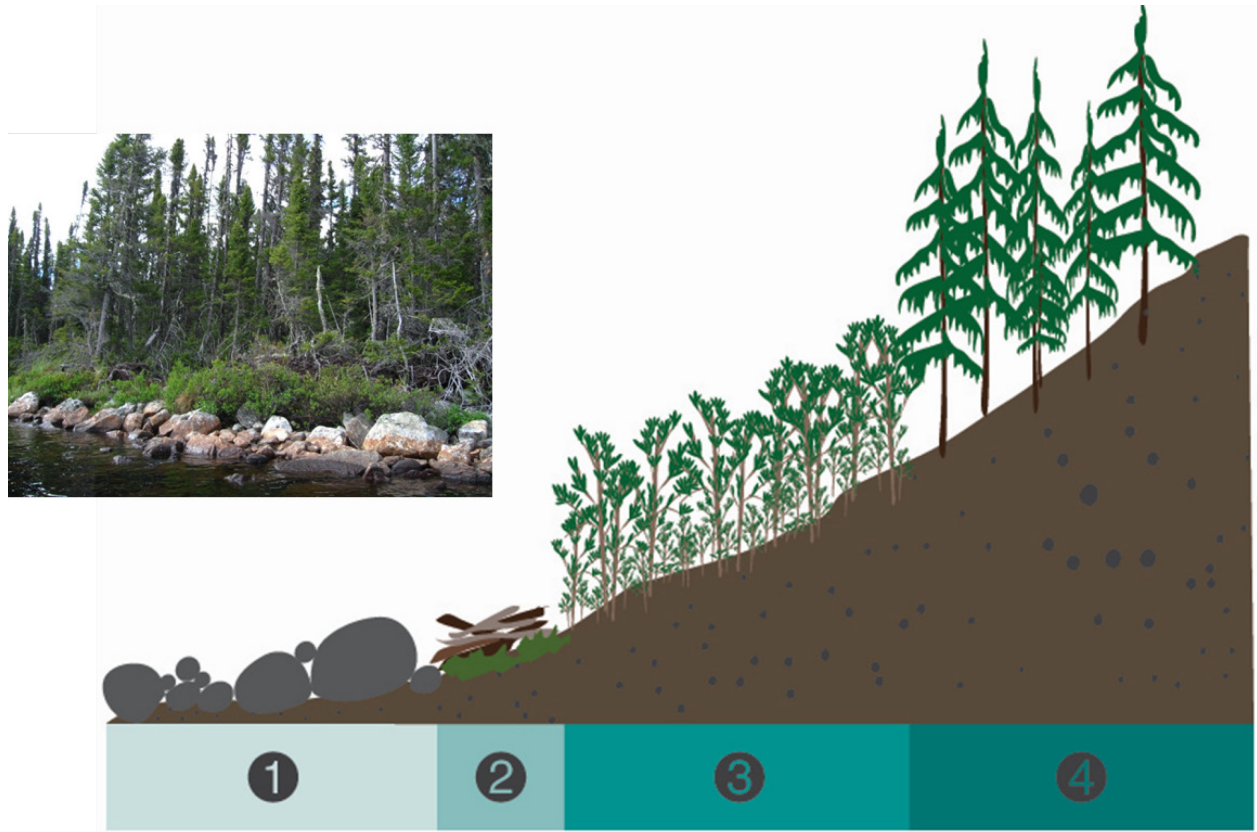


Figure 9-9: Dessin à l'échelle d'un cordon de blocs du lac Miron (A), 1 : cordon de blocs, 2 : talus, 3 : aulnaie, 4 : pessière à lichens

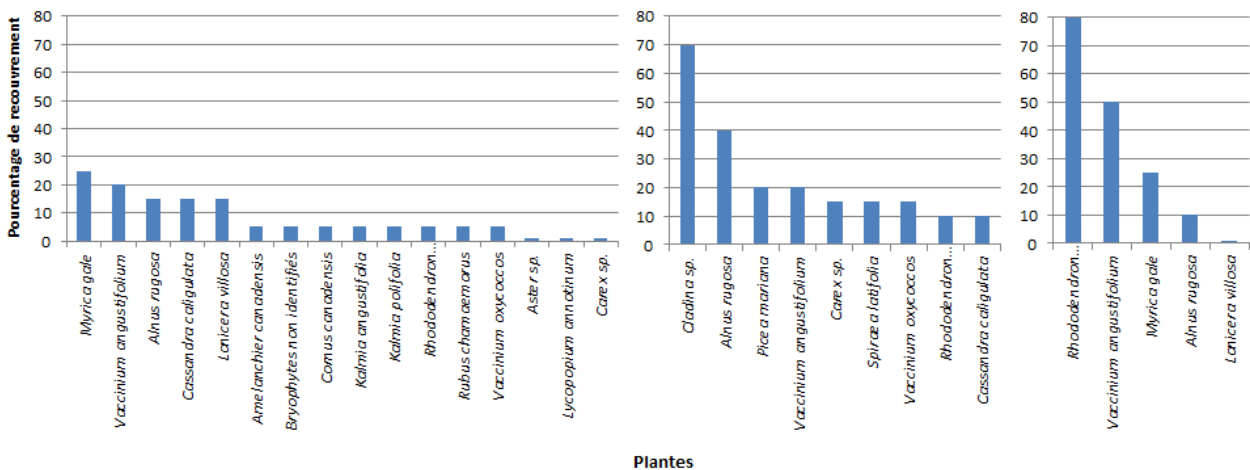


Figure 9-10: Composition floristique d'un cordon de blocs du lac Miron (A)

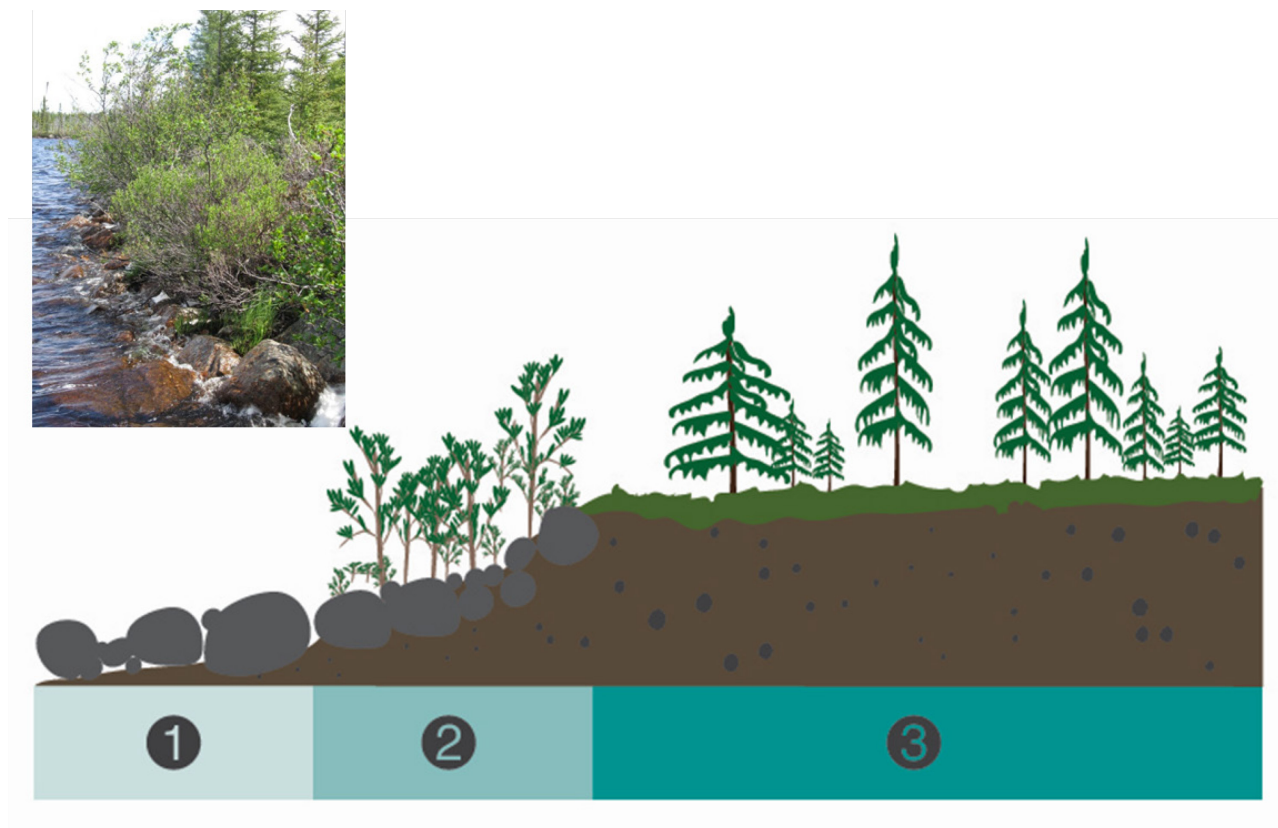


Figure 9-11: Dessin à l'échelle d'un cordon de bloc du lac Miron (B), 1 : cordon de blocs, 2 cordon de blocs et aulnaie, 3 : pessière à lichens partiellement brûlée avec régénération.

9.3.3 Plages



Figure 9-12: Dessin à l'échelle d'une plage du lac Miron (A), 1 : sable, 2 : platière, 3 : zone arbustive, 4 : zone forestière

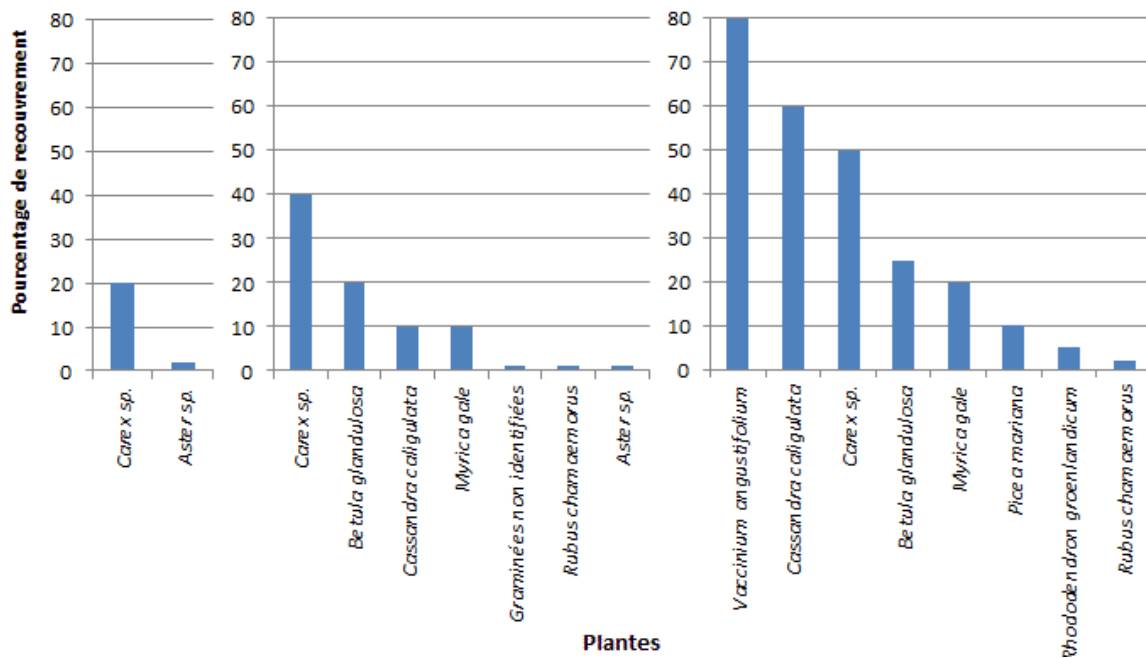


Figure 9-13: Composition floristique d'une plage du lac Miron (A)

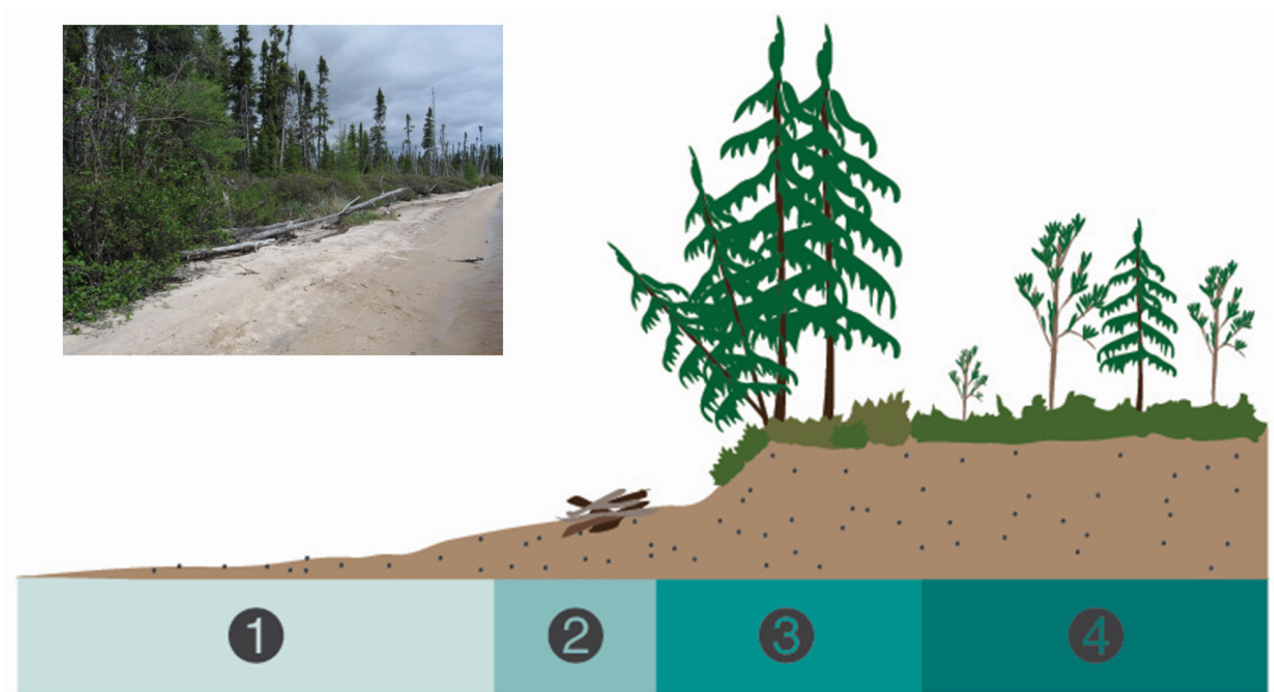


Figure 9-14: Dessin à l'échelle d'une plage du lac Miron (B), 1 : sable, 2 : talus de sapement, 3 :
pessière à lichens, 4 : humus forestier

9.3.4 Platière



Figure 9-15: Dessin à l'échelle d'une platière du lac Miron, 1 : petit talus, 2 : platière. 3 : pessière à lichens

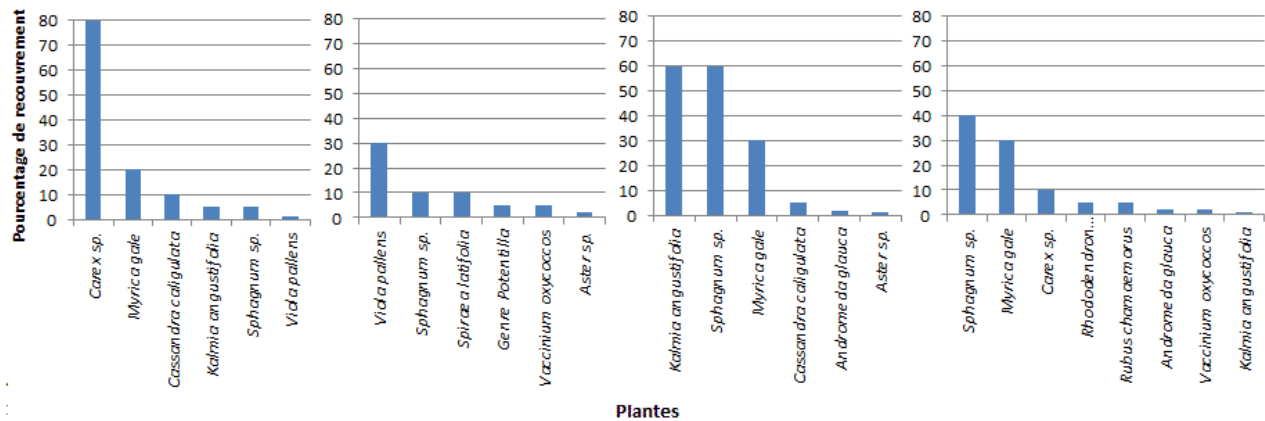


Figure 9-16: Composition floristique d'une platière du lac Miron

9.3.5 Talus organique en érosion

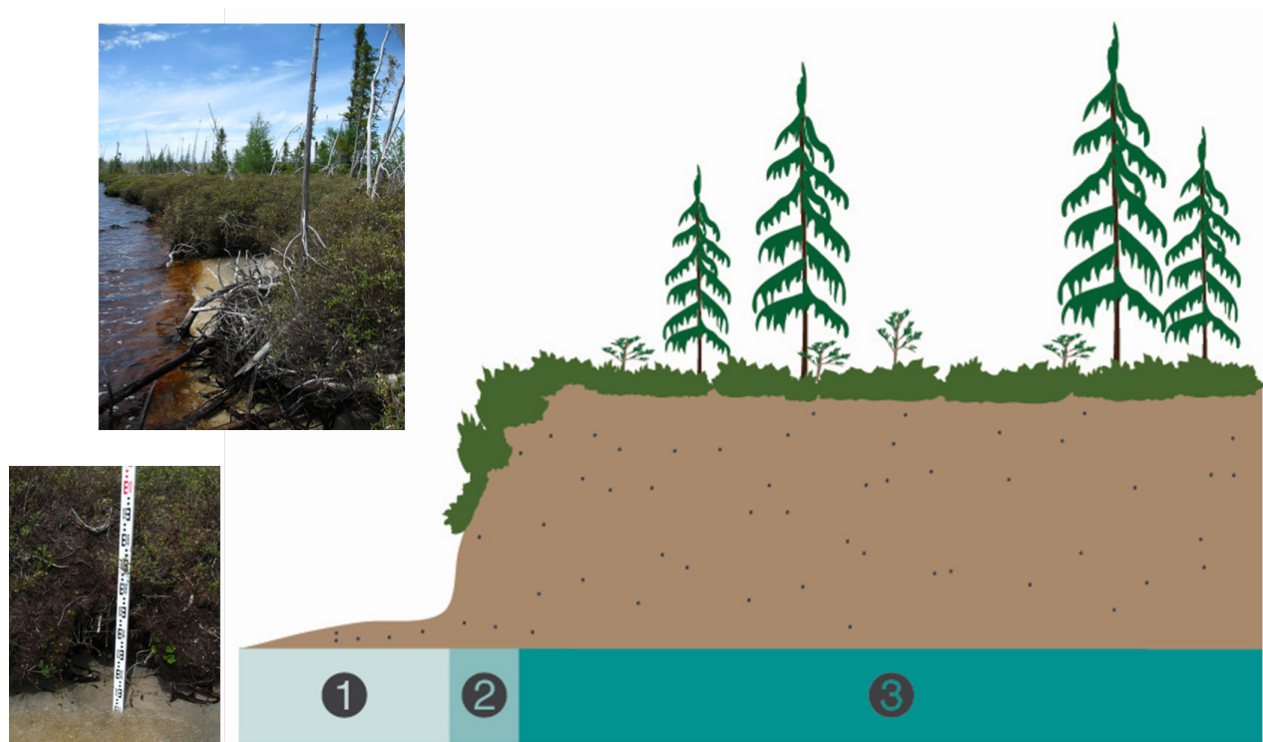


Figure 9-17: Dessin à l'échelle d'un talus en érosion du lac Miron, 1 : sable, 2 : talus, 3 : tourbière forestière partiellement brûlée

9.4 Cartes thématiques des caractéristiques géomorphologiques et physiques des rives

9.4.1 Rivages du lac Rodayer

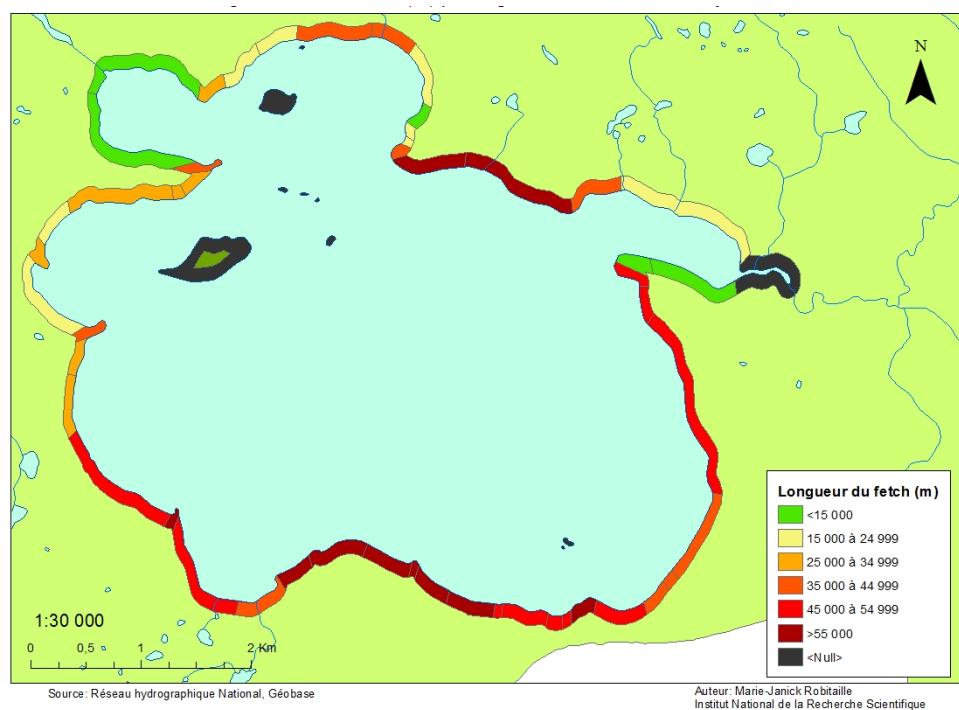


Figure 9-18 : Longueur du fetch total (m) par segment de rive au lac Rodayer

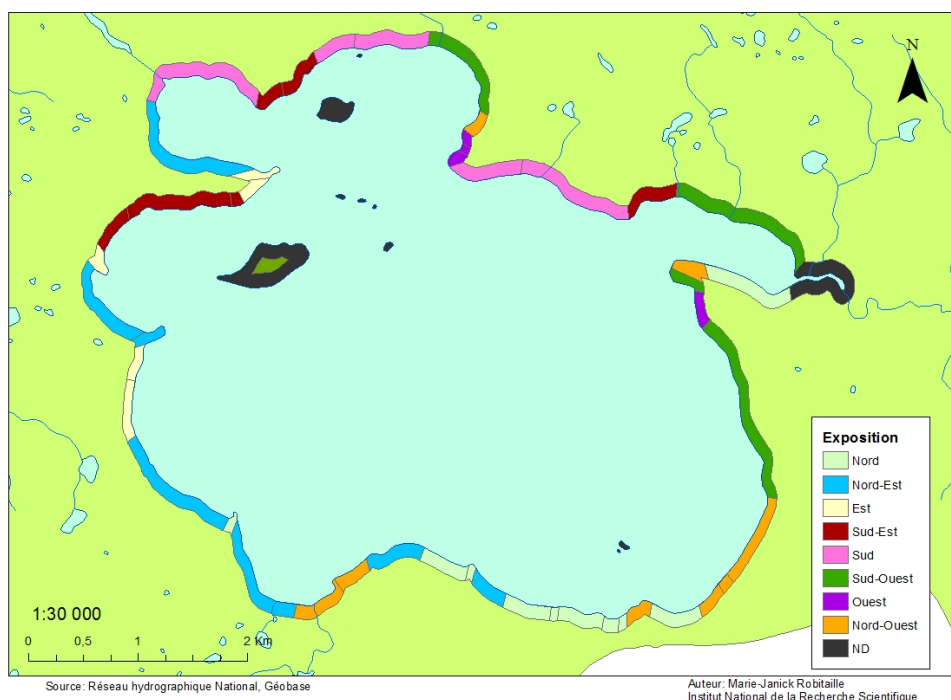


Figure 9-19 :Orientation de l'exposition des rives au lac Rodayer

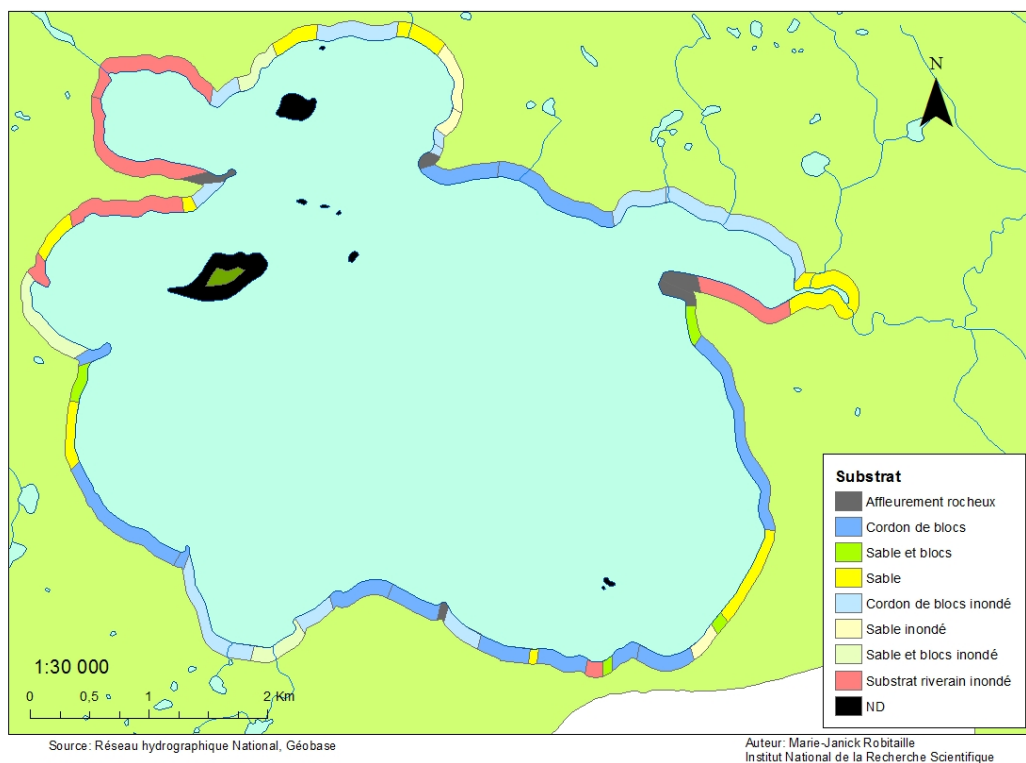


Figure 9-20 : Type de substrats riverains au lac Rodayer

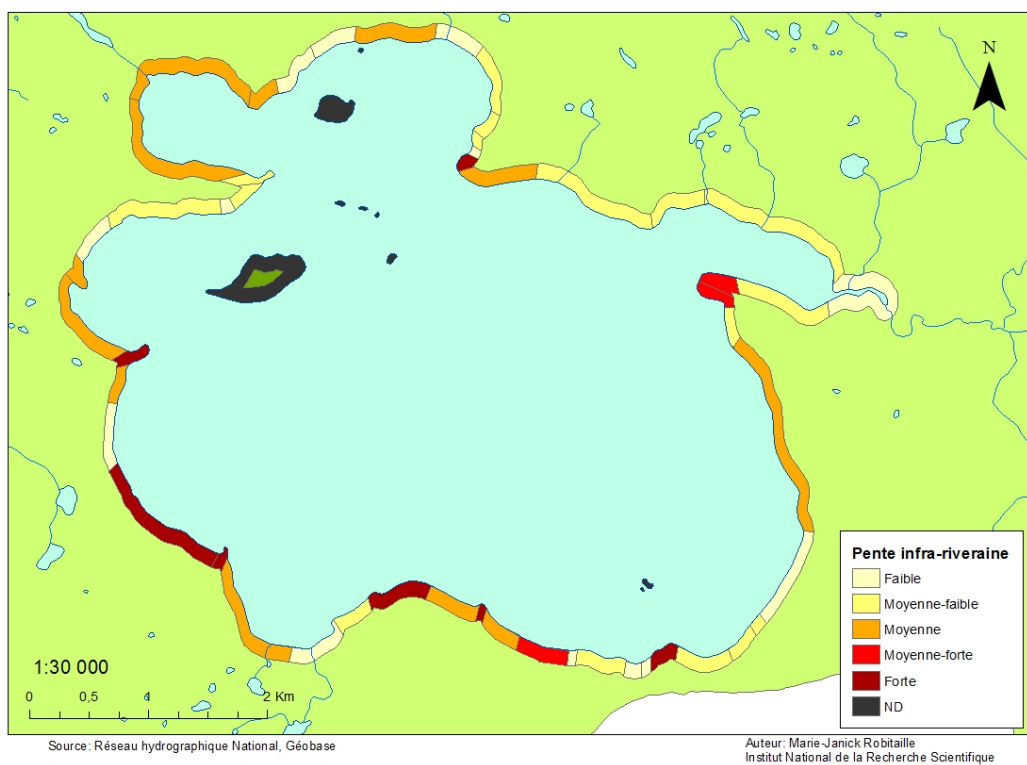


Figure 9-21 : Pente infra-riveraine au lac Rodayer

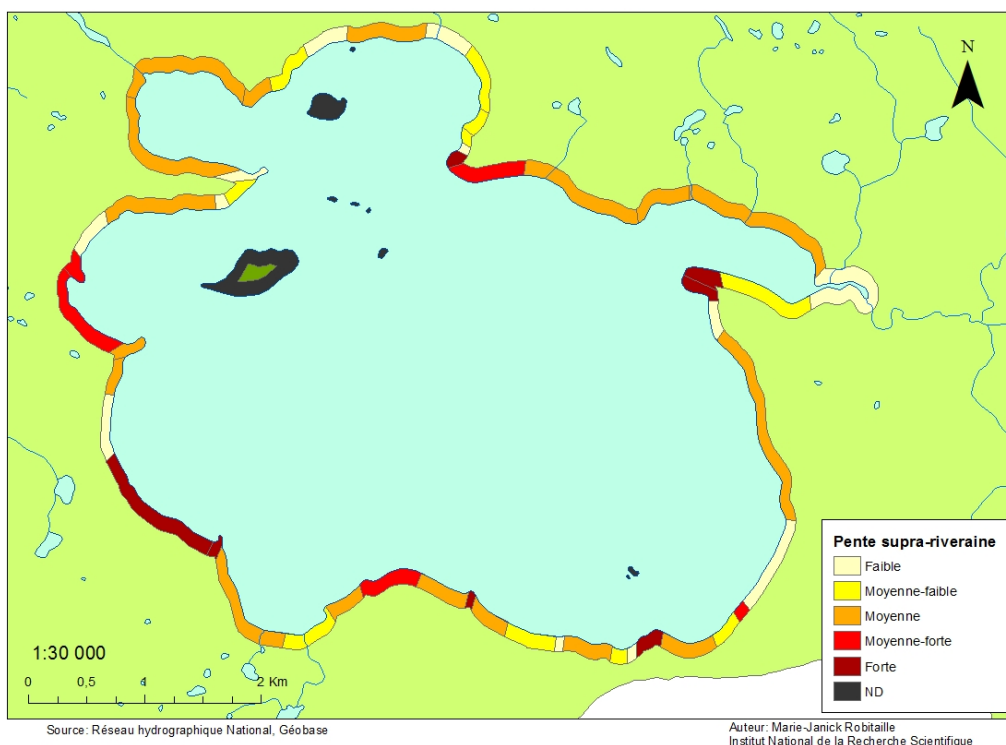


Figure 9-22 : Pente supra-riveraine au lac Rodayer

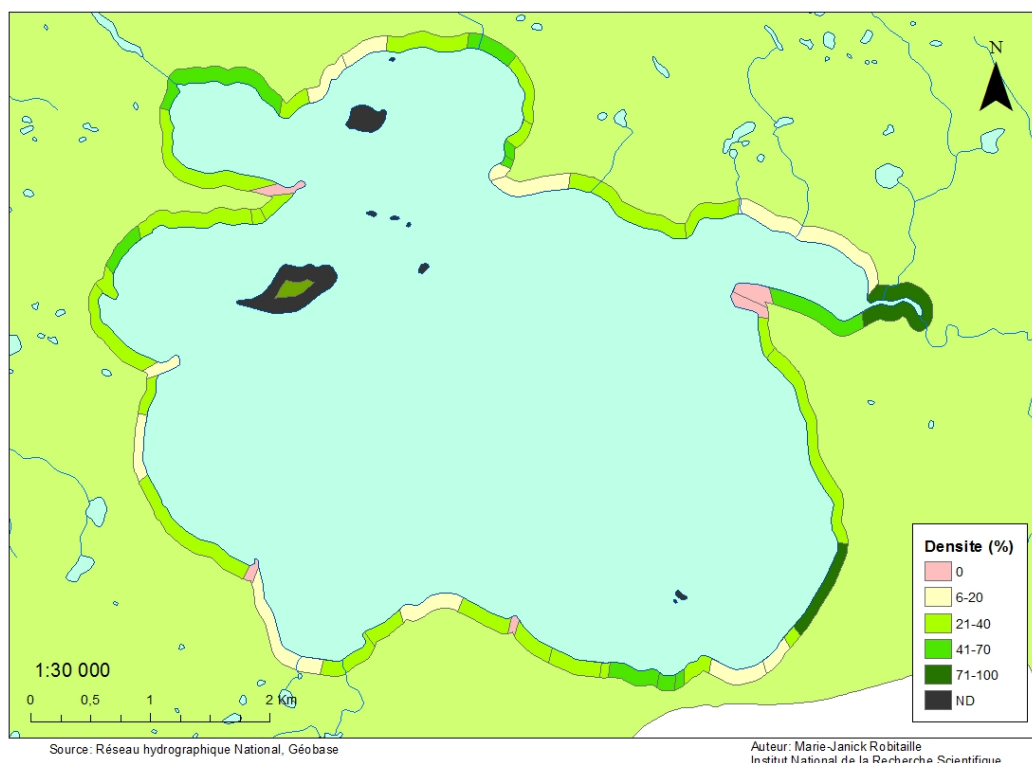


Figure 9-23 : Densité de la végétation arbustive protégeant les zones arborées riveraines au lac Rodayer

9.4.2 Rivages du lac Mirabelli

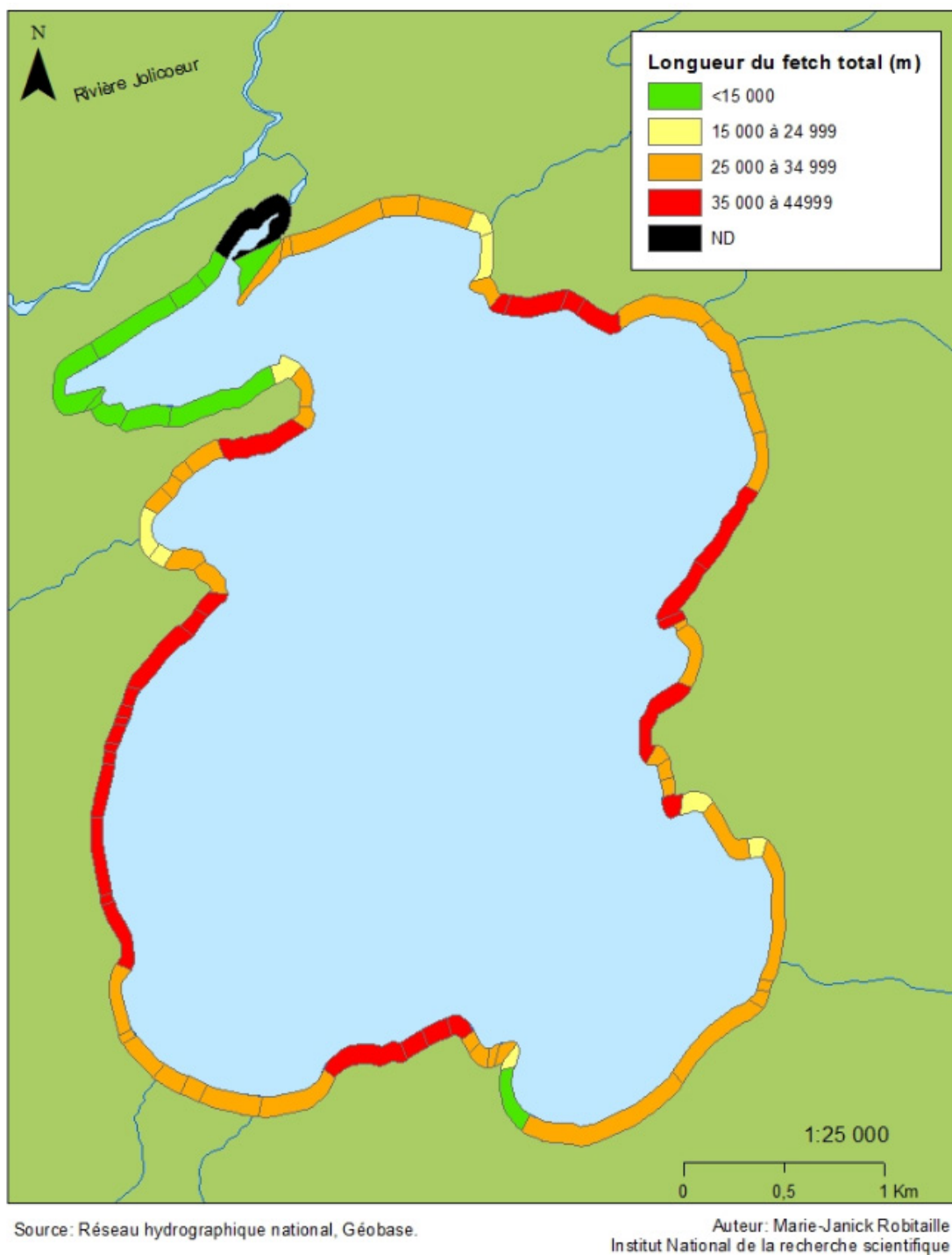
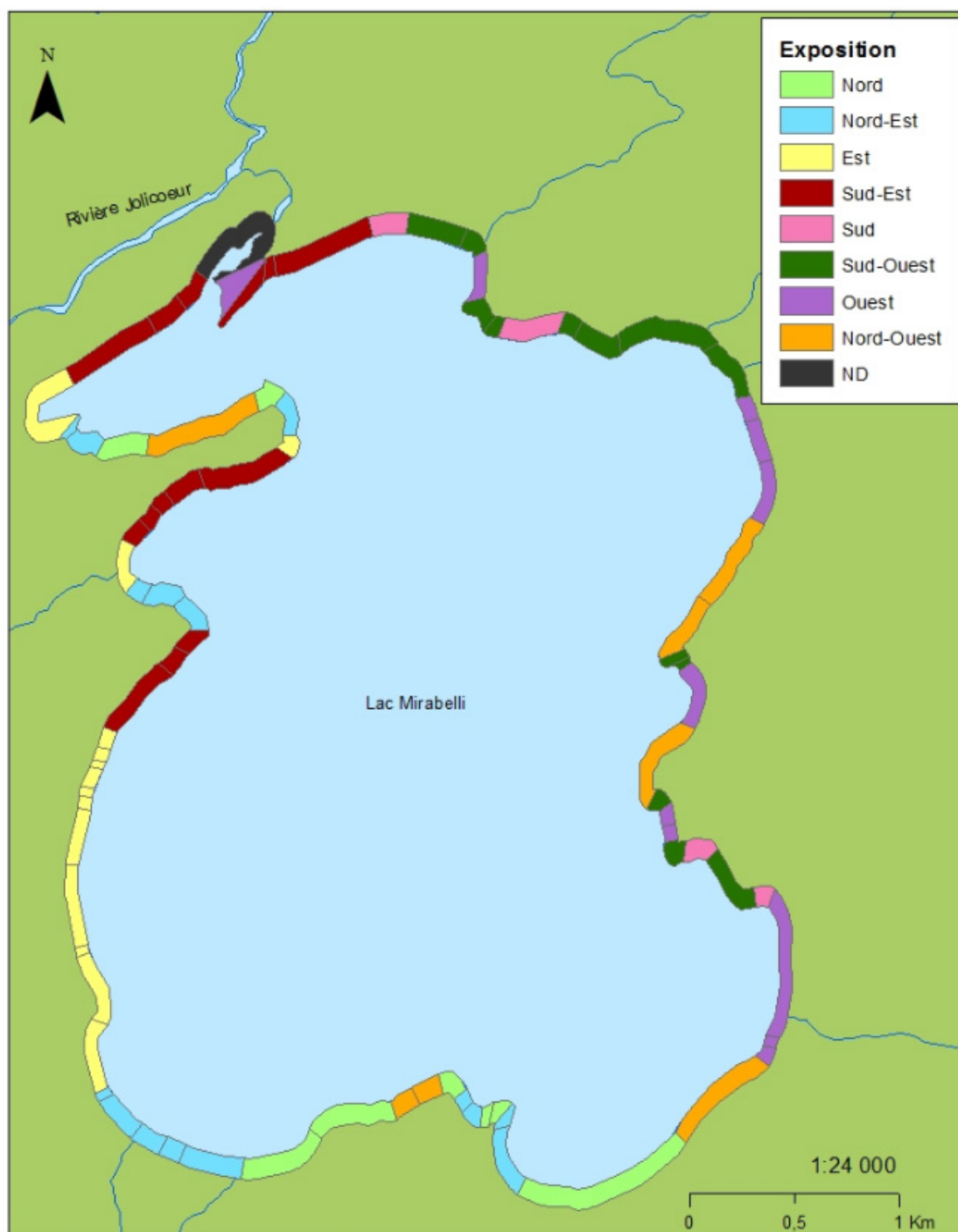


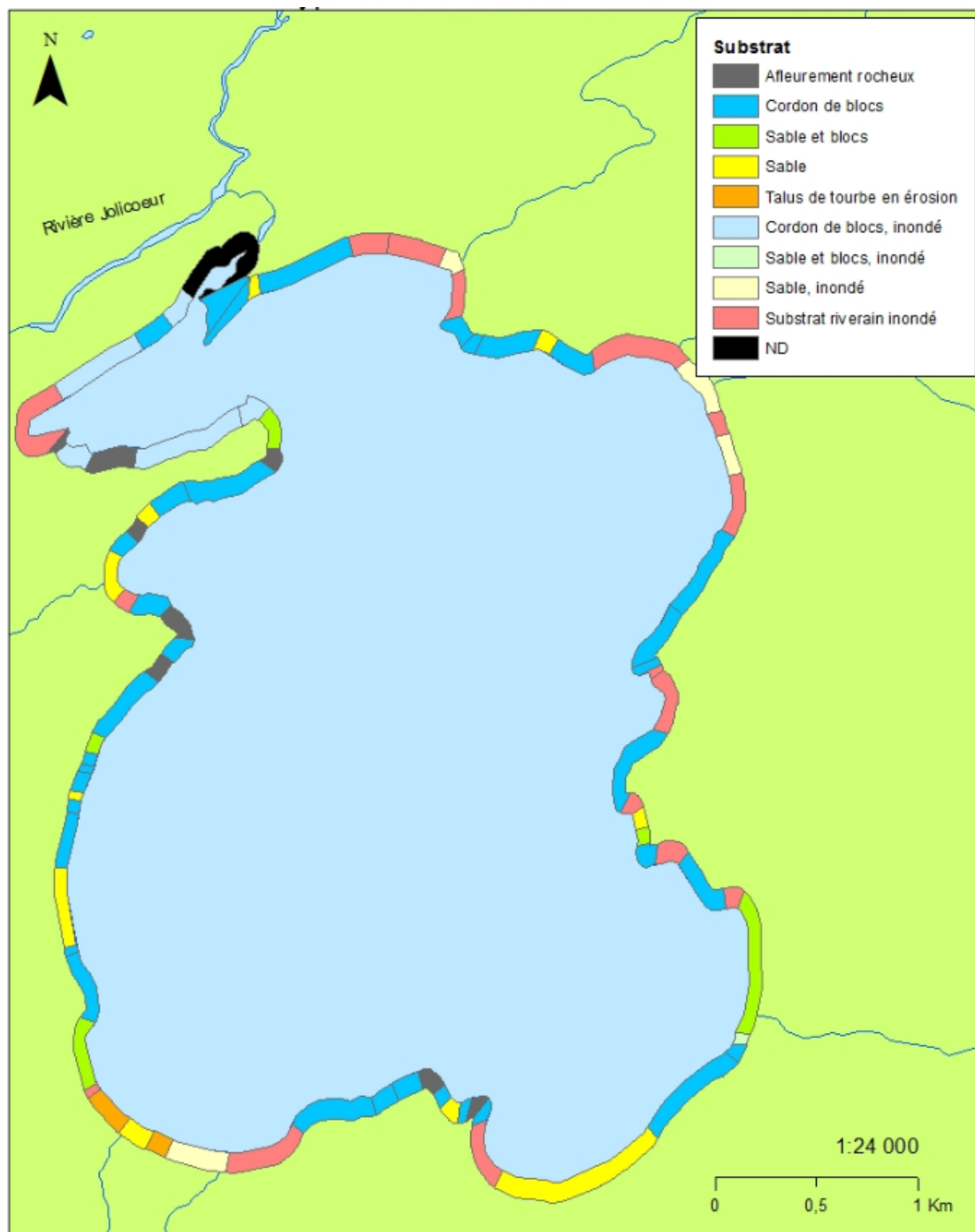
Figure 9-24: Longueur du fetch total par segment de rive du lac Mirabelli



Source: Réseau hydrographique national, Géobase.

Auteur: Marie-Janick Robitaille
Institut National de la recherche scientifique

Figure 9-25: Orientation de l'exposition des rives au lac Mirabelli



Source: Réseau hydrographique national, Géobase.

Auteur: Marie-Janick Robitaille
Institut National de la recherche scientifique

Figure 9-26: Type de substrat au lac Mirabelli

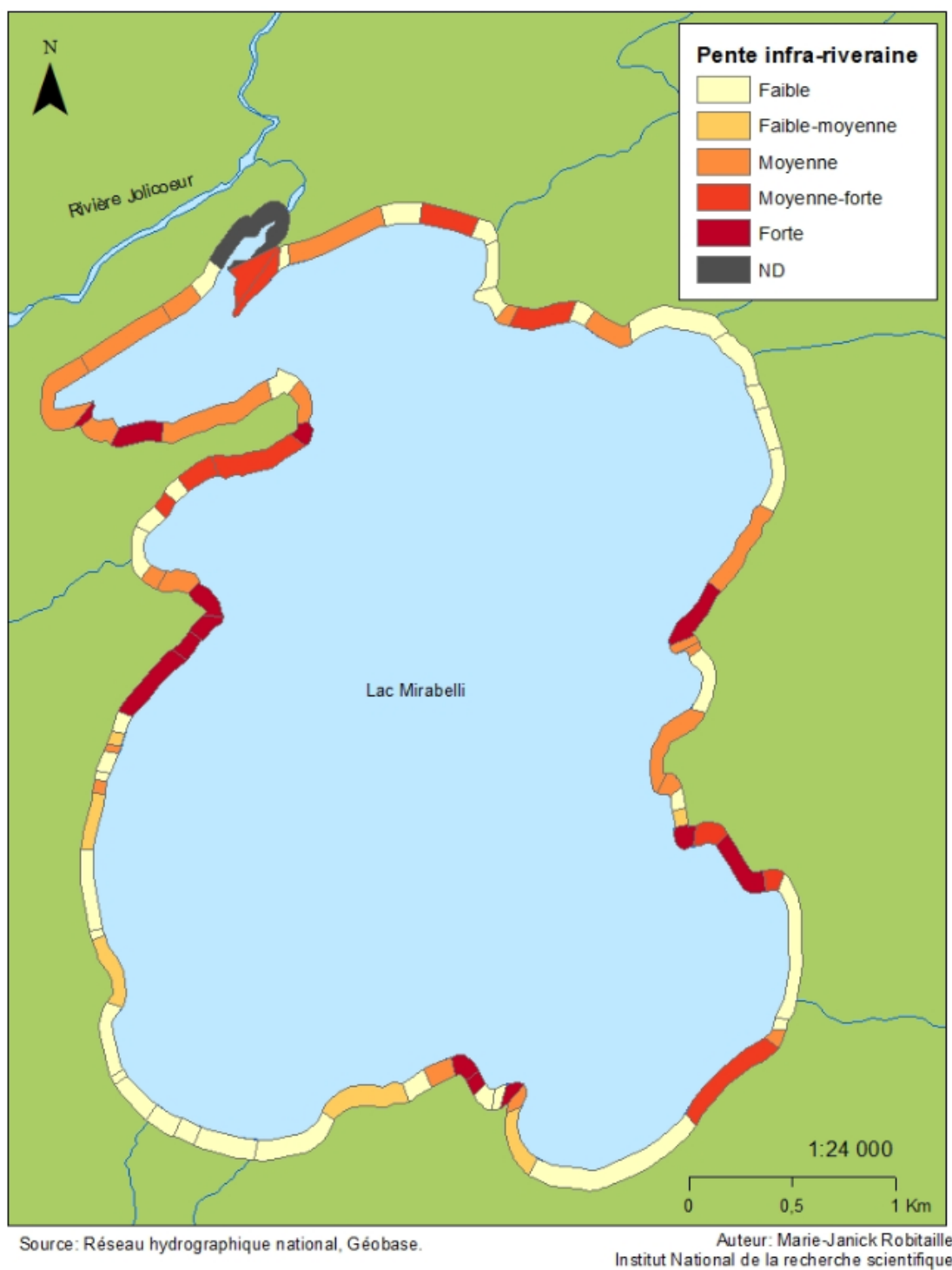


Figure 9-27: Pente infra-riveraine au lac Mirabelli

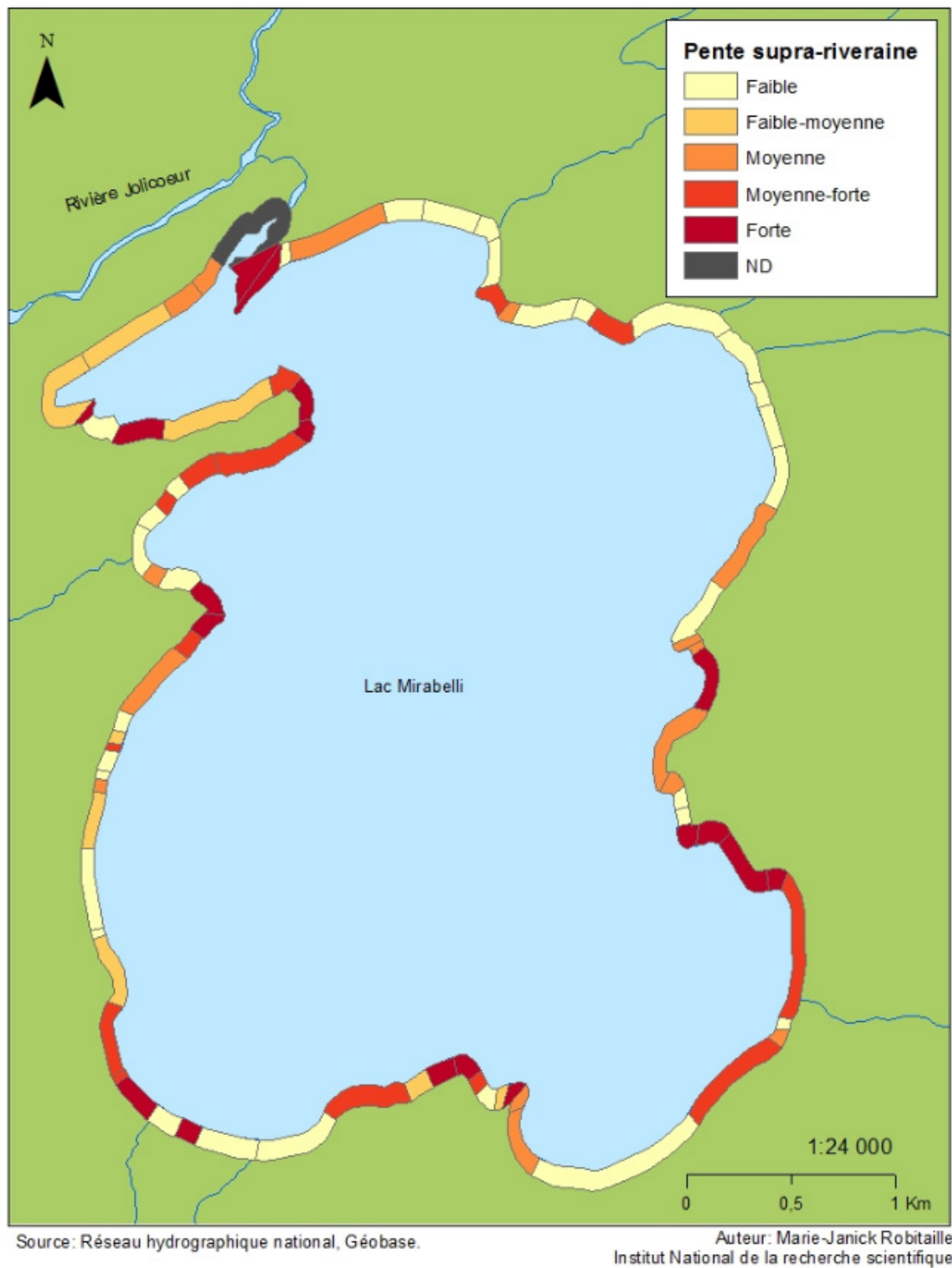
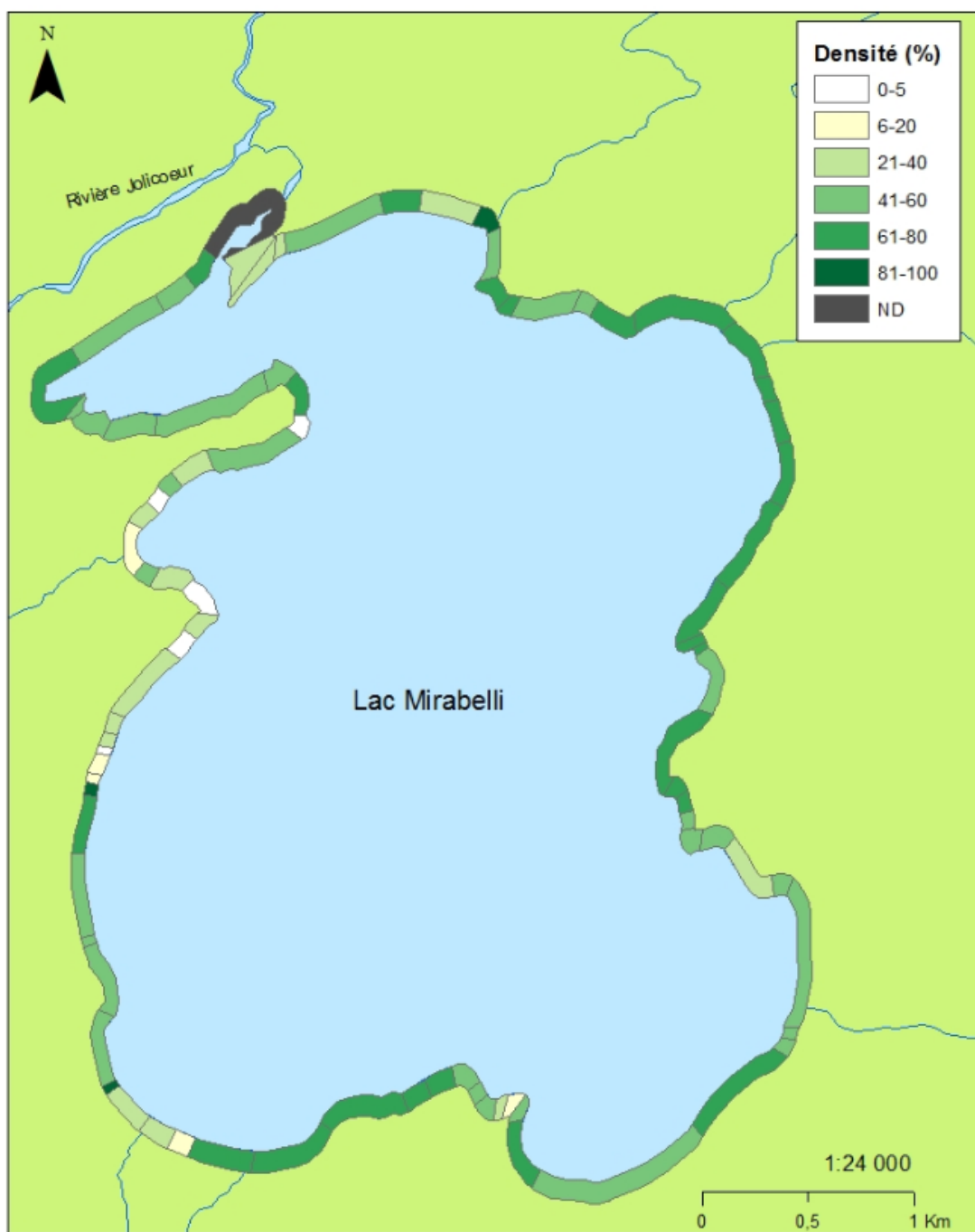


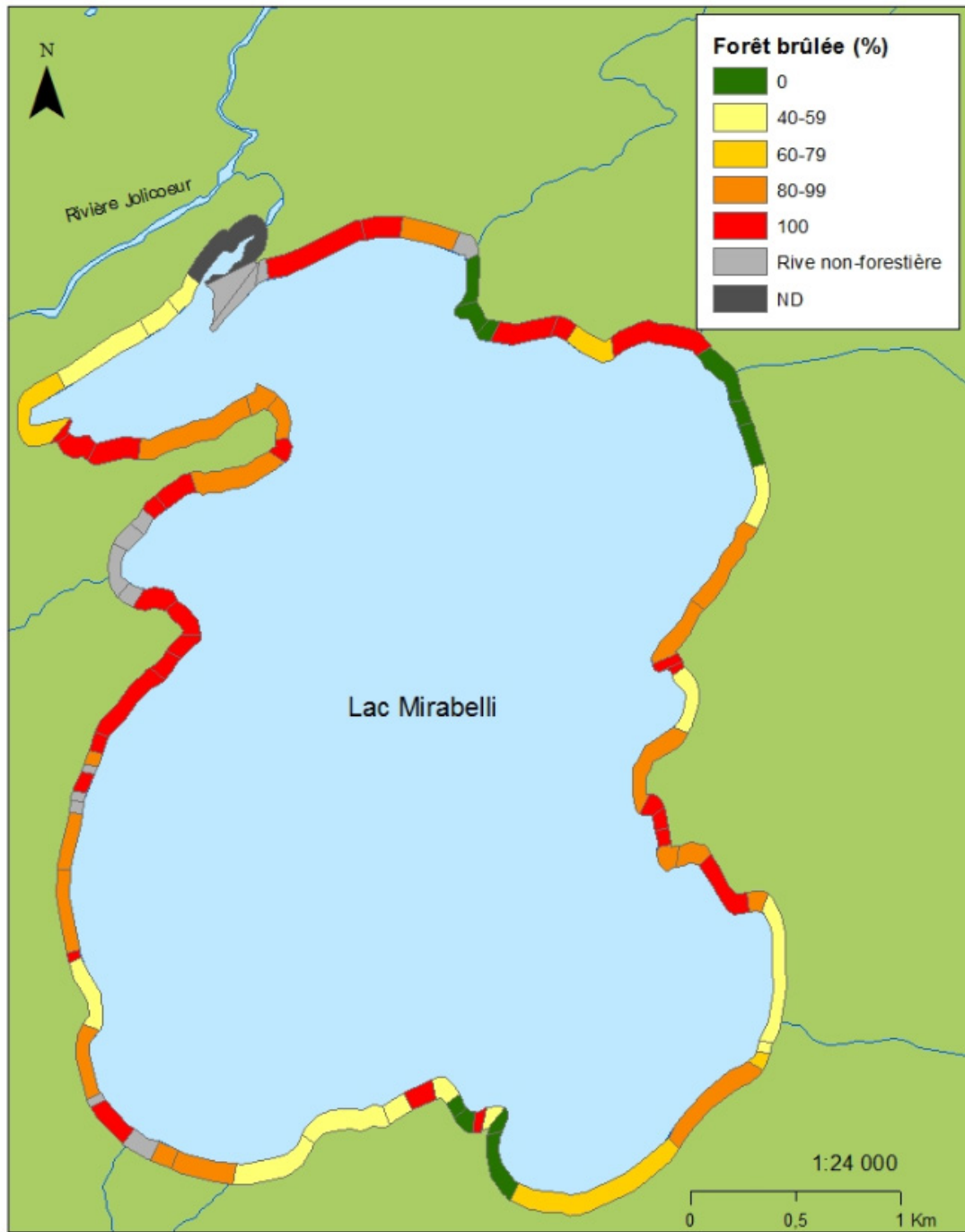
Figure 9-28: Pente supra-riveraine au lac Mirabelli



Source: Réseau hydrographique national, GéoBase.

Auteur: Marie-Janick Robitaille
Institut National de la recherche scientifique

Figure 9-29: Densité de la végétation arbustive protégeant les zones arborées riveraines au lac Mirabelli



Source: Réseau hydrographique national, Géobase.

Auteur: Marie-Janick Robitaille
Institut National de la recherche scientifique

Figure 9-30: Pourcentage de forêt brûlée des zones riveraines au lac Mirabelli

9.4.3. Rivages du lac Miron

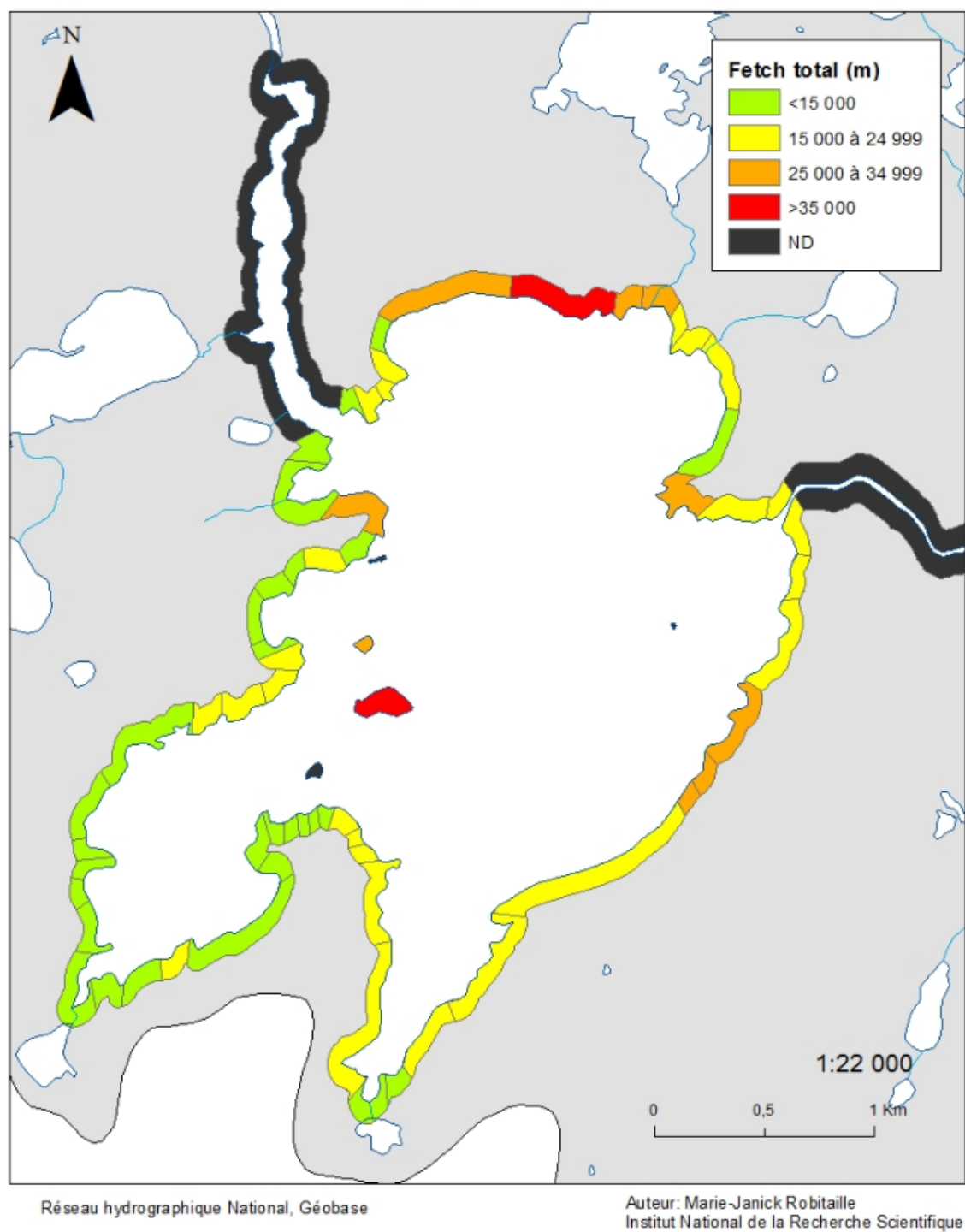


Figure 9-31: Longueur de fetch total par segment de rive au lac Miron

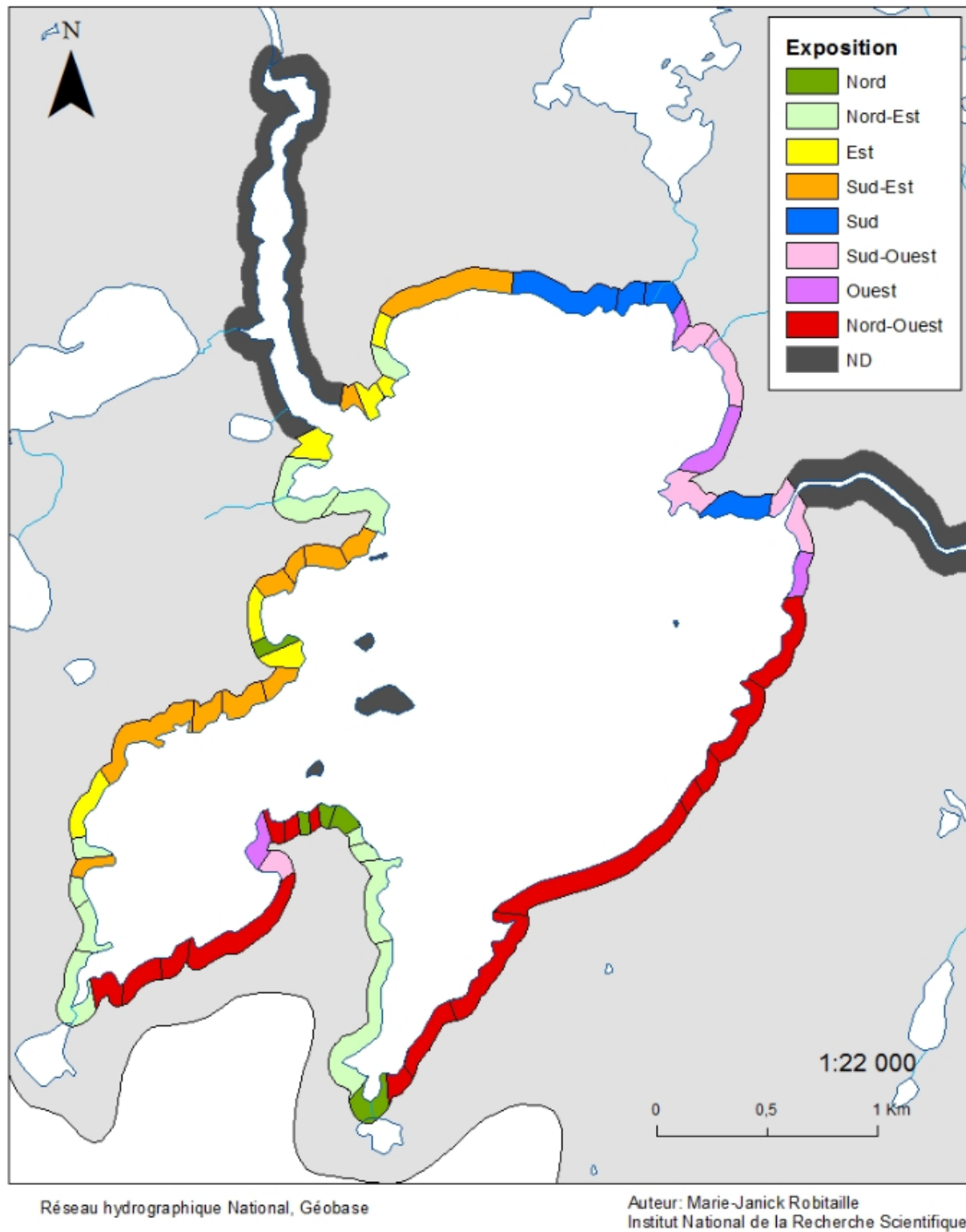


Figure 9-32: Orientation de l'exposition des rives au lac Miron

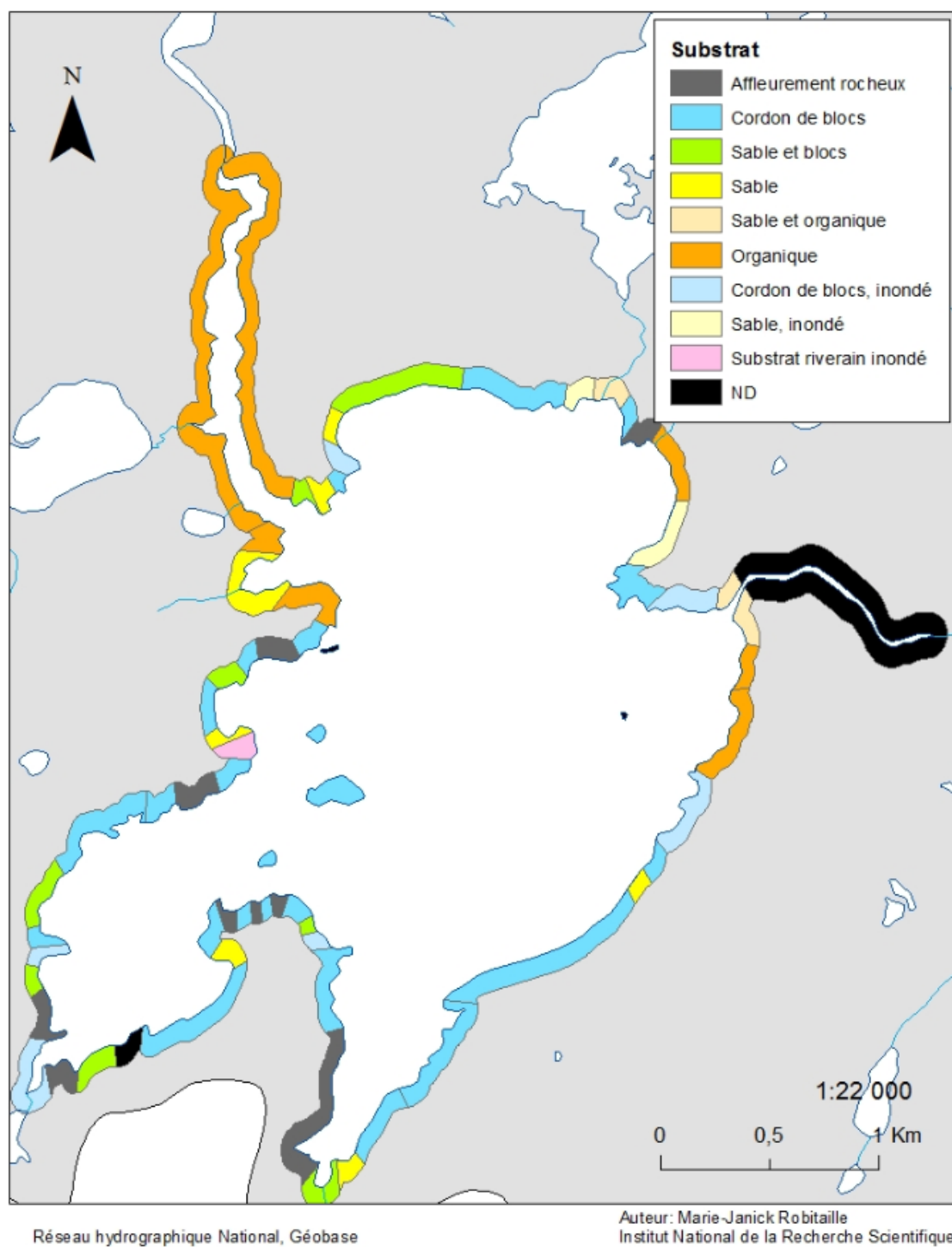


Figure 9-33: Type de substrats riverains au lac Miron

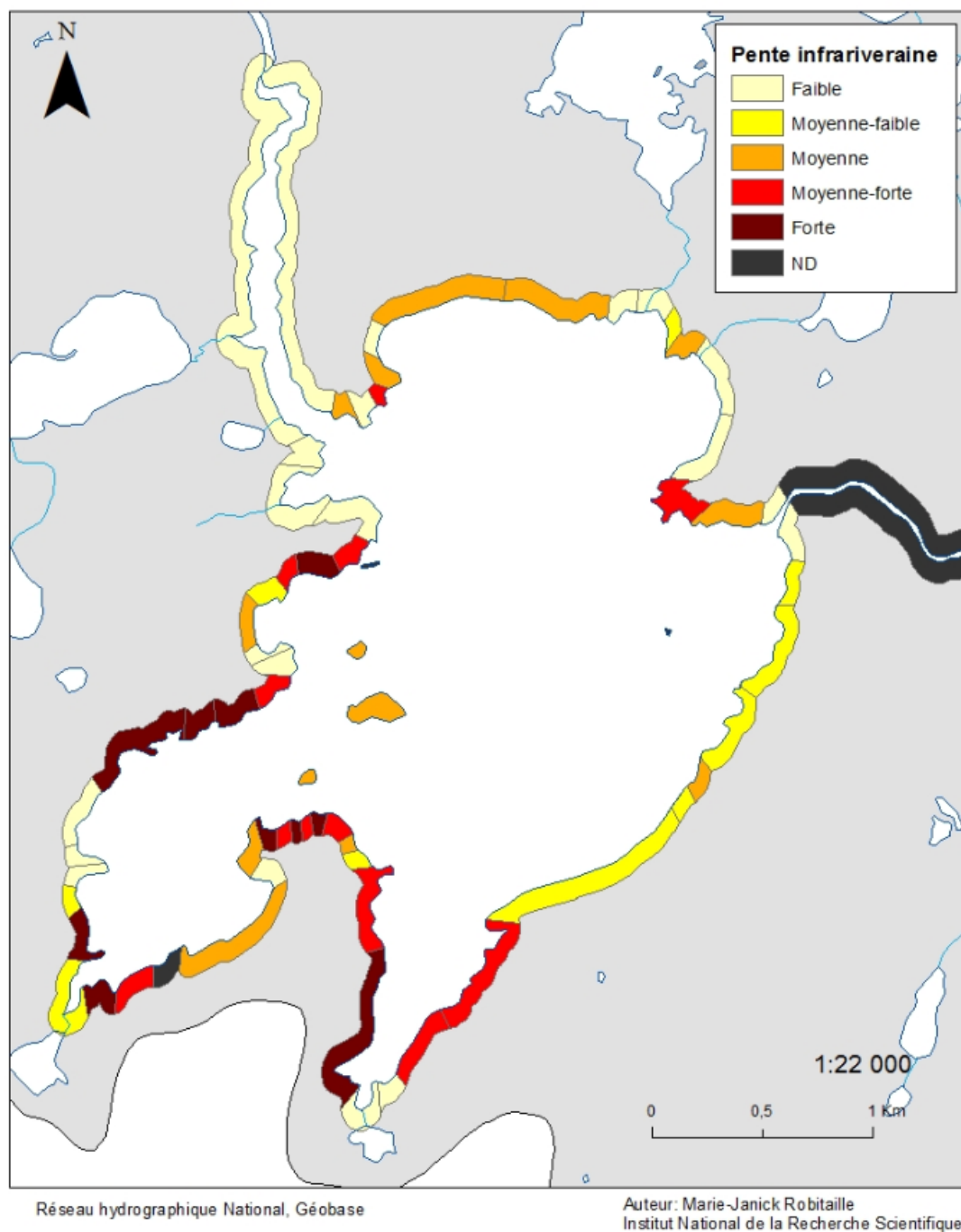


Figure 9-34: Pente infra-riveraine au lac Miron

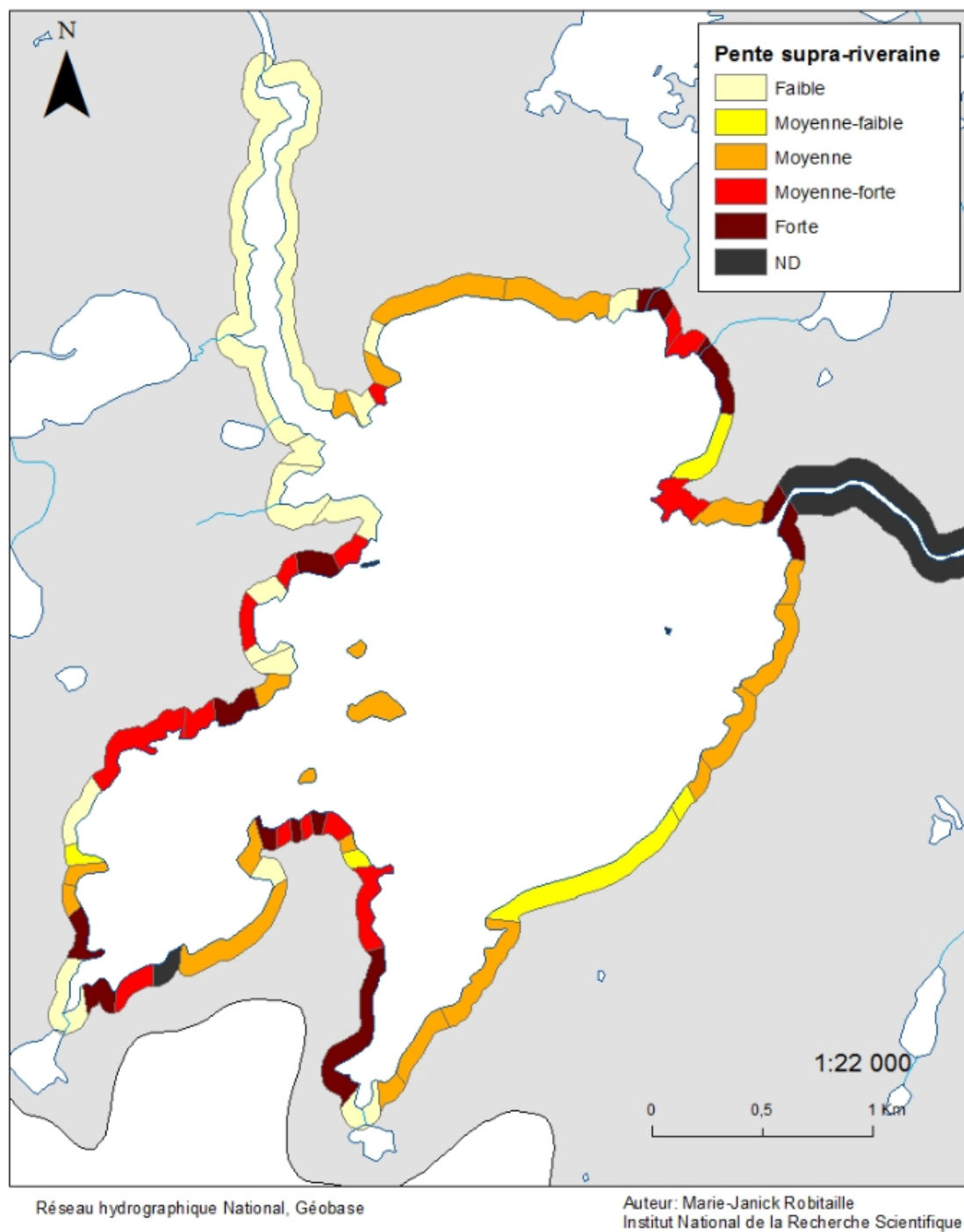


Figure 9-35: Pente supra-riveraine au lac Miron

