Département de géomatique appliquée

Université de Sherbrooke

Les lacs karstiques de l'île d'Anticosti : analyse hydrogéomorphologique

Danielle Côté, Jean-Marie Dubois, Bernard Hétu et Q.H.J Gwyn

Bulletin de recherche n° 181

ISSN 1713-7667

Décembre 2006

Résumé

L'originalité du modelé karstique de l'île d'Anticosti tient à la présence de dolines en milieu lacustre. La grande perméabilité des calcaires et le rôle de drains naturels joué par les dolines permet des variations bi-annuelles du niveau des eaux, et ce pour la plupart des lacs du centre de l'île. Ces variations sont contrôlées par l'hydrologie de surface et par l'évaporation, mais aussi et surtout, par les battements de la nappe phréatique et par le réseau karstique souterrain. On distingue trois types de lacs en fonction de l'amplitude des variations : 1) lacs relativement stables, 2) lacs à niveau variable à vidange complète et 3) lacs à niveau variable à vidange partielle. Les variations du niveau des lacs ouvrent la voie à des processus littoraux, glaciels et périglaciaires très originaux. En plus des caractères géomorphologiques, chaque type de lac présente des caractères morphodynamiques, écologiques et hydrochimiques qui lui sont propres. Ces variations du niveau des eaux (jusqu'à 7 m d'amplitude) influencent le développement morphométrique des dolines lacustres et leur forme en entonnoir ou en soucoupe.

L'analyse chimique de plus de 190 échantillons d'eau de surface et souterraine a démontré que, dans l'ensemble, les eaux des lacs sont fortement chargées en CO_2, sous-saturées en calcite et présentent des duretés ($CaCO_3$ équivalent) allant de 84 à 109 mg/l de Ca^2+ plus Mg^2+. Ces teneurs affichent une hausse progressive au cours de l'été, et ce même si les concentrations en CO_2 fluctuent. Les résultats de l'analyse hydrochimique des lacs révèlent une séparation des groupes chimiques des eaux qui correspond bien au trois types de lacs karstiques. Les résultats de l'analyse discriminante linéaire suggèrent les mêmes correspondances. Les eaux avec le plus grand potentiel de dissolution se retrouvent dans les lacs à niveau variable avec vidange complète.

Toutes ces caractéristiques environnementales permettent de bien distinguer les différents types de lacs entre eux, d'en proposer une classification et de les inscrire dans un modèle d'évolution où le moteur principal serait la karstification.

Tables des matières

Liste des figures ii
Liste des tableaux ii
Avant-propos iii

1. Introduction 1

2. Cadre physique 2

3. Contexte géomorphologique des lacs étudiés 3

4. Hydrologie 5

5. Dolines lacustres 12

6. Caractéristiques floristiques des rivages lacustres 15

7. Hydrochimie 17

7.1. Caractéristiques générales des eaux 17

7.2. Évolution des paramètres hydrochimiques dans les lacs 17

7.3. Cas du lac Smith : comportement spatial des paramètres chimiques 20

8. Conclusion 20

9. Références 21

Listes des figures

1 - Localisation de l'île d'Anticosti 3

2 - Localisation des principales zones de karst de l'île d'Anticosti et de la zone d'étude 4

3 - Catégories de karst de l'île d'Anticosti 5

4 - Catégories de drainage karstique de l'île d'Anticosti 6

5 - Abaissement cumulatif des eaux des lacs Smith et Mystérieux pendant les étés 1982 à 1984 . 7

6 - Variation rapide du niveau du lac Mystérieux au début de l'été : situation entre le 15 juin et le 3 juillet 1984 9

7 - Comparaison entre le débit du lac Smith et celui de la résurgence à l'été 1984 11

8 - Abaissement partiel du niveau du lac Smith le 18 août 1973, laissant apparaître une bonne partie du réseau de dolines 12

9 - Fréquence des longueurs, des largeurs, des profondeurs et des pentes des dolines des lacs Smith et Mystérieux 13

10 - Illustration de la zonation de la végétation riveraine du lac Smith 16

11 - Évolution du CaCO3 dans les lacs Smith et Mystérieux pendant les étés de 1982 (haut) et de 1983 (bas) 19

Liste des tableaux

1 - Catégorisation et caractéristiques des lacs karstiques 1

2 - Rapport entre le débit du lac Smith et celui de la résurgence en juin et juillet 1984 2

Avant-propos

Le texte de ce bulletin a été oublié dans les archives des auteurs pendant plus de 15 ans. Il est basé sur des données, parfois limitées, de plus de 20 ans, mais aucune recherche n'ayant été faite sur le sujet à l'île d'Anticosti depuis cette époque, nous croyons qu'elles peuvent servir de base de réflexion pour des recherches futures, sur l'île ou ailleurs.

1. Introduction

La dynamique des karsts dans les régions tempérées froides (type D de Köppen) n'est pas aussi bien connue que dans les autres systèmes morphoclimatiques, par exemple les milieux méditerranéens ou encore tropicaux, où les études abondent (Monroe, 1968 ; Williams, 1971 ; Smith *et al*., 1972, Brown et Ford, 1973 ; Day, 1976). Pourtant la dynamique des karsts en milieu tempéré froid est originale (Van Everdingen, 1981), en particulier son régime hydrologique qui est contrôlé en bonne partie par la fonte des neiges au printemps. Sur une bonne partie du centre de l'île d'Anticosti, cette fonte se traduit par une recharge brutale de l'aquifère karstique et par le remplissage des lacs dont le niveau s'élève rapidement de plusieurs mètres. À la fin du printemps, les lacs se drainent parfois jusqu'à l'assèchement complet (Côté *et al*., 1987). Ce régime hydrologique particulier interfère avec le développement des zones de végétation en bordure des cuvettes. Il donne lieu également à une dynamique littorale et périglaciaire très originale qui se signale notamment par le développement de géliformes à triage et par l'apparition de formes glacielles (Lauriol *et al*., 1985).

En plus des caractères géomorphologiques, chaque catégorie de lacs (voir début de la section 4) présente des caractères morphodynamiques, écologiques et hydrochimiques qui lui sont propres. Ces caractéristiques seront étudiées dans ce rapport, mais en voici un résumé pour camper le sujet (tableau 1).

Tableau 1 - Typologie et caractéristiques des lacs karstiques

Catégorie de lacs	**Formes**	**Nombre de zones de végétation**	**Abaissement estival du niveau des eaux (cm)**	**$CaCO_3$ (mg/l) moyen**
À niveau stable	Glacielles Cordons de plage	3 ou 4	2 à 3	84
À niveau variable sans assèchement	Glacielles Cordons de plage Géliformes à triage Dolines en forme de soucoupe	7 ou 8	200 à 400	88
À niveau variable avec assèchement	Glacielles Dolines en forme d'entonnoir	5 ou 6	735	109

Tiré de Côté (1987, p. 90)

L'objectif de ce rapport est de décrire le régime hydrologique annuel des lacs karstiques du plateau central de l'île d'Anticosti. On présentera des observations sur les principaux paramètres qui le contrôle ainsi que des données sur la morphométrie des dolines, sur l'écologie végétale et sur la chimie des eaux des lacs karstiques pour deux des trois catégories de lacs, soit les lacs à niveau variable à vidange partielle ou complète, lesquels sont peu connus. Les données sur les lacs stables peuvent être consultées dans Côté (1987). Les objectifs de ce rapport consistent à rendre compte d'un modelé original peu connu de karst à dolines en milieu lacustre, du comportement des lacs à niveau variable et à montrer l'évolution de ces lacs karstiques. Les

données hydrologiques sont interprétées dans le contexte d'un système régional d'écoulement des eaux souterraines dans la zone du plateau anticostien.

Les premiers travaux détaillés sur le karst de l'île ont été effectués par Roberge (1979), Robert et Ford (1983) et Cadieux (1983) et traitent respectivement de l'hydrogéomorphologie des rivières aux Saumons et Jupiter. Par la suite, St-Pierre (1983) et Roberge *et al*. (1985) ont travaillé sur la morphogénèse de la caverne à la Patate et Côté (1984, 1987), Lauriol *et al*. (1985), Côté (1984, 1987) et Côté *et al*. (1987, 1990) sur l'hydrogéomorphologie des lacs karstiques de l'île d'Anticosti.

Dans l'ensemble, peu de travaux traitent du karst en milieu lacustre à part ceux de Brown (1971) et de Kruse (1980) en Alberta, de Karolyi (1978) à Terre-Neuve, de Brook et Ford (1980) au Yukon et de Van Everdignen (1981) dans les Territoires du Nord-Ouest. Plusieurs de ces études mentionnent les lacs à niveau variable, mais ne traite pas de façon très détaillée des différentes catégories de lacs et des processus reliés aux variations du niveau des lacs.

2. Cadre physique

L'île d'Anticosti est localisée dans le nord du golfe du Saint-Laurent et elle fait partie de la partie est des Basses-terres du Saint-Laurent (figure 1). Elle est composée de roches calcaires datant de l'Ordovicien supérieur au Silurien. Ces roches, peu déformées et légèrement inclinées vers le SSO (pendage de 0,5^{o} à 2°), constituent un relief de cuestas dont les fronts principaux font face au NNE. On trouve deux zones karstiques principales : celle de la haute rivière aux Saumons, qui a déjà été étudiée par Roberge (1979) et Roberge et Ford (1983), et celle qui intéresse ici, localisée au nord de la rivière Jupiter (figure 2), et qui a commencé à être étudiée par Cadieux (1983) et Côté (1984, 1987). Les lacs karstiques se retrouvent sur toute l'île et n'occupent pas de faciès lithologique particulier. Leur concentration est toutefois plus importante sur le plateau, dans le centre de l'île. Les fractures sont très fréquentes sur tout le territoire, bien qu'elles semblent plus denses sur le plateau, là où la couverture de till est faible ou absente par endroits. Les principaux réseaux de fractures sont orientés 020° et 110°.

L'île est recouverte d'une forêt subarctique hudsonienne avec *Picea mariana* (Mill.), *Picea glauca* (Moench) Voss., *Abies balsamea* (L.) Mill. et *Betula papyrifera* Marsh, comme espèces dominantes. Toutefois, certains secteurs ont été déboisés ou incendiés. On peut toutefois constater que les lacs à niveau variable sont présents sur tout le territoire anticostien et que les feux de forêt n'expliquent en rien les variations de leur niveau, mais ils influencent l'amplitude et la vitesse des variations.

Une couverture de till, commune sur l'île, se présente sous forme de placages discontinus, dont l'épaisseur est habituellement inférieure à 1 m. Le sol qui s'y est développé est mince. Le temps de réponse des eaux en lien avec l'infiltration et le ruissellement est donc très court. Le drainage est habituellement excellent sauf aux endroits où une couverture de formations meubles imperméables (till, sédiments littoraux, etc.) inhibe l'infiltration. En outre, le sol brûlé et décapé de la zone incendiée ne fait qu'accentuer la hausse printanière du niveau des lacs et des rivières en favorisant le ruissellement superficiel.

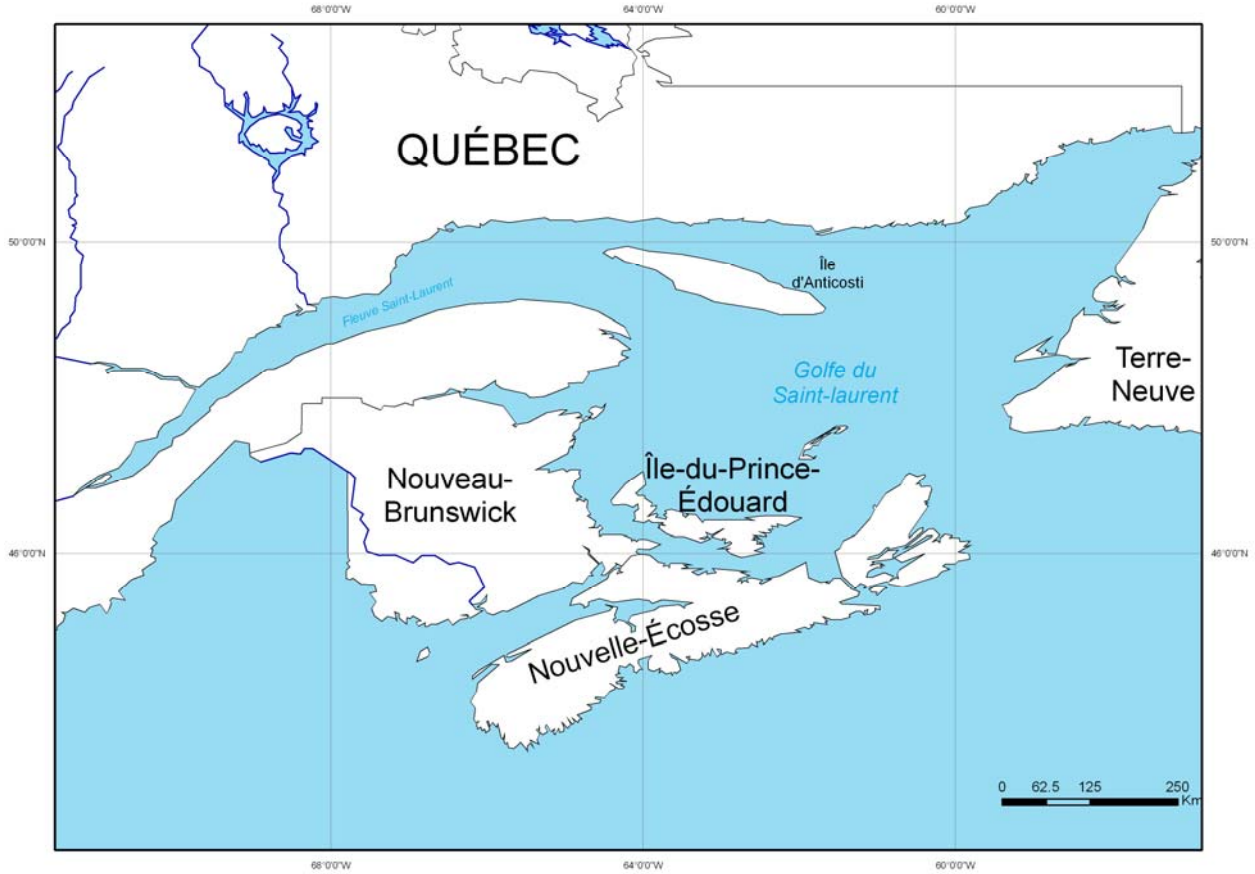
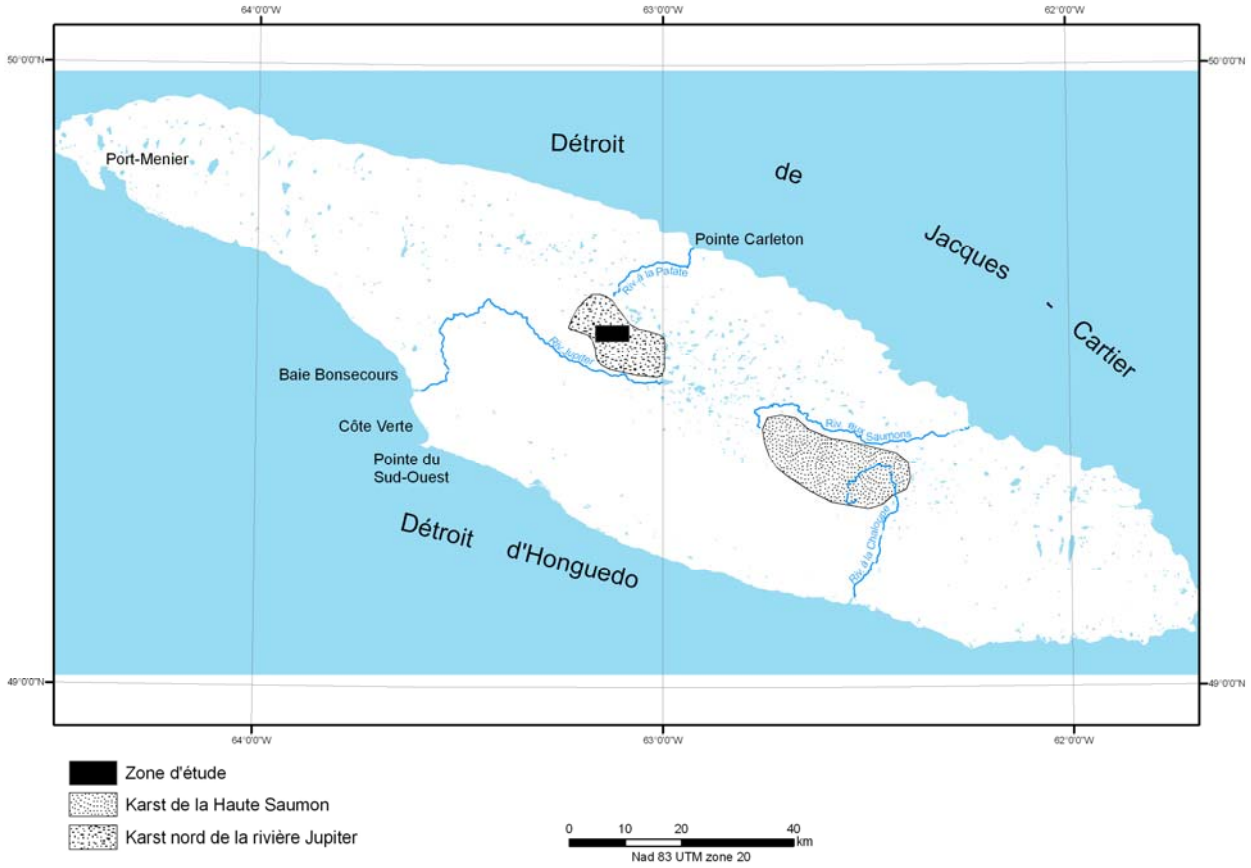


Figure 1 - Localisation de l'île d'Anticosti

L'enclavement de l'île dans le golfe du Saint-Laurent et la proximité du courant du Labrador influencent son climat tempéré froid en lui donnant un caractère plus maritime que continental. Les hivers de l'île sont donc moins froids et les étés plus frais que ceux qui sont connus à la même latitude ailleurs sur le continent. Les précipitations moyennes annuelles sont de 890 mm (station de Port-Menier : 1941-1970), dont 34 % (298 mm) tombe sous forme de neige entre les mois d'octobre et de mai.

3. Contexte géomorphologique des lacs étudiés

Les lacs étudiés sont localisés sur le plateau central, en position d'interfluve, sur la ligne de partage des eaux entre les bassins hydrographiques des côtes nord et sud (figure 1). Dans le contexte général du karst de l'île, ils se situent dans la zone holokarstique et fluvio-karstique (figure 3).



Modifié de Côté (1987, p. 3)

Figure 2 - Localisation des principales zones de karst de l'île d'Anticosti et de la zone d'étude

La zone holokarstique, la plus efficace du karst par son drainage vertical, se distingue par un gradient hydraulique de surface faible, par un till qui freine un peu l'infiltration des eaux et par la régularité et la densité élevée des fractures. L'évolution du karst s'opère principalement dans cette zone, le long des réseaux de fractures.

La zone fluvio-karstique correspond principalement aux exutoires des lacs qui ne fonctionnent qu'en période de crue printanière.

Dans ces deux systèmes, les eaux de surface se drainent par les fractures. La superficie des lacs est généralement de l'ordre de quelques kilomètres carrés et leur profondeur moyenne approximative de l'ordre de 4 à 5 m.

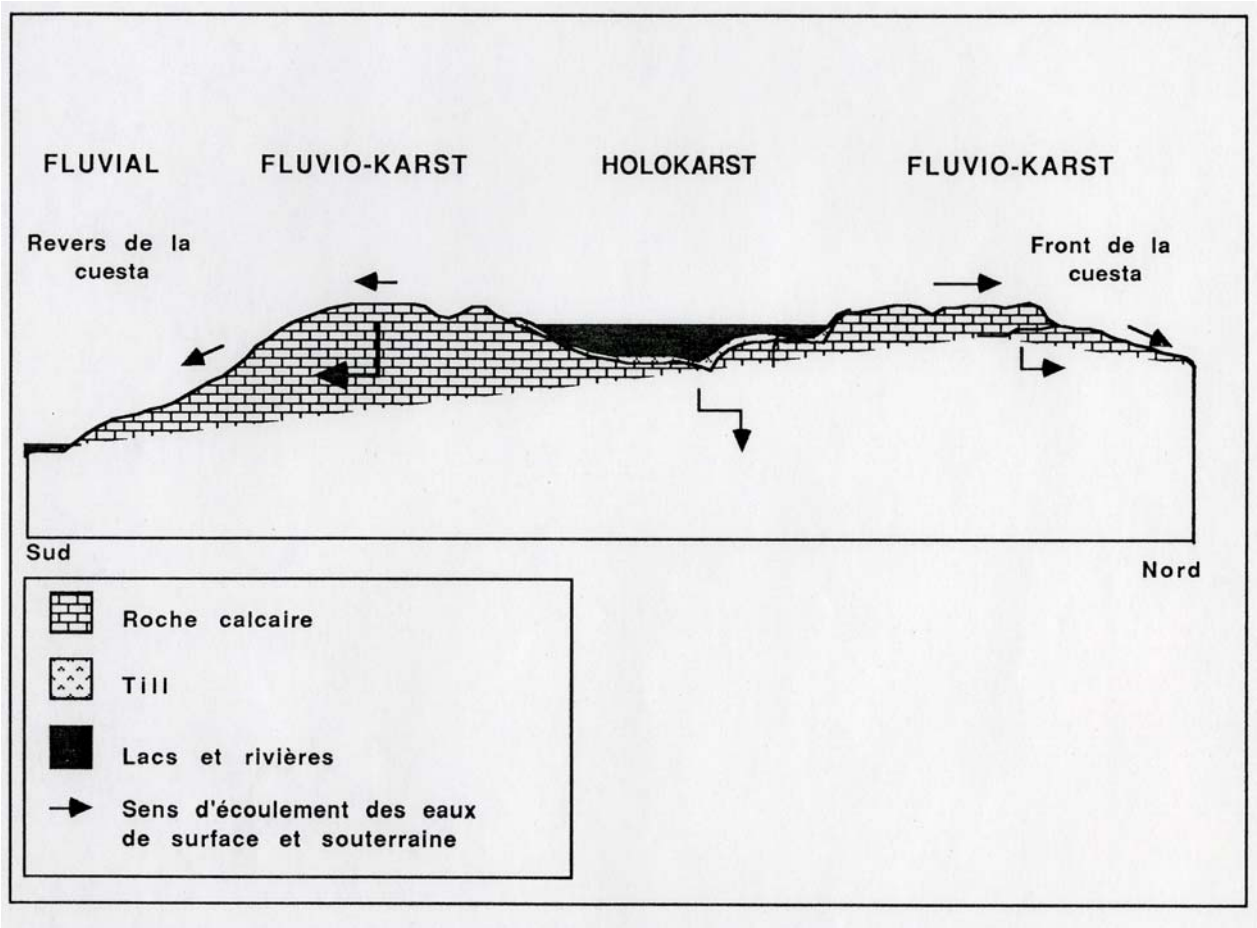


Figure 3 - Catégories de karst de l'île d'Anticosti

Les lacs à niveau constant possèdent des exutoires et des tributaires optimisant le drainage fluvial (figure 4). L'infiltration des eaux dans les fractures du substratum rocheux contribue à leur élargissement par dissolution et le niveau de la nappe phréatique commence alors à varier parallèlement à celui des lacs. À ce stade, le drainage devient fluvio-karstique et le niveau des lacs devient variable. Ces lacs possèdent des tributaires et des exutoires qui ne fonctionnent que lors des crues printanières. Dans le stade avancé, l'ouverture des fractures et l'accélération du drainage sous-terrain entraînent un assèchement complet des lacs en été. Enfin, aucune alimentation par tributaire n'existe et l'exutoire, presque devenu vallée sèche, ne fonctionne que durant les crues printanières exceptionnelles : le drainage devient holokarstique.

4. Hydrologie

Sur l'île, il existe trois catégories de lacs : un qui est de niveau stable (figure 3a) et deux qui fluctuent de niveau, l'un avec vidange partielle (figure 3b) et l'autre avec vidange complète (figure 3c). Nous ne décrivons ici que le régime hydrologique des lacs à niveau variable, soit ceux qui nous intéressent particulièrement. Des mesures prises à intervalle régulier, durant trois étés (1982 à 1984), montrent que les variations du niveau des lacs sont régies par l'évaporation,

les battements de la nappe phréatique ainsi que par l'efficacité du réseau karstique souterrain. Par exemple, l'évaporation représentait 231 mm entre les 20 juin et 24 juillet 1984, alors que les précipitations étaient de 121 mm.

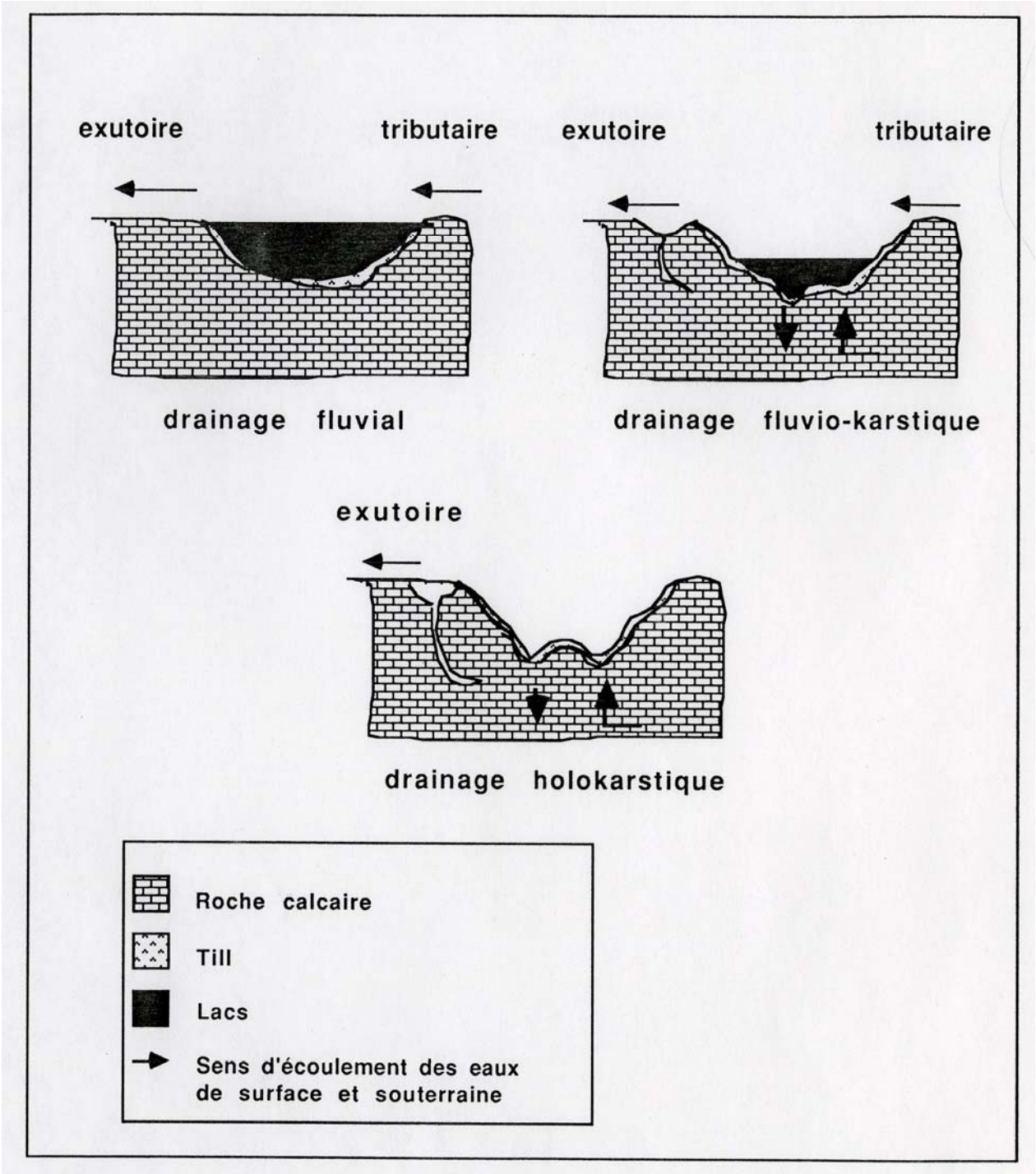


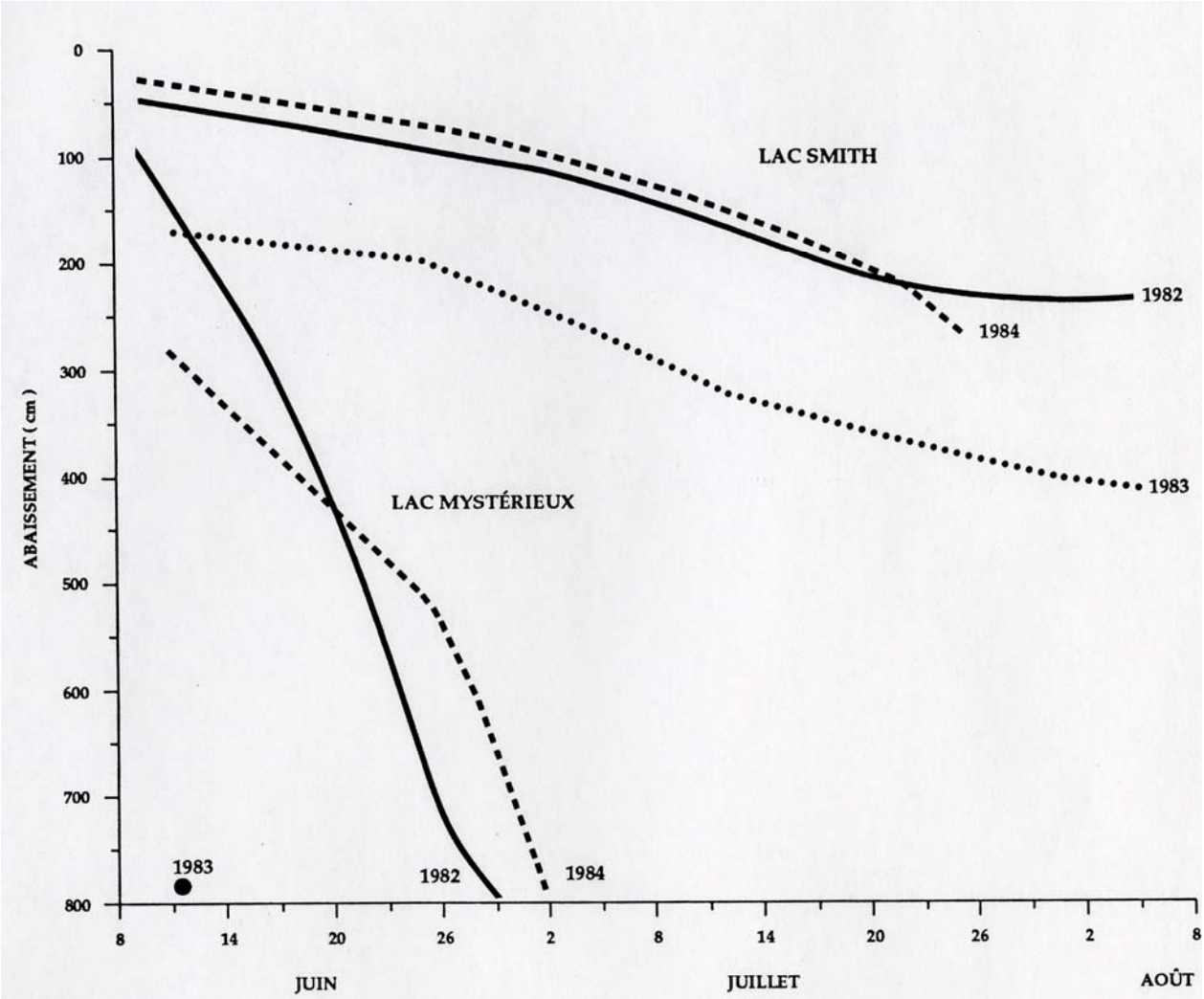
Figure 4 - Catégories de drainage karstique de l'île d'Anticosti

Les lacs à niveau variable subissent une vidange partielle ou complète une fois l'an, entre juin et septembre. L'abaissement du niveau des eaux correspond à la période d'étiage. À l'automne, on constate une recharge mineure des lacs à partir des pluies plus abondantes et plus fréquentes. La glace recouvre les lacs entre le 1er décembre et le 1er mai (Pêches et Environnement Canada, 1978). Au printemps, la fonte des neiges et les précipitations pluvieuses rechargent l'aquifère et le réseau souterrain jusqu'au point d'engorgement. Les eaux excédentaires débordent dans les lacs, augmentant leur niveau très rapidement, parfois avant même que la surface des lacs ne soit dégelée. C'est à la fin du printemps qu'ils atteignent leur niveau maximal. Avec l'arrivée de l'été, les eaux de fonte ont de moins en moins d'impact sur le réseau souterrain et donc sur l'alimentation en eau des lacs. La vidange débute à partir de ce moment et se poursuit en fonction d'un profil à la baisse jusqu'à la fin de la saison estivale.

Les courbes présentées à la figure 5 permettent de suivre l'évolution du niveau des deux lacs au cours des étés 1982, 1983 et 1984. Les lacs Smith et Mystérieux sont représentatifs des deux principales catégories de lacs à niveau variable de l'île : les lacs à vidange partielle et les lacs à vidange complète. Les données proviennent de mesures hydrologiques prises sur les rivages lacustres à l'aide d'un théodolite. Les données d'évaporation, elles, proviennent d'une station climatique temporaire installée à proximité des bassins lacustres, soit au lac au Rat-Musqué (Côté, 1987).

Les tendances générales dans les différents profils d'abaissement du niveau des eaux sont les mêmes pour l'ensemble des lacs à niveau variable qui subissent une vidange partielle. Les courbes des trois étés indiquent une baisse plus lente des eaux en début de saison, associée à l'apport en eau de la fonte printanière (figure 5). Cette baisse devient plus rapide en juillet, au moment où les eaux de fonte n'ont plus d'impact sur la recharge de l'aquifère phréatique. Ainsi, durant cette période, le taux d'abaissement quotidien double par rapport à celui de juin. Le niveau des lacs baisse ainsi de 2,5 à 4 m selon les étés. Durant les mois d'août et de septembre, la baisse est ralentie, voire même interrompue, par les précipitations intensives de l'automne. Par la suite, le niveau des eaux augmente jusqu'à l'engel hivernal, totalisant une hausse de plus de 115 cm (P. Bertrand, 1983, comm. pers.). Cette hausse marque la recharge de l'aquifère phréatique.

Les lacs à niveau variable avec vidange complète subissent également un abaissement plus lent en début de saison, puis une baisse nettement plus rapide alors que le taux moyen quotidien double et triple en quelques jours (figure 5). Le taux maximal d'abaissement quotidien est atteint vers la fin du mois de juin, au moment où le lac est presque asséché alors que l'aquifère et le réseau souterrain sont peu alimentés. Entre le début juin et le début de juillet, les lacs subissent une vidange complète correspondant, dans le cas du lac Mystérieux, à un abaissement de 715 cm (figure 6). Tout comme les lacs à niveau variable avec vidange partielle, leur niveau d'eau subit une hausse comparable dès le début de l'automne.



Tiré de Côté (1987, p. 54)

Figure 5 - Abaissement cumulatif des eaux des lacs Smith et Mystérieux pendant les étés 1982 à 1984

Bien que la courbe d'abaissement du niveau des eaux pour une même catégorie de lacs reste identique d'un été à l'autre au cours de la période d'observation (1982 à 1984), on enregistre des différences marquées dans l'amplitude des variations certaines années, particulièrement pour l'année 1983, qui s'oppose aux années 1982 et 1884. Ces différences sont causées par les variations de température, par la quantité de neige disponible à la fonte et par la répartition des précipitations neigeuses et pluvieuses au cours de l'hiver et du printemps de ces années (Côté, 1987).

Le niveau maximal des hautes eaux printanières enregistré dans les lacs au début du mois de juin 1983 était approximativement de 1,5 m inférieur à celui des deux autres années. Ce bas niveau est une conséquence directe d'une faible entrée d'eau dans le système hydrologique, résultat d'une conjoncture climatique défavorable cette année-là (tableau 2). De façon générale, les

températures moyennes mensuelles pour l'année ont été supérieures à celles de 1982 et de 1984, avec des extrêmes maximaux en janvier, mars, avril et juin qui ont accéléré la fonte. Or, l'hiver se présentait déjà avec des moyennes de précipitations neigeuses nettement inférieures aux normales des 30 dernières années. De plus, la quantité importante de pluie tombée au cours de l'hiver et au début du printemps, ainsi que la proportion de neige disparue par sublimation avant même que la température moyenne de l'air n'ait pu atteindre le 0 ^{o}C, ont favorisé une fonte hâtive et progressive de la neige au sol. Considérant que la fonte printanière constitue la majeure partie de la recharge de l'aquifère phréatique, les conditions climatiques de 1983 se sont traduites par des niveaux lacustres beaucoup plus bas que la normale.

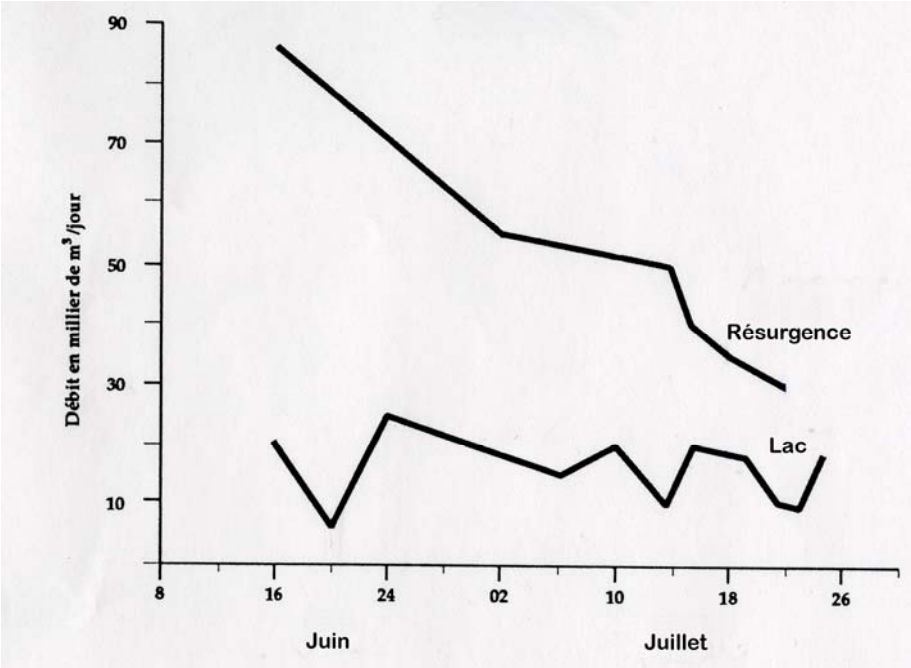


Figure 6 - Variation rapide du niveau du lac Mystérieux au début de l'été : situation entre le 15 juin (a) et le 3 juillet (b) 1984

Tout comme les lacs, le profil à la baisse des eaux aux résurgences s'explique par un épuisement progressif des eaux de fonte printanière. Les profils des lacs et des résurgences évoluent en parallèle puisque l'aquifère contrôle, en majeure partie, les variations du niveau des eaux. On peut constater que le ralentissement dans la baisse des débits à la résurgence provient de l'apport en eau occasionné par les précipitations, donc par une recharge partielle de l'aquifère. La hauteur des eaux aux résurgences diminue elle aussi de façon significative. La faible recharge printanière de 1983 a provoqué dès la fin juin l'assèchement des résurgences qui étaient topographiquement plus hautes que le niveau de la nappe phréatique durant cette période.

Sur la figure 7, on peut suivre, en parallèle, pour le lac Smith, la courbe d'abaissement du niveau lacustre, ramené en débit quotidien, et l'évolution du débit de la résurgence. Le débit quotidien du lac est obtenu en multipliant la superficie de la nappe d'eau (m^2), évaluée au moyen d'une photographie aérienne, par l'abaissement quotidien du niveau du lac (m/jour), ce qui donne le débit du lac (m^3/jour) (tableau 2 et figure 7). Durant tout l'été, le lac Smith reçoit une

contribution soutenue en provenance d'une résurgence permanente dont le débit fut mesuré (figure 7). Par ailleurs, dans l'évaluation du bilan hydrologique global, il faut aussi tenir compte de l'évaporation, laquelle représente environ 10 % de l'abaissement du niveau lacustre. En considérant toutes les composantes mesurables du régime hydrologique, il est possible d'isoler le taux net d'évacuation des eaux lacustres par le système karstique souterrain (tableau 2).

Tableau 2 - Rapport entre le débit du lac Smith et celui de la résurgence en juin et juillet 1984

Date	**Surface du lac (m^2)**	**Abaissement du lac (m^3/jour)**	**Débit à la résurgence (m^3/jour)**	**Rapport débit du lac/débit à la résurgence (%)**
15 juin	891 450	22 460	84 670	27
22	809 750	8 100	72 170	11
26	700 810	24 530	65 030	38
30	591 870	20 720	57 890	36
6 juillet	428 470	13 750	54 100	25
8	382 410	16 020	53 030	30
10	366 820	19 510	51 970	38
13	347 330	10 770	50 980	21
15	329 150	22 220	40 180	55
20	279 770	18 460	34 560	53
22	266 780	11 520	34 560	33
23	258 980	11 290	33 260	34
24	247 290	21 120	31 970	66

Sur la figure 7, on montre que le débit du lac Smith varie peu au cours de l'été, étant toujours entre 10 000 et 20 000 m^3/jour. Par contre, celui de la résurgence diminue progressivement, passant de 84 000 à 31 000 m^3/jour. La faible variabilité du débit lacustre suggère qu'elle corresponde à la capacité d'évacuation du système karstique souterrain. Quant à la diminution progressive du débit de la résurgence, celle-ci représenterait l'épuisement progressif des eaux de fonte printanière de l'aquifère. Ainsi, en début de saison, la participation de l'aquifère dans la vidange du lac serait de 73 % contre seulement 34 % vers la fin juillet, lorsque les eaux de fonte printanière n'ont plus d'impact sur celui-ci. La diminution abrupte du rapport pour le 22 juin ainsi que les 13, 22 et 23 juillet s'explique généralement par une recharge partielle de l'aquifère provoquée par des précipitations soutenues.

Dès la fonte printanière, les lacs à niveau variable avec vidange partielle se servent de leurs exutoires pour évacuer le surplus d'eau, alors que le réseau souterrain est saturé. Dans les lacs à niveau variable avec vidange complète, les eaux inondent la proximité immédiate du bassin puisque leur exutoire ne fonctionne que durant les crues printanières exceptionnelles. Avec l'évolution de la saison estivale, la superficie de ces plans d'eau diminue, privilégiant à ce stade le système d'évacuation karstique souterrain. Au fur et à mesure que la période d'étiage

progresse, des dolines et des fractures ouvertes émergent des eaux en bordure des lacs ; bien des résurgences ne fonctionnent plus et le niveau piézométrique des eaux est alors relativement bas par rapport aux exutoires externes.

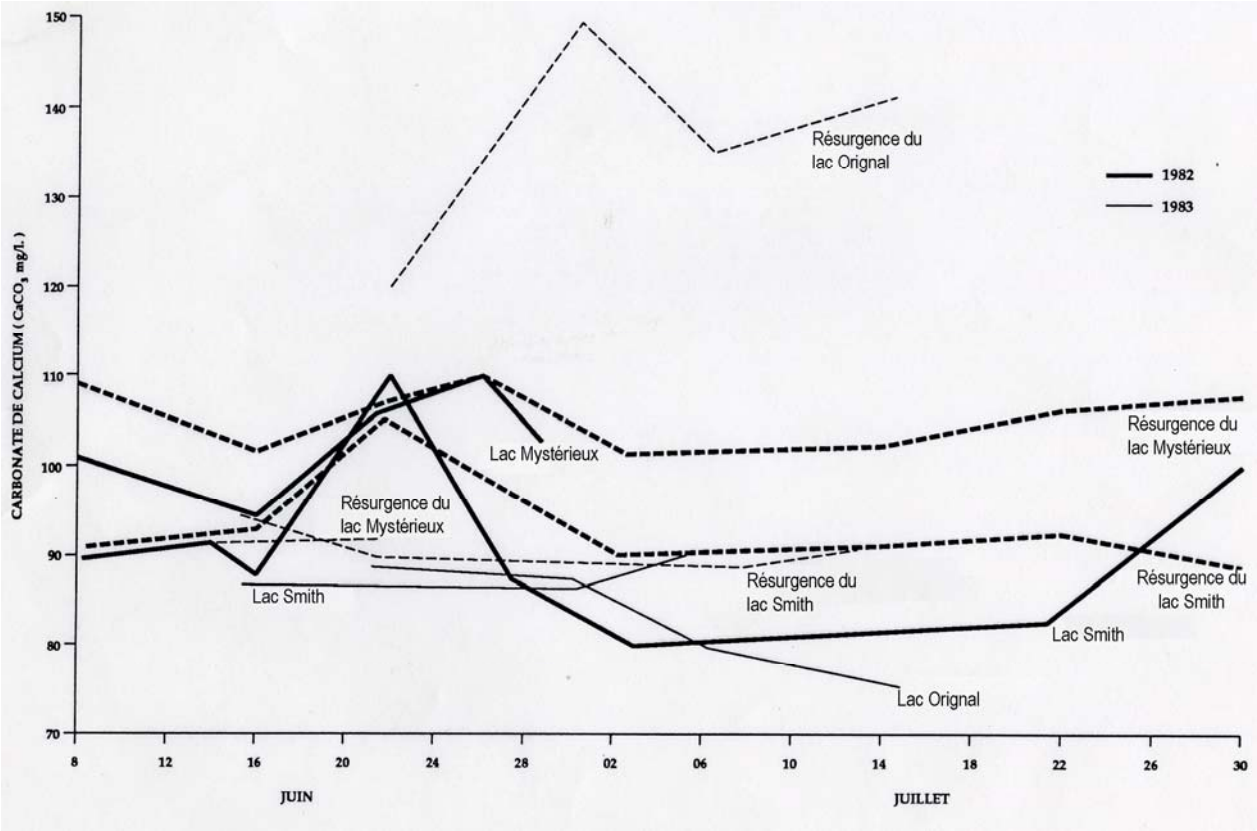
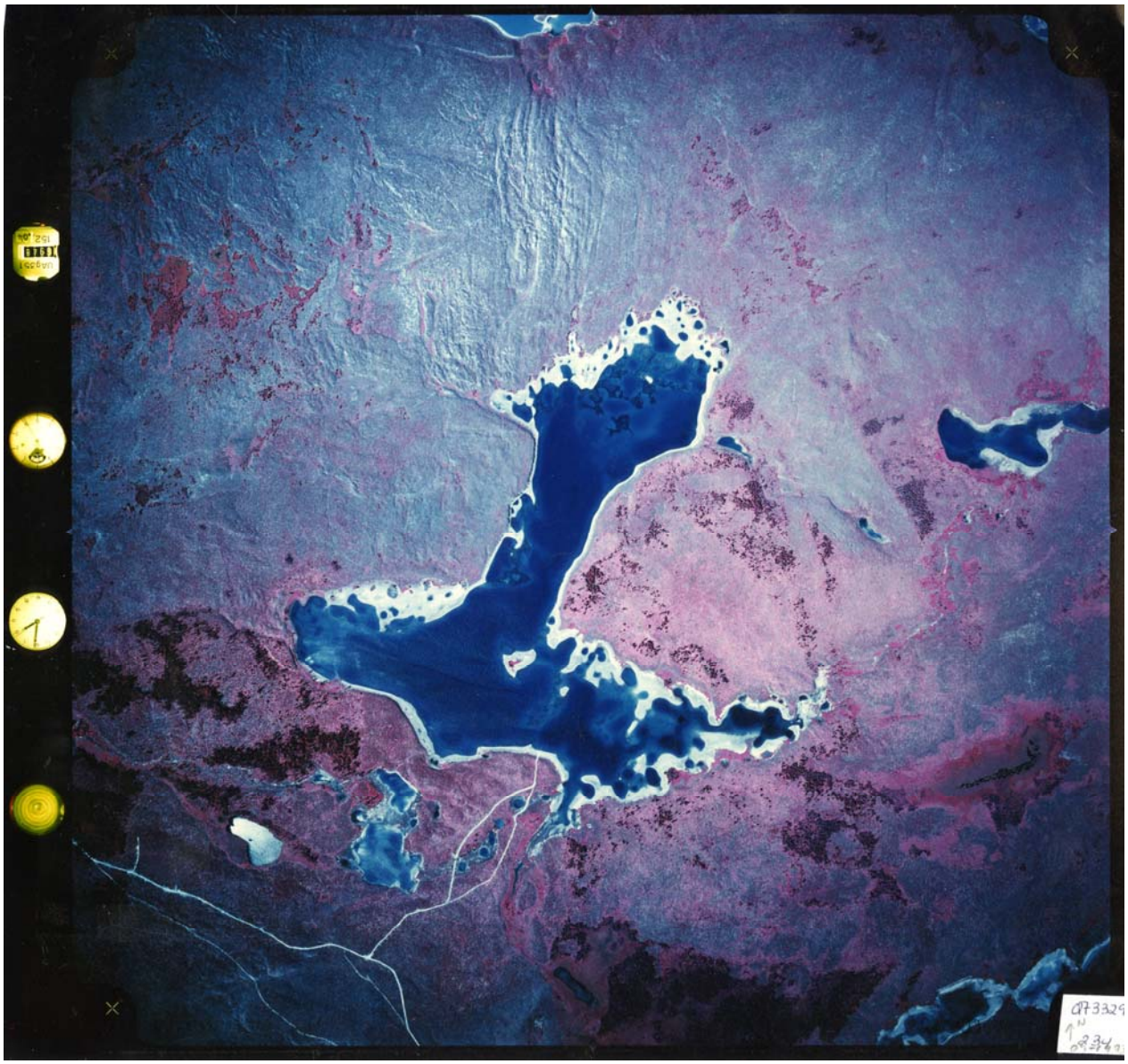


Figure 7 - Comparaison entre le débit du lac Smith et celui de la résurgence à l'été 1984

En 1955, un feu, le plus important dans l'histoire de l'île, a dévasté plus de 780 km^2 de forêt sur le plateau central. La litière ayant été complètement brûlée, la régénération des arbres est lente et les conditions environnementales du secteur (vent fréquent, hiver rigoureux, faible humidité des sols, etc.) ne font que retarder la décomposition de la matière ligneuse. Le régime hydrologique de la zone dévastée a donc été complètement perturbé. De plus, la fonte de la neige est plus rapide au printemps, donnant des niveaux printaniers nettement supérieurs. La superficie des cuvettes lacustres s'est accrue puisqu'on trouve de nombreuses souches dans les lacs, que les rares boisés riverains qui ont survécu sont ennoyés au printemps (traces d'abrasion glacielle sur les troncs), que les plages de gravier viennent recouvrir la base des arbres et les sols forestiers et qu'il y a de nombreux empilements de bois mort sur les rives (figure 6). Ainsi, dans ces secteurs, le ruissellement de surface s'est accru et le sol organique ne retient plus l'eau.

5. Dolines lacustres

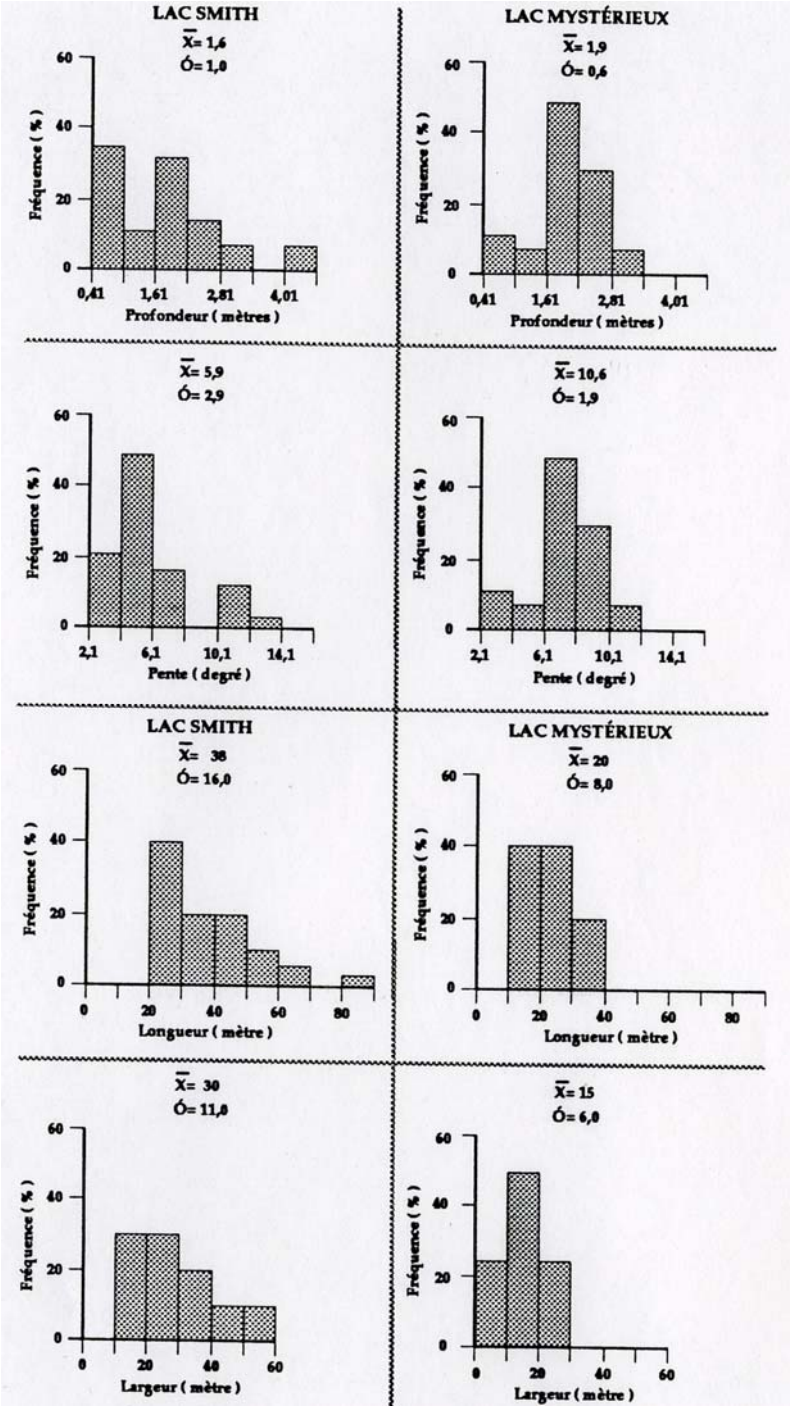
Les dolines de dissolution représentent les formes les plus typiques du karst lacustre de l'île d'Anticosti. Leur présence à l'intérieur de la plupart des bassins lacustres représente un paramètre hydrologique fondamental puisqu'elles servent de drains naturels aux eaux et même de ponors (figure 8). En retour, les variations du niveau des eaux influencent le développement morphométrique des dolines lacustres en permettant le développement de profils en entonnoir ou encore en soucoupe selon le contexte.



Photographie Q73329 (234)

Figure 8 - Abaissement partiel du niveau du lac Smith le 18 août 1973, laissant apparaître une bonne partie du réseau de dolines

L'analyse morphométrique (longueur, largeur, pente et profondeur) de 50 dolines, réparties à l'intérieur des lacs Smith et Mystérieux, montre qu'elles constituent deux populations statistiquement différentes, correspondant à chacune des deux catégories de lacs (figure 9).



Tiré de Côté (1987, p. 35 et 37)

Figure 9 - Fréquence des longueurs, des largeurs, des profondeurs et des pentes des dolines des lacs Smith et Mystérieux

En effet, les dolines du lac Smith, un lac à niveau variable avec vidange partielle, sont plus longues (moyenne de 38 m) et larges (moyenne de 30 m) que celles du lac Mystérieux dont les eaux se vidangent complètement (moyennes de 28 m et de 15 m) (figure 9). Dans les deux lacs, la distribution des longueurs des dolines suit celle des largeurs avec une corrélation positive de 73 % dans le cas du lac Smith et de 87 % dans le cas du lac Mystérieux. Le rapport largeur/longueur indique que les dolines des deux lacs sont près du cercle parfait avec des valeurs identiques de 0,73 et 0,74. Les pentes des dolines du lac Smith sont en moyenne inférieures de moitié (moyenne de 5,9^{o}) à celles du lac Mystérieux (moyenne de 10,6^{o}). Bien que les profondeurs des dolines du lac Smith (moyenne de 1,6 m) et du lac Mystérieux (moyenne de 1,9 m) soient semblables, elles correspondent tout de même à deux populations statistiquement différentes en raison, entre autres, de leur écart type respectif (1 m et 0,6 m).

Enfin, le rapport longueur/largeur, qui représente l'asymétrie des dolines (Day, 1976), ne peut être associé, comme cet auteur l'entend, à la position de la perte sur le plancher des dolines car plus ce rapport est important, plus la perte devrait être localisée vers la périphérie de la doline. Or, dans 43 % des cas des dolines lacustres de l'île d'Anticosti, lorsque le rapport augmente, la perte se situe dans le centre de la doline, ce qui nous laisse croire qu'il n'existerait aucune relation directe entre la position de la perte et l'asymétrie des dolines.

Les différences géomorphologiques des dolines des lacs Smith et Mystérieux renvoient à des régimes hydrologiques différents. Ainsi, les lacs à niveau variable avec vidange partielle favorisent en profil une forme en soucoupe et les lacs avec vidange complète, un profil en entonnoir. Ces différences sont attribuables au gradient hydraulique des lacs, à la vidange partielle ou complète des eaux et aux teneurs chimiques respectives des eaux des lacs.

Le gradient hydraulique intervient directement dans la vitesse d'écoulement des eaux lacustres et, par le fait même, dans le temps de séjour des eaux sous terre. Les gradients hydrauliques généraux ont été obtenus en calculant le dénivelé entre la surface du lac et celle de la résurgence, et en divisant ce résultat par la distance entre ces deux points. Ceux-ci n'ont été mesurés qu'une seule fois au cours de l'été de 1984. Ils donnent tout de même un ordre de grandeur acceptable.

Pour les lacs Smith et Mystérieux, les gradients hydrauliques sont respectivement de 0,006 % et de 0,02 % ; ce dernier gradient est donc 13 fois supérieur au précédent. Ainsi, les pentes des dolines du lac Smith correspondent à un gradient hydraulique plus faible et les pentes plus fortes des dolines du lac Mystérieux correspondent à un gradient beaucoup plus élevé.

Le régime hydrologique très différent des lacs Smith et Mystérieux contribue au développement latéral ou vertical des dolines, suivant la catégorie de vidange, partielle ou complète. Les eaux du lac Smith séjournent dans la cuvette pendant des périodes plus longues et permettent aux processus chimiques et physiques d'agir latéralement (abaissement du niveau des eaux de 3 à 4 m en 2 mois). Dans le cas du lac Mystérieux, les eaux s'évacuent beaucoup plus rapidement puisque la vidange complète des eaux (plus de 7 m) s'effectue en 3 ou 4 semaines : le développement vertical est donc plus marqué.

La recharge partielle ou complète des eaux lacustres, par l'aquifère et le réseau karstique souterrain, augmente l'agressivité des eaux en fonction du temps de séjour des eaux sous terre et du volume d'eau évacué. Il en résulte des différences appréciables dans les teneurs en carbonate

de calcium ($CaCO_3$) entre les eaux du lac Smith (88 mg/l) et celles du lac Mystérieux (109 mg/l). Ces teneurs dénotent une dissolution plus marquée dans les lacs à niveau variable avec vidange complète puisque le renouvellement complet des eaux et leur temps de séjour sous terre permettent une recharge importante en CO_2, augmentant par le fait même la capacité de dissolution des eaux.

À partir des observations sur le terrain, il est également possible de trouver, à l'intérieur des différentes catégories de lacs, trois systèmes de drainage des dolines :

1) le passage direct des eaux dans le réseau karstique souterrain par les fractures ouvertes ;

2) l'infiltration des eaux de surface (au sens pédologique) ;

3) le transfert gravitaire des eaux d'une doline située topographiquement plus haute à une doline plus basse. Le colmatage du fond des dolines est responsable de ce dernier système.

Dans les trois situations, la géomorphologie des dolines s'en trouve modifiée.

En effet, les dolines dont le fond est marqué par une fracture ouverte semblent plus profondes que les autres parce qu'elles absorbent un plus grand volume d'eau lors de la vidange. Leur profil ressemble donc plus à celui d'un entonnoir. Les dolines qui fonctionnent par infiltration possèdent, sur leur plancher, une perte sous-jacente aux formations meubles. La position de cette perte, centrale (60 %) ou en périphérie (40 %) du plancher, a comme conséquence de modifier la pente des versants. Ainsi, les pertes localisées en périphérie du plancher, contrairement à celles du centre, possèdent un versant qui, dans 75 % des cas, a une pente plus forte que celles des trois autres versants. La concentration en un point des eaux fait reculer progressivement le versant, occasionnant une pente de plus en plus accentuée par rapport aux trois autres. Enfin, les versants communs de dolines adjacentes qui se vidangent par transfert gravitaire subissent une érosion qui donne occasionnellement naissance à un chenal.

À l'intérieur des lacs à niveau variable avec vidange partielle, on retrouve ces trois systèmes d'évacuation.

6. Caractéristiques floristiques des rivages lacustres

À l'intérieur des lacs à vidange partielle ou complète, les caractéristiques de la flore riveraine suggèrent une influence liée à la durée du séjour sous l'eau. Ainsi, les différents régimes hydrologiques imposent au couvert végétal une structure et une densité propres à chaque catégorie de lacs (figure 10).

Figure 10 - Illustration de la zonation de la végétation riveraine du lac Smith

Les relevés de végétation effectués à l'intérieur des rivages lacustres, à raison de deux transects par lac, ont permis d'établir une liste de plus de 100 taxons. Parmi ceux-ci, certains sont typiques des régions calcaires (Marie-Victorin, 1995), tel *Zigadenus glaucus* Nuit., *Senecio pauperculus* Michx, ainsi que *Potentilla fruticosa* L., alors que d'autres représentent les régions froides, comme *Arctostaphylos rubra* (Rehder et Wilson) Fern., *Chiogenes hispidula* (L.) T. et G. *Empetrum nigrum* L., *Petasites palmatus* (Ait.) Gray., *Viola nephtophylla* Greebe. Cependant, dans l'ensemble, les espèces sont représentatives des rivages et des milieux humides : *Vaccinum myrtilloïdes* Michx, *Viola cucullata* Ait, *Tussilago farfara* L., *Rhamnus alnifolius* L'Her. et *Potentilla anserina* L.

Les variations annuelles des plans d'eau guident la structure végétale en bandes parallèles aux rivages lacustres. La succession de ces bandes marque les grandes étapes de l'abaissement des lacs (figure 10). Puisque le séjour des végétaux sous l'eau est fonction de leur position sur le rivage et de sa pente, la densité et la variété des espèces augmentent progressivement du lac vers la forêt.

Dans les lacs à vidange partielle, la densité des taxons riverains est relativement faible avec un recouvrement de 50 %. Les secteurs nouvellement émergés sont libres, pour un court laps de temps, de toute végétation. La limite d'une bande à l'autre est bien distincte et renvoie à la vidange lente et progressive des eaux du bassin. Le niveau maximum des hautes eaux est circonscrit par un talus ou un micro-talus d'érosion, correspondant habituellement à une platière muscinale.

Dans les lacs à niveau variable avec vidange complète, la densité des espèces riveraines est plus importante, avec un taux de recouvrement de 75 %, et la limite d'une bande à l'autre est plus diffuse. Ce phénomène s'explique par une baisse rapide du niveau des eaux en début de saison, ainsi que par la durée de séjour des végétaux sous l'eau qui est de 5 à 6 fois plus courte que dans les lacs à niveau variable sans assèchement.

On peut constater que la plus grande variété d'espèces et de bandes se trouve, par ordre décroissant d'importance, dans les lacs à niveau variable avec vidange partielle, dans les lacs à niveau variable avec vidange complète et dans les lacs à niveau constant.

7. Hydrochimie

L'analyse des échantillons d'eau des différentes catégories de lacs révèle des teneurs chimiques variées correspondant aux différents régimes hydrologiques des lacs.

Le prélèvement de 190 échantillons d'eau sur les rivages des lacs et à la sortie des résurgences a été effectué entre les mois de juin et d'août des années 1982 et 1983. Les paramètres mesurés sont la température, le pH, la dureté en calcium, la dureté en magnésium et l'alcalinité. De plus, la pression partielle du CO_2 (pCO_2) de l'eau ainsi que le SIc, qui est un indice du niveau de saturation de l'eau par rapport à la calcite (Langmuir, 1971), ont été calculés à partir de la température, du pH, de la dureté en calcium et en magnésium ainsi que de l'alcalinité à l'aide du programme TOMCHEM de Wigley (1972). Les mesures de conductivité des eaux reflètent des concentrations négligeables en ions de chlorures.

La séparation des eaux à partir de l'analyse discriminante pas à pas est très satisfaisante et les résultats démontrent qu'il existe trois groupes chimiques d'eau correspondant à chacune des trois catégories de lacs. Chacune des données a été classifiée à partir de sa probabilité a posteriori d'appartenir à un groupe. La probabilité minimale d'appartenance à un groupe est de 86 % et seulement 8 % des données sont mal classifiées.

7.1. Caractéristiques générales des eaux

La moyenne de dureté en calcium atteint de 84,5 mg/l dans les lacs à niveau constant, 88,5 mg/l dans les lacs avec vidange partielle et 109,7 mg/l dans les lacs avec vidange complète. La teneur de ces paramètres pour les résurgences varie entre 108 mg/l et 133 mg/l. Les eaux sont sous-saturées dans les lacs à niveau variable et tendent vers la saturation dans les lacs à niveau constant. Ces eaux sont également près de la valeur standard en pCO_2 de l'atmosphère ($10^{-3,5}$ atm. à 25 ^{o}C). Les eaux des résurgences tendent également vers la saturation.

7.2. Évolution des paramètres hydrochimiques dans les lacs

Les tendances évolutives pendant l'été des paramètres hydrochimiques des lacs à niveau variable, avec ou sans vidange complète, sont similaires et n'exigent donc pas d'analyses séparées. Ces résultats démontrent que les lacs sont soumis aux mêmes conditions environnementales. Dans la plupart des lacs, les valeurs des paramètres subissent une augmentation avec la progression de l'été ; certaines enregistrent une hausse ponctuée d'écarts brusques, d'autres au contraire une augmentation plus progressive. Sur la figure 11, on montre l'évolution du $CaCO_3$ au cours des

mois de juin et juillet des années 1982 et 1983 et ce, pour les deux catégories de lacs à niveau variable (à vidange partielle comme le lac Smith et à vidange complète comme le lac Mystérieux) ainsi que pour leur résurgence respective. Les valeurs augmentent faiblement avec l'évolution de la saison. Les augmentations soudaines des teneurs correspondent aux journées de précipitations.

Lors de la fonte printanière, le $CaCO_3$ des eaux se dilue, d'où la baisse des concentrations en début de saison. Par la suite, le réchauffement des eaux lacustres, qui se traduit par une baisse de la pCO_2 (pression partielle de CO_2 équilibrant), masque tout effet de l'augmentation du rapport CO_2/H_2CO_3 transmis aux eaux de ruissellement par le sol. Les valeurs de $CaCO_3$ se retrouvent donc relativement stables. L'apport d'eau de surface dans les bassins lacustres lors des pluies fait augmenter, sur de courtes périodes, la teneur en $CaCO_3$. On remarque donc, à partir de juillet, une hausse de la valeur de $CaCO_3$ associée aux actions physico-chimiques du ruissellement et à une augmentation de la teneur en pCO_2 des eaux lacustres.

L'abaissement de la pCO_2 jusqu'à la fin de juin semble relié au réchauffement des eaux de fonte printanières ainsi qu'à la baisse du niveau des eaux dans les lacs et les ruisseaux. À cela s'ajoute une activité biotique encore faible et une baisse du pH.

La hausse progressive de la pCO_2 en juillet est la conséquence d'une plus grande concentration en CO_2 biogène dans le sol et probablement d'une stabilisation temporaire des températures.

La dureté en calcium des résurgences est toujours plus élevée que dans les lacs. La concentration en $CaCO_3$ augmente légèrement avec la progression de l'été et soudainement avec les précipitations. Il existe toutefois un certain retard entre l'augmentation de la teneur à la source et celle aux résurgences.

Les eaux des résurgences sont généralement sous-saturées en calcite, ce qui laisse croire à une recharge en CO_2 sous terre ou à un mélange avec une eau d'infiltration plus concentrée en $CaCO_3$.

Dans les lacs de l'île, le comportement du $CaCO_3$ pendant l'été 1983 correspondait sensiblement à celui de 1982, mais avec une concentration moyenne inférieure. La faible recharge de l'aquifère et du réseau karstique souterrain au printemps et à l'été de l'année 1983, associée aux températures plus élevées, a permis de réchauffer plus rapidement les eaux des lacs et donc de diminuer de façon hâtive la pCO_2 de l'eau. Ces effets ont favorisé une faible dissolution du $CaCO_3$ durant cet été-là. De plus, les précipitations peu abondantes de l'été 1983 ont fait diminuer l'activité biologique du sol, ce qui se traduit par un transfert négligeable de CO_2/H_2CO_3 lors de ruissellement. Au cours de l'été 1983, les eaux des lacs ont donc atteint rapidement un niveau de saturation en calcite.

Figure 11 - Évolution du $CaCO_3$ dans les lacs Smith et Mystérieux pendant les étés de 1982 (haut) et de 1983 (bas)

7.3. Cas du lac Smith : comportement spatial des paramètres chimiques

Les eaux du lac Smith se vidangent directement par les dolines et ressortent 1,4 km plus loin dans le lac Iris. Ce dernier lac, d'une superficie de 200 m^2 et d'une profondeur moyenne de 1 m, est alimenté par plus de 233 résurgences diffuses et 5 résurgences à conduit. La température moyenne des lacs Smith et Iris ainsi que de l'exutoire passe, respectivement, de 18,7 ^oC à 18,2 ^oC, puis à 17,6 ^oC. La moyenne de la dureté en calcium varie de 88,7 à 92,5 mg/l du lac Smith vers le lac Iris, pour atteindre 90,5 mg/l à l'exutoire. Les eaux du lac Smith ont une pCO_2 de $10^{-3,09}$ atm. qui augmente à $10^{-2,93}$ atm. dans le lac Iris. L'exutoire obtient une valeur de pCO_2 ($10^{-3,07}$ atm.) qui se rééquilibre doucement avec le CO_2 atmosphérique. La teneur des eaux sous-saturées en calcite du lac Smith ($10^{-0,25}$ atm.) diminue dans le lac Iris ($10^{-0,32}$ atm.), à la suite du trajet sous terre, et augmente légèrement à l'exutoire ($10^{-0,28}$ atm.) (figure 11). Les eaux du lac Iris reflètent la moyenne chimique de toutes les résurgences qui alimentent cette cuvette.

L'analyse des eaux de deux de ces résurgences indique une concentration en dureté en calcium de 93 à 96,7 mg/l et une pCO_2 de $10^{-2,56}$ à $10^{-2,86}$ atm. Ces dernières valeurs révèlent une eau fortement chargée en CO_2, résultant d'un séjour prolongé sous terre. Les eaux sous-saturées des résurgences affichent des valeurs bien inférieures à celles du lac Iris ($10^{-0,66}$ et $10^{-0,44}$ atm.), démontrant ainsi l'impact d'un contact prolongé à l'interface roche/eau. Une marne blanche, composée à 76,6 % de carbonates et d'une épaisseur variant de 4 à 6 cm tapisse le fond du lac Iris. Ce dépôt provient de la précipitation de $CaCO_3$ excédentaire. Cette dissolution proviendrait à la fois du lac Smith et des conduits situés sur la trajectoire entre les deux lacs.

8. Conclusion

Jusqu'à présent, aucune étude détaillée n'a été consacrée à la dynamique des lacs karstiques. Les travaux réalisés sur le plateau central de l'île d'Anticosti ont permis d'établir une typologie de ces lac qui ne figure dans aucune publication d'hydrologie ou de géomorphologie (tableau 1). Cette typologie permet de caractériser trois catégories de lacs karstiques à partir de données géomorphologiques, hydrologiques et hydrochimiques propres à chacun d'eux. Elle est applicable à toute l'île d'Anticosti et peut également servir comme point de départ à la caractérisation des lacs à niveau variable dans d'autres régions.

La plupart des lacs de l'île possèdent des dolines de dissolution. La capacité d'évacuation et de remplissage de ces bassins lacustres est reliée à l'efficacité du système de drainage karstique de surface et souterrain, donc à celui des dolines et de leur réseau. La vidange partielle ou complète des lacs a comme impact d'influencer le développement morphométrique des dolines et de leur donner, respectivement, des profils en cuvette ou en entonnoir. Ces distinctions soulignent l'influence de la vitesse d'évacuation des eaux et de leur temps de séjour dans la cuvette.

Autour des lacs, ces variations dans le système de drainage sont marquées dans le paysage par des bandes végétales parallèles aux rivages, indiquant la fréquence et la durée du séjour sous l'eau des végétaux. La densité et la variété des espèces augmentent progressivement du lac vers la forêt, indiquant les étapes de l'abaissement du niveau des eaux lacustres. La plus grande variété de taxons se trouve sur les rivages des lacs à niveau variable avec vidange partielle.

Enfin, les paramètres hydrochimiques des lacs révèlent une eau avec une forte pCO_2, sous-saturée en calcite et avec des teneurs moyennes en $CaCO_3$ qui varient entre 84 et 109 mg/l. Les eaux avec les teneurs les plus élevées, et donc avec le plus grand pouvoir de dissolution, se trouvent dans les lacs à niveau variable avec vidange complète. Les teneurs hydrochimiques de ces lacs reflètent le renouvellement complet et annuel des eaux.

9. Références

Brook, G.A. and Ford, D.C. (1980) Hydrology of the Nahanni karst, northern Canada and the importance of the extreme summer storms. Journal of Hydrology, vol. 46, p. 103-121.

Brown, M.C. (1971) Karst hydrology of the lower Maligne basin, Alberta. Ph.D. thesis, Geography Department, McMaster University, Hamilton (Ontario), 178 p.

Brown, M.C. and Ford, D.C. (1973) Caves and groundwater patterns in a tropical karst environment, Jamaïca. American Journal of Science, vol. 273, p. 622-633.

Cadieux, R. (1983) Contribution à l'hydrogéomorphologie du bassin de la rivière Jupiter, île d'Anticosti, Québec. Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 178 p.

Côté, D. (1984) Hydrogéomorphologie des lacs du bassin de la haute Jupiter. Rapport de baccalauréat, Département de géographie, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 52 p.

Côté, D. (1987) Géomorphologie, hydrologie, hydrochimie des lacs du plateau central de l'île d'Anticosti, Québec. Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 233 p.

Côté, D., Dubois, J.-M.M. et Gwyn, Q.H.J. (1987) Géomorphologie d'un lac à niveau variable dans une région karstique du Québec, Île d'Anticosti, Canada. Photo-interprétation, n° 87-6, p. 1-10.

Côté, D., Dubois, J.-M.M. et Gwyn, Q.H.J. (1990) Mysterious lakes - Les lacs mystérieux de l'île d'Anticosti. GEOS, vol. 19, n° 3, p. 20-25.

Day, M. (1976) The morphology and hydrology of some Jamaïcan karst depressions. Earth Surface Processes, vol. 1, p. 11-129.

Karolyi, M.S. (1978) Karst development in Ordovician carbonates : Western platform of Newfoundland. Master Thesis, Geography Department, McMaster University,Hamilton (Ontario), 171 p.

Kruse, P.B. (1980) Karst investigations of the Maligne Basin, Jasper National Park, Alberta. Master Thesis, University of Alberta, 120 p.

Langmuir, D. (1971) The geochemistry of some carbonate ground waters in central Pennsylvania. Geochemistry and Cosmochimistry Acta, vol. 35, p. 1023-1045.

Lauriol, B., Hétu, B., Côté, D. et Gwyn, Q.H.J. (1985) Phénomènes karstiques et périglaciaires dans un lac à niveau variable de l'île d'Anticosti, Québec, Canada. Zeitschrift für Geomophologie N.F., vol. 29, n° 3, p. 353-365.

Marie-Victorin, Frère (1995) Flore Laurentienne. 3e édition, Les Presses de l'Université de Montréal, Montréal, 1083 p.

Monroe, W.H. (1968) The karst features of northern Puerto Rico. National Speleological Society Bulletin, vol. 30, n° 3, p. 75-86.

Pêches et environnement Canada (1978) Atlas hydrologique du Canada. Approvisionnements et services Canada, Ottawa, 34 p.

Roberge, J. (1979) Géomorphologie du karst de la Haute-Saumons, Île d'Anticosti, Québec. Master Thesis, Geography Department, McMaster University, Hamilton, 335 p.

Roberge, J. and Ford, D.C. (1983) The Upper Salmon River karst, Anticosti Island, Québec, Canada. Journal of Hydrology, vol. 61, p. 159-162.

Roberge, J., Lauriol, B. et S-Pierre, L. (1985) La morphogénèse de la caverne à la Patate, île d'Anticosti, Québec. Géographie physique et Quaternaire vol. 39, n° 1, p. 67-75.

Smith, D.I., Drew, D.P. and Atkinson, T.C. (1972) Hypotheses of karst landform development in Jamaïca. Transactions of the Cave Research Group of Great Britain, vol. 14, n° 2, p. 159-173.

St-Pierre, L. (1983) Morphogénèse de la caverne à la Patate, rivière à la Patate, île d'Anticosti, Québec. Rapport de baccalauréat, Département de géographie, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 68 p.

Van Everdingen, R.O. (1981) Morphology, hydrology and hydrochemistry of karst in permafrost terrain near Great Bear Lake, Northwest Territories. National Hydrology Research Institute of Canada, NHRI paper n° 11, IWC sc. n° 114, 53 p.

Wigley, T.M.L. (1972) A computer programm for water quality analysis. Waterloo University, Technical Note n° 5, 16 p.

Williams, P.W. (1971) Illustrating morphometric analysis of krst with examples from New Guinea. Zeitschrift für Geomorphologie, N.F., vol. 15, p. 40-61.