

**Suivi des impacts de la coupe
forestière sur la physico-chimie et
le régime hydrologique des lacs
alcalins de la réserve faunique des
Chic-Chocs – 3^{ième} année d'activités**

Rapport de recherche N° R-1128

Mars 2010

Suivi des impacts de la coupe forestière sur la physico-chimie et le régime hydrologique des lacs alcalins de la réserve faunique des Chic-Chocs – 3^{ième} année d'activités

Rapport annuel

PROJET VOLET 1 (PMV1-11-08-002)
Année financière 2009-2010

Par :

Claude Fortin
Marc-André Robin
Sylvain Jutras
Alain N. Rousseau

Centre Eau, Terre et Environnement
Institut National de la Recherche Scientifique
490, rue de la Couronne, Québec (QC) G1K 9A9

Rapport N° R-1128

Table des matières

Résumé	ix
Avant-propos	xi
Remerciements	xiii
1. Introduction	1
1.1. Problématique des Chic-Chocs	3
1.2. Objectif poursuivi	4
1.3. Hypothèse	4
2. Matériels et méthodes	7
2.1. Choix des sites	7
2.1.1. Paire de lacs n° 1	8
2.1.2. Paire de lacs n° 2	9
2.1.3. Paire de lacs #3	11
2.2. Méthode d'échantillonnage de l'eau des lacs	12
2.2.1. Sonde multiparamétrique	14
2.2.2. Description du protocole de prise d'échantillons d'eau	14
2.3. Instrumentation hydrométéorologique	16
2.3.1. Station météorologique	16
2.3.2. Station de jaugeage	18
2.3.3. Levés bathymétriques	20
3. Résultats	23
3.1. Description des caractéristiques physiques des lacs	23
3.1.1. Levés bathymétriques	23
3.2. Suivi de la physico-chimie des lacs	27
3.3. Suivi des données hydrométéorologiques	37
4. Discussion	45
4.1. Calendrier des réalisations et des activités à venir	46

5. Conclusion et perspectives	49
6. Bibliographie.....	51
7. ANNEXES	53
ANNEXE 1 : Compensation barométrique	55
ANNEXE 2. Résultats bruts des paramètres physiques, biologiques et chimiques	57
ANNEXE 3 : Exemple de distribution entre les phases dissoute et particulaire (août 2008)	69

Liste des figures

Figure 1. Schéma simplifié de l'influence de la récolte forestière sur le bilan hydrologique.....	4
Figure 2. Exemple d'un lac marneux et ses interactions : (1) minéralisation de la roche calcaire (CaCO ₃) par les eaux souterraines; (2) dégazage du CO ₂ (pH↑); et (3) précipitation de la calcite (pH↓).....	5
Figure 3. Localisation géographique des lacs sélectionnés.....	7
Figure 4. Carte topographique délimitant le bassin versant du lac Ébron.....	8
Figure 5. Carte topographique délimitant le bassin versant du lac des Pics.....	9
Figure 6. Carte topographique délimitant les bassins versants du lac X (gauche) et du lac Z (droite).....	10
Figure 7. Carte topographique délimitant le bassin versant du lac au Foin.....	11
Figure 8. Carte topographique délimitant le bassin versant du 2 ^e lac de Manche-d'Épée.....	12
Figure 9. Exemple de localisation d'un point d'échantillonnage et du capteur de pression submersible (<i>levelogger</i>) au lac des Pics.....	13
Figure 10. Station météorologique installée à proximité des chalets du Lac Mont-Louis.....	16
Figure 11. Localisation de la station météorologique près du Lac Mont-Louis (Station Lac Mont-Louis) et des stations de références (Station Gîte et Station Murdochville).....	18
Figure 12. Système d'ancrage du capteur de pression submersible.....	19
Figure 13. Schéma illustrant les mesures faites avec le poids de sonde. (1) Hauteur d'eau du lac; (2) hauteur de l'enregistrement.....	20
Figure 14. Levé bathymétrique à l'aide d'une station totale.....	21
Figure 15. Levé bathymétrique du Lac des Pics.....	24
Figure 16. Levé bathymétrique du Lac Ébron.....	24
Figure 17. Levé bathymétrique du Lac X.....	25
Figure 18. Levé bathymétrique du Lac Z.....	25
Figure 19. Levé bathymétrique du Lac au Foin.....	26
Figure 20. Levé bathymétrique du 2 ^e Lac de Manche-d'Épée.....	26
Figure 21. Profils verticaux de quatre paramètres mesurés par sonde submersible dans chaque paire de lacs entre les 17 et 19 juillet 2007 (●○ : Température; ▲△ : O ₂ dissous; ■□ : pH; ▼▽ : Conductivité).....	29
Figure 22. Évolution du pH dans les lacs sélectionnés entre 2007 et 2009.....	30
Figure 23. Précipitations journalières et cumulées pour chaque station météorologique.....	37

Figure 24. Volume d'eau en période estivale au lac Ébron (traité) et au lac au Foin (témoin) pour la période de calibration (2008) et la période post-traitement (2009).....	39
Figure 25. Analyse de régression pour la paire N° 1M (Lac au Foin témoin; Lac Ébron traité) pour la période de calibration (2008) et la période post-traitement (2009).....	42
Figure 26. Analyse de régression pour la paire N° 2 (Lac X témoin; Lac Z traité) pour la période de calibration (2008) et la période post-traitement (2009).....	43
Figure 27. Schéma illustrant la nécessité d'une compensation barométrique.	55

Liste des tableaux

Tableau 1. Description des caractéristiques physiques des lacs sélectionnés	23
Tableau 2. Moyennes de quelques paramètres physico-chimiques pour la période de calibration (paires N° 1 et N° 2 : 2007-2008; paire N° 3 : 2007-2009).....	30
Tableau 3. Concentrations dissoutes mesurées de certains ions dans les lacs sélectionnés pour la période de calibration (paires N° 1 et N° 2 : 2007-2008; paire N° 3 : 2007-2009).....	31
Tableau 4. Moyennes des paramètres de base pour la période de calibration (paires N° 1 et N° 2 : 2007-2008; paire N° 3 : 2007-2009) et post-traitement (paires N° 1 et N° 2 : 2009) et effet dû au traitement pour chaque paire de lacs.....	33
Tableau 5. Moyennes des concentrations des anions pour la période de calibration (paires N° 1 et N° 2 : 2007-2008; paire N° 3 : 2007-2009) et post-traitement (paires N° 1 et N° 2 : 2009) et effet dû au traitement pour chaque paire de lacs.....	34
Tableau 6. Moyennes des concentrations des cations majeurs pour la période de calibration (paires N° 1 et N° 2 : 2007-2008; paire N° 3 : 2007-2009) et post-traitement (paires N° 1 et N° 2 : 2009) et effet dû au traitement pour chaque paire de lacs.....	35
Tableau 7. Moyennes des concentrations des éléments traces et de S pour la période de calibration (paires N° 1 et N° 2 : 2007-2008; paire N° 3 : 2007-2009) et post-traitement (paires N° 1 et N° 2 : 2009) et effet dû au traitement pour chaque paire de lacs.....	36
Tableau 8. Coefficients de régression des droites logarithmiques des volumes de chaque paire pour la période de calibration (paires N° 1M et N° 2 : 2007-2008; paire N° 3 : 2007-2009) et post-traitement (paires N° 1M et N° 2 : 2009).....	40
Tableau 9. Paramètres de base (paire N° 1).....	57
Tableau 10. Anions (paire N° 1).....	58
Tableau 11. Cations majeurs (paire N° 1).....	59
Tableau 12. Éléments traces (paire N° 1).....	60
Tableau 13. Paramètres de base (paire N° 2).....	61
Tableau 14. Anions (paire N° 2).....	62
Tableau 15. Cations majeurs (paire N° 2).....	63
Tableau 16. Éléments traces (paire N° 2).....	64
Tableau 17. Paramètres de base (paire N° 3).....	65

Tableau 18. Anions (paire N° 3)	66
Tableau 19. Cations majeurs (paire N° 3)	67
Tableau 20. Éléments traces (paire N° 3)	68
Tableau 21. Fraction particulaire (%) pour l'échantillonnage d'août 2008	69

Résumé

Les lacs de la région des Chic-Chocs ont des pH élevés ($\text{pH} > 7,5$). Cette condition naturelle s'explique par la nature calcaire de la roche mère. Les effets de la récolte forestière dans ce type de condition géologique sont peu documentés. Le but de cette étude est de connaître les effets de la récolte forestière sur la physico-chimie et le régime hydrologique des lacs alcalins des Chic-Chocs. Une attention particulière est portée au pH, étant donné que le pH des lacs alcalins se situe près de la limite supérieure de survie des poissons ($\text{pH} = 9$). Une étude par comparaison de bassins versants jumelés d'une période de quatre ans (2007 - 2008 : période de calibration, 2009 – 2010 : période post-traitement) a été mise en place. Trois paires de lacs aux caractéristiques semblables ont été choisies; une paire de lacs étant constituée d'un lac témoin et d'un lac traité (c'est-à-dire, soumis à la récolte forestière sur son bassin versant). Quelques paramètres physico-chimiques sont mesurés sur le terrain (pH, oxygène dissous, température) et en laboratoire avec des échantillons (cations majeurs totaux et dissous, carbone organique et inorganique dissous, Chl a, turbidité). Le régime hydrologique est estimé avec un suivi volumétrique des lacs. Ce suivi est réalisé par la combinaison de levés bathymétriques et de mesures de hauteur d'eau, recueillies avec un capteur de pression. Bien que l'incertitude soit encore élevée en raison du faible nombre d'échantillons, aucun effet significatif sur le pH et le volume n'ont été enregistrés sur deux des trois paires de lacs, un an après la récolte. La dernière saison d'échantillonnage (2010) permettra d'augmenter la puissance statistique de l'étude et d'obtenir les résultats pour la troisième paire de lacs.

Avant-propos

Ce rapport constitue une description des activités de recherche et de développement tenues lors de l'année financière 2009 – 2010, dans le cadre du Suivi des impacts de la coupe forestière sur la physico-chimie et le régime hydrologique des lacs alcalins de la réserve faunique des Chic-Chocs : projet financé par le programme de mise en valeur des ressources du milieu forestier (PMVRMF - Volet 1) du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. Ce suivi s'étend sur quatre ans et ce rapport fait état des activités liées aux trois premières années du projet.

Remerciements

Ce projet est rendu possible grâce au financement conjoint de la Société des établissements de plein air du Québec (SÉPAQ) et le Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF). Les campagnes d'échantillonnage et les activités de terrain sont grandement facilitées par l'aide exceptionnelle du personnel de la réserve faunique des Chic-Chocs, dont Bermans Drouin et Victor Ouellet. La qualité des analyses laboratoire est assurée par le personnel technique de l'INRS (Sébastien Duval, Pauline Fournier, René Rodrigue, Michelle Bordeleau et Anissa Benssadoune). Nous tenons également à remercier Mme Caroline Turcotte ainsi que MM. Robert Langevin et Langis Fournier du MRNF, qui ont apporté des conseils judicieux en début de projet ainsi que le Service de l'information sur le milieu atmosphérique (SIMAT) de la Direction du suivi de l'état de l'environnement (DSEE) du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, pour avoir fourni des données météorologiques couvrant la durée du projet.

1. Introduction

Les lacs marneux sont caractérisés par une alcalinité et un pH élevés, de même que par des grandes concentrations de calcium (Ca) dans la colonne d'eau et dans les sédiments (Otsuki et Wetzel 1972; Drummond *et al.*, 1995). Ils peuvent difficilement être classés dans le continuum eutrophe – oligotrophe habituellement utilisé, mais présentent certaines caractéristiques similaires aux lacs oligotrophes (ex.: faible productivité). Les concentrations élevées en Ca favorisent la précipitation sous la forme de $\text{CaCO}_{3(s)}$ (calcite) (Brown *et al.*, 1992). Ces caractéristiques particulières des lacs marneux sont occasionnées par un apport important en eaux souterraines (sur)saturées en Ca et en CO_3 . Les précipitations percolent à travers le sol et s'enrichissent en Ca et en CO_3 au contact de calcaires par une dissolution de minéraux. La pression partielle de CO_2 , étant beaucoup plus élevée dans les sols qu'en surface, permet une plus grande dissolution de $\text{CaCO}_{3(s)}$. Au contact de l'eau du lac (ayant une pression partielle de CO_2 plus proche de celle de l'atmosphère), les minéraux précipitent. Les sédiments des lacs marneux sont typiquement composés majoritairement de calcite (Pentecost *et al.*, 2000).

Mêmes si les apports par précipitation directe et par ruissellement de surface peuvent contenir des éléments produisant des pH moins élevés, leurs contributions relatives sont telles qu'ils ne peuvent pas modifier de manière substantielle les conditions de pH des lacs marneux. Sous ces conditions, l'hydrogéologie locale régule la composition physico-chimique de ces lacs.

La récolte forestière, en éliminant le couvert arborescent, affecte le régime hydrologique principalement en restreignant l'évapotranspiration réelle sans toutefois la réduire à néant. L'interception est atténuée, quoique toujours présente grâce aux arbustes et aux résidus de coupe. La transpiration est aussi affectée, car l'importance de la végétation y participant est grandement réduite. Puisqu'à l'échelle du bassin versant il n'existe pas de corrélation entre les précipitations et la récolte forestière, une plus grande proportion de l'apport en eau dans le bassin versant sera disponible pour l'écoulement.

Les opérations de récolte peuvent aussi affecter les propriétés physiques du sol. Le passage répété de la machinerie forestière cause la compaction du sol, affectant localement la conductivité hydraulique, la porosité, le stockage en surface et la dimension des macropores des couches superficielles de sol. Tous ces facteurs sont susceptibles d'avoir un effet sur la vitesse et la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol. Dans des cas particuliers, les opérations de récolte sont susceptibles de causer de l'orniérage, créant ainsi des canaux pouvant accélérer

la vitesse de ruissellement de l'eau, lorsqu'ils sont orientés parallèlement à la pente. Toutefois, l'application des mesures de protection des milieux riverains, telle que la conservation de lisières boisées aux pourtours des lacs et cours d'eau, atténuent, quoique partiellement, certains effets négatifs liés aux opérations de récolte sur la qualité de l'eau. Il est important de prioriser la conservation de lisières boisées autour des ruisseaux qui alimentent un lac, puisque leur détérioration aura des conséquences sur la qualité de l'eau des lacs concernés (Seto 2005).

De façon générale, la récolte des arbres réduit l'absorption des nutriments présents dans le bassin, accélère la minéralisation, la nitrification et la décomposition de la matière organique et augmente l'écoulement, ce qui favorise le lessivage. Ainsi, la récolte aura un impact sur les apports en éléments chimiques à un lac et ceux-ci devraient augmenter avec l'aire récoltée du bassin. Cependant, nous savons que la qualité de l'eau sera également influencée par de nombreux autres facteurs, tels la fertilité du sol, le pouvoir tampon du sol, la topographie, la géologie, la précipitation, l'augmentation des apports après coupe, le temps de renouvellement de l'eau, ainsi que la proportion des écoulements de surface et hypodermiques. De plus, la relation entre le changement de la qualité chimique de l'eau et le pourcentage de récolte sur un bassin se complique avec la présence ou l'absence d'une lisière boisée en zone riveraine, car cette lisière peut retenir en partie certains éléments, quoique son efficacité soit fortement mise en doute (Prepas *et al.*, 2003) à l'exception des formes particulières de contaminants. Ceci dit, nous savons que la récolte forestière affectera divers paramètres physico-chimiques de l'eau (Prepas *et al.*, 2003) et pourrait produire: (i) une augmentation de la température moyenne de l'eau des rivières (Plamondon 1993); (ii) une augmentation de l'acidité; (iii) une augmentation des concentrations de sédiments en suspension; (iv) une augmentation de la concentration de nutriments (N et P); (v) une augmentation de la concentration de cations minéraux (Ca, K, Fe); (vi) une augmentation de la concentration de carbone organique dissous; et (vii) une réduction de la concentration d'oxygène dissous.

Par contre, ces informations sont majoritairement issues d'études réalisées sur le bouclier canadien boréal (Tremblay *et al.*, 2008, 2009). La nature même des dépôts quaternaires et du socle rocheux s'y trouvant est très différente de la situation de la réserve faunique des Chic-Chocs et il est impossible de transférer de tels résultats d'un endroit à l'autre. Bien que des travaux « pionniers » sur l'influence de la récolte forestière sur la qualité de l'eau réalisés sur le bassin expérimental de Hubbard Brook (Likens et Bormann 1995) soient situés sur la même chaîne de montagne, la géologie locale est différente de celle des Chic-Chocs. Il semble toutefois reconnu que la coupe forestière affecte la qualité de l'eau, peu importe les conditions

géophysiques des sites où elle s'effectue. De plus, la récolte pourrait avoir un effet différent sur la qualité de l'eau d'un lac selon le rapport des apports par les cours d'eau sur les apports hypodermiques. La situation particulière qui caractérise la réserve faunique des Chic-Chocs n'est pas unique en Amérique du Nord, mais il semble que très peu de documentation scientifique soit disponible sur le sujet d'étude qui nous préoccupe ici. C'est pourquoi il y a un besoin de conduire des travaux de recherche appliqués à cette région.

1.1. Problématique des Chic-Chocs

À l'intérieur de la réserve faunique des Chic-Chocs, certains lacs ont un pH élevé qui se situe près de la limite supérieure de tolérance de la faune aquatique. Cet état naturel est relié à la présence de sols riches en calcaire sur les bassins versants. La réserve faunique des Chic-Chocs, tout comme l'ensemble des réserves fauniques du réseau de la Société des établissements de plein air du Québec (SÉPAQ), doit voir à la préservation des habitats fauniques et des paysages naturels dans une perspective de gestion intégrée des ressources. Les gestionnaires de la réserve faunique des Chic-Chocs et le Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) se questionnent à savoir si des modifications de conditions de drainage par la récolte forestière ne pourraient pas entraîner une augmentation du pH, qui serait néfaste à la faune piscicole. L'étude préliminaire réalisée par Faune-Experts (Guitard et Fleury, 2002) suggère que la récolte forestière pourrait être responsable de la baisse récente du succès de pêche de l'omble de fontaine du lac Joffre (réserve faunique de Matane). Suite à l'examen critique du rapport de Faune-Experts, Côté et Fortin (2003) ainsi que Langevin et Turcotte (2004) posent l'hypothèse que la récolte forestière dans la région des Chic-Chocs pourrait avoir un effet sur la physico-biochimie de l'eau des lacs par : (i) une augmentation des apports en eaux souterraines sursaturées en gaz carbonique (CO_2) et en carbonate de calcium (CaCO_3), suite à l'augmentation de l'écoulement après la coupe - le dégazage du CO_2 à la surface du lac entraînerait une hausse du pH accompagnée d'une production élevée de marne (CaCO_3 colloïdal, marl); et (ii) une augmentation des apports en phosphore pourrait stimuler la photosynthèse, ce qui augmenterait le pH et la formation de marne - un tel mécanisme est attendu dans les sols calcaireux, car le phosphore y est plus mobile que dans les podzols. Toutefois, aucune étude n'a pu valider ces postulats jusqu'à présent.

1.2. Objectif poursuivi

Mettre en évidence les impacts, qu'ils soient mineurs ou majeurs, de la récolte forestière sur la physico-chimie et le régime hydrologique des lacs alcalins de la réserve faunique des Chic-Chocs.

1.3. Hypothèse

La récolte forestière diminue l'évapotranspiration et l'interception, ce qui augmente les apports en eau souterraine vers les lacs marneux de la réserve faunique des Chic-Chocs, par rapport aux écoulements de surface (Figure 1). Ces eaux étant riches en carbonates et sursaturées en CO₂, elles contribuent à l'augmentation du pH du lac et peuvent mener à une hausse de la turbidité par la formation de marne ou calcite (Figure 2). Les figures suivantes illustrent ces interactions :

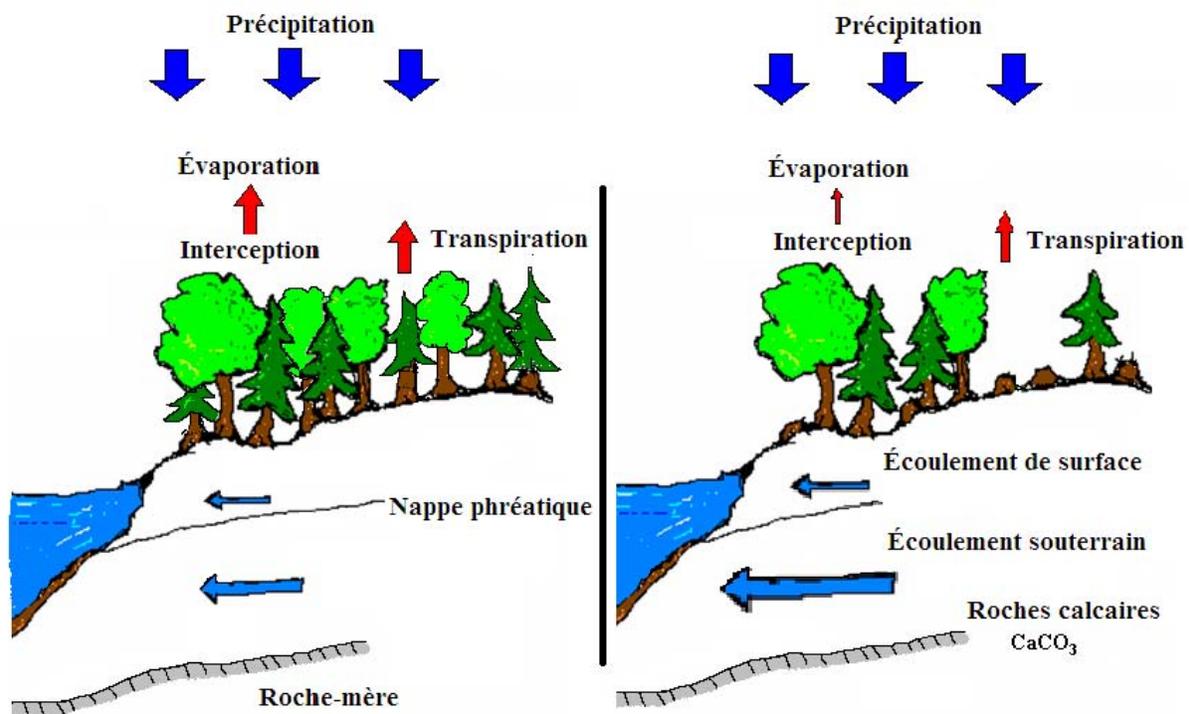


Figure 1. Schéma simplifié de l'influence de la récolte forestière sur le bilan hydrologique

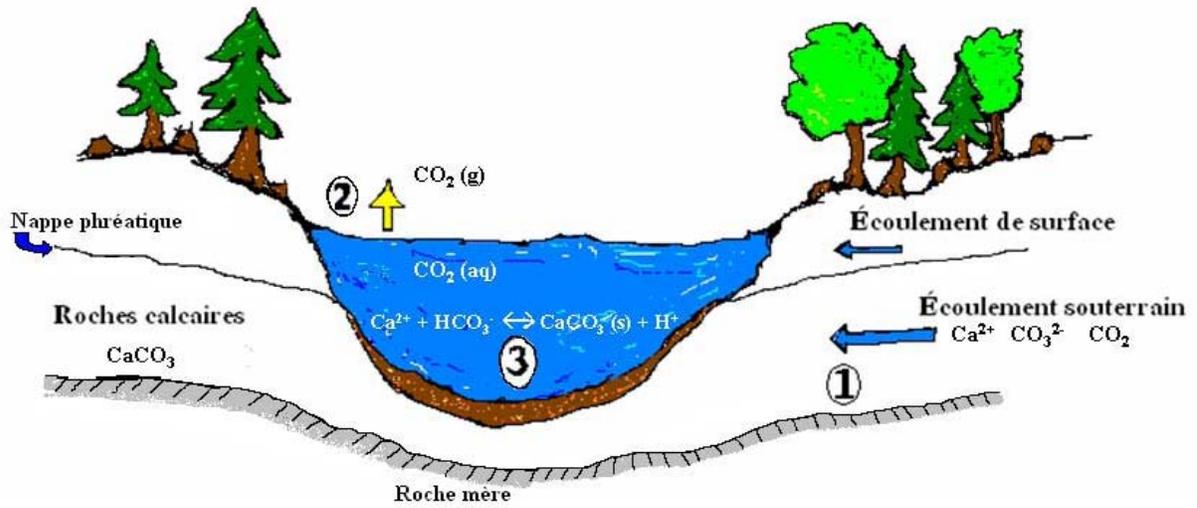


Figure 2. Exemple d'un lac marneux et ses interactions : (1) minéralisation de la roche calcaire (CaCO_3) par les eaux souterraines; (2) dégazage du CO_2 ($\text{pH}\uparrow$); et (3) précipitation de la calcite ($\text{pH}\downarrow$)

2. Matériel et méthodes

La méthode préconisée en est une de comparaison jumelée. Elle consiste à évaluer la physico-chimie de l'eau et le régime hydrologique de lacs avant et après la récolte forestière et d'en comparer les résultats à des lacs témoins où il n'y a pas eu de récoltes (Duhaime et Pinel-Alloul, 2005). La présente étude, qui s'échelonne sur une période de quatre ans, a nécessité une préparation logistique importante. Les caractéristiques physico-chimiques et le régime hydrologique des lacs sélectionnés ont requis deux étés de calibrage (débutant en 2007) et deux étés de post-traitement (à partir de 2009). Six bassins versants comparables ont été choisis dont deux ont été soumis à la récolte forestière au cours de l'automne 2008 (Lac Z et lac Ébron) et un troisième à l'été 2009 (2^e lac de Manche-d'Épée), sur une proportion définie de leur bassin versant. Le suivi de trois paires de lacs permettra d'atteindre un niveau de précision minimal et de respecter les postulats de base requis pour l'analyse statistique.

2.1. Choix des sites



Figure 3. Localisation géographique des lacs sélectionnés

Au tout début, il a été nécessaire de dresser une liste des lacs potentiels pour cette étude. Une révision du territoire sous aménagement de la compagnie GDS, soit l'aire commune 112-22, a permis d'identifier plusieurs lacs. Cette première étape a été effectuée principalement du début juin au début juillet 2007. Une confirmation de leur accessibilité et de

l'état de récolte de leur bassin versant a été faite par Luc Gagnon de GDS et Bermans Drouin de la réserve faunique

des Chic-Chocs. Une visite sur le terrain a ensuite été effectuée afin de confirmer l'exactitude de ces choix préliminaires et d'effectuer un premier échantillonnage sur les lacs sélectionnés. Cette première visite s'est échelonnée du 16 au 20 juillet 2007.

Parmi les neuf sites préliminairement identifiés, seulement six ont offert les conditions nécessaires à l'établissement d'un dispositif expérimental valable. Quatre d'entre eux se situent à l'intérieur de la réserve faunique des Chic-Chocs, tandis que les deux autres se situent à proximité de la municipalité de Manche-d'Épée (Figure 3).

2.1.1. Paire de lacs n° 1

Lac Ébron : Localisation : 49°02'33"N, 65°53'06"O.

Lac situé à la marge du Parc de la Gaspésie et de la réserve faunique des Chic-Chocs. Accès facile par la route du Mont-St-Pierre (route 2) et celle du lac à Pierre. Un court portage d'environ 100 m est nécessaire afin d'atteindre le lac Ébron. Le sentier à emprunter est situé à gauche du stationnement du lac à Pierre. Une chaloupe peut être réservée auprès des autorités du Parc de la Gaspésie. Lac peu profond (~ 1,5 m) avec bassin versant escarpé. L'exutoire se jette dans le lac à Pierre. Nous avons noté un passage possiblement fréquent de chaloupes dans l'exutoire.

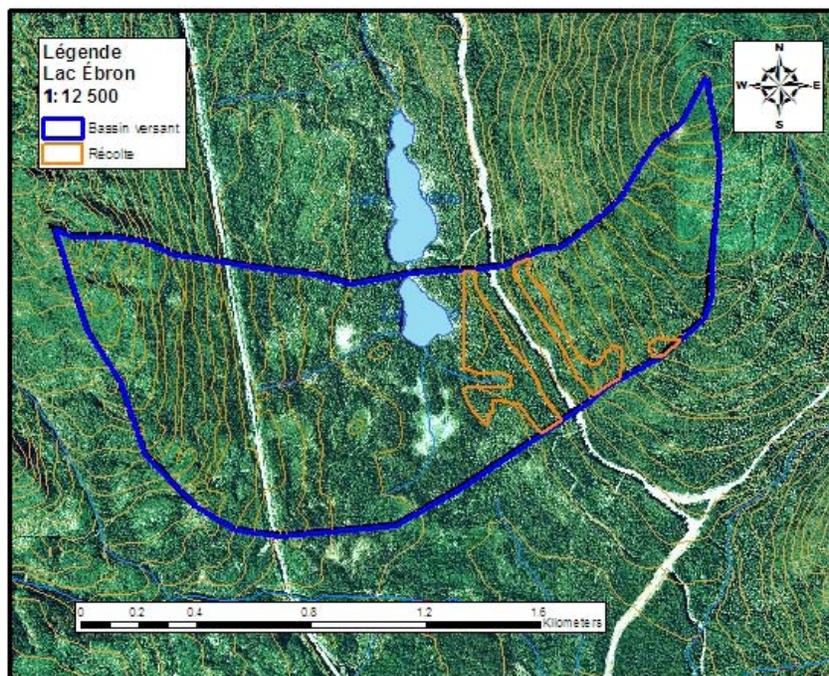


Figure 4. Carte topographique délimitant le bassin versant du lac Ébron

Lac des Pics : Localisation : 49°01'03"N, 65°50'00"O.

L'accès à ce lac est facile. Une chaloupe est accessible sur réservation auprès des gens de la SÉPAQ (Chic-Chocs). Lac peu profond (~1,5 m) dont le bassin versant est escarpé. Exutoire à seuil naturel formé de branches et de boue. Présence de la roche mère en surface.

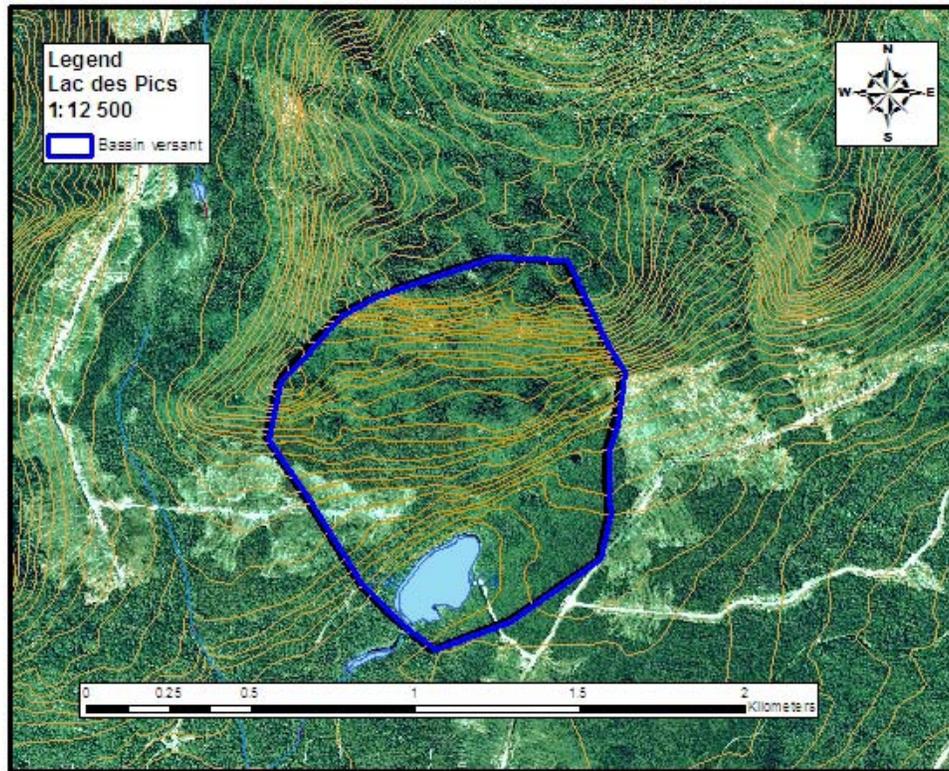


Figure 5. Carte topographique délimitant le bassin versant du lac des Pics

2.1.2. Paire de lacs n° 2

L'accès routier à ces deux lacs est parfois boueux et enlisant. Ils sont plus profonds que les autres lacs étudiés. Pour atteindre ces lacs, il faut faire un portage de ~ 550 m, dont les derniers 50 m sont dans une tourbière.

Lac X : Localisation : 49°03'59"N, 65°40'10"O.

À l'exutoire, il y a un seuil naturel fait d'amas de branches de 60 cm de haut pouvant fuir à divers endroits. Par la suite, l'écoulement se fait dans une cédrière par un ruisseau dont les contours sont mal définis.

Lac Z : Localisation : 49°03'59"N, 65°39'13"O.

L'exutoire est très diffus dans une zone tourbeuse large (cédrière). On note le vestige d'un barrage de castor et un fond de sable fin au début de l'exutoire à 80 cm sous l'eau.

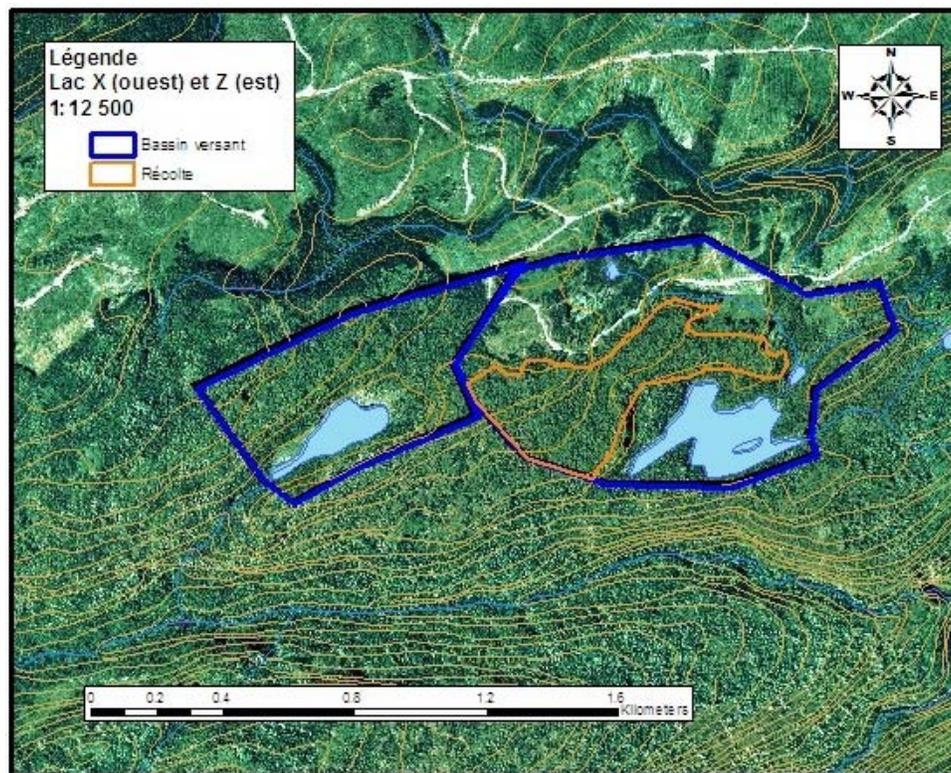


Figure 6. Carte topographique délimitant les bassins versants du lac X (gauche) et du lac Z (droite)

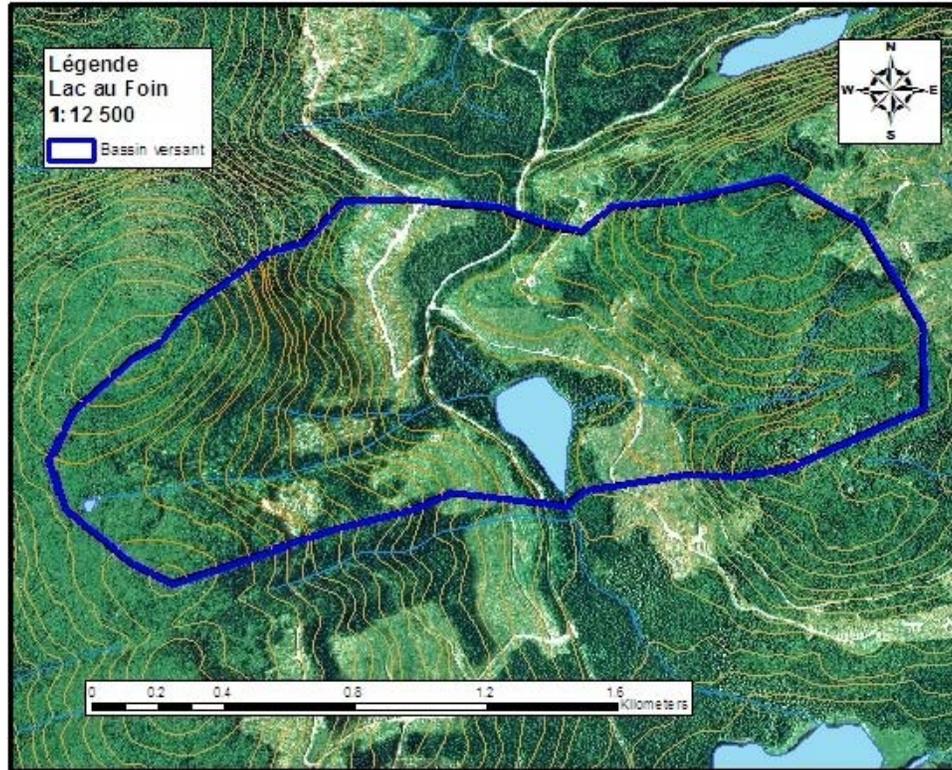


Figure 7. Carte topographique délimitant le bassin versant du lac au Foin

2.1.3. Paire de lacs N° 3

Lac au Foin : Localisation : 49°12'15"N, 65°24'52"O.

Accès par une route passante, avec stationnement accessible. Court portage de 50 m pour accéder au lac. Exutoire avec petit seuil de 30 cm, pouvant fuir. Petit ruisseau de 2,5 m de large par 20 cm d'eau; peut possiblement être jaugé. Devient rapidement diffus ensuite.

2° lac de Manche-d'Épée : Localisation : 49°11'12"N, 65°26'34"O.

Accès routier hasardeux avec sol très en pente et souvent miné par les pluies. Place de stationnement très restreinte. Petit portage de 50 m pour accéder au lac. Le fond du lac est très vaseux et quelques sources d'eau sont visibles (1,2 m). L'exutoire présente un seuil naturel en pierres. On note les vestiges d'un ancien barrage de castors.

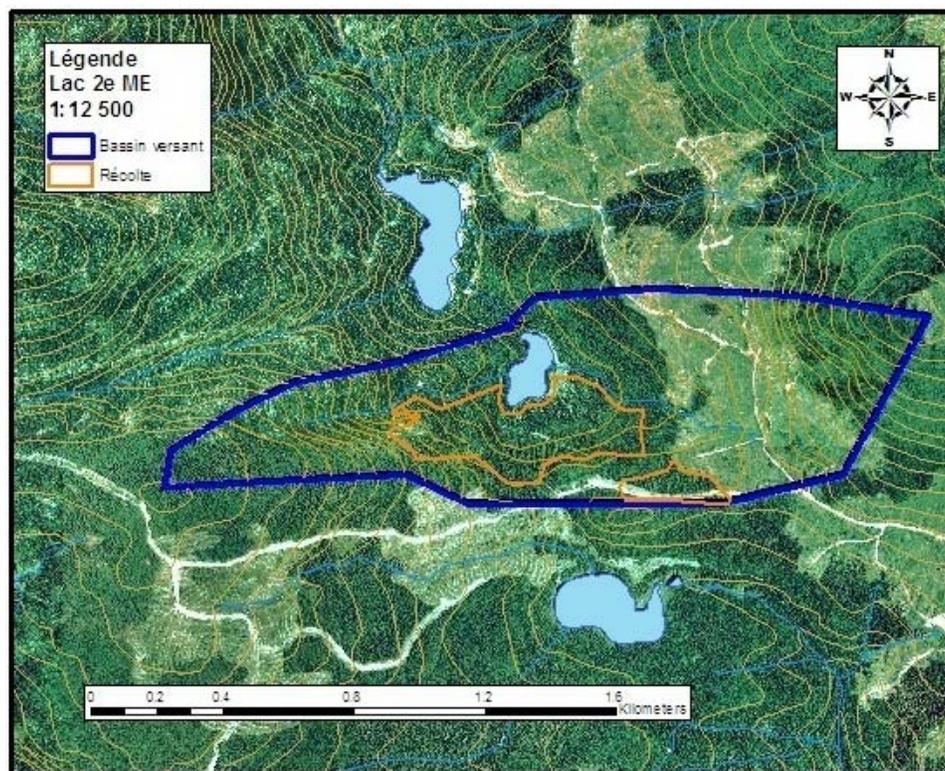


Figure 8. Carte topographique délimitant le bassin versant du 2^e lac de Manche-d'Épée

2.2. Méthode d'échantillonnage de l'eau des lacs

Les paramètres physico-chimiques suivants ont été mesurés dans les lacs sélectionnés :

- le pH (sonde *Idronaut Ocean Seven 316*; pH-mètre *UP10 Denver Instruments* avec électrode combinée *Accumet 13-620-299*);
- la turbidité (absorbance à 600 nm entre un échantillon, filtrée et non-filtrée; spectrophotomètre UV-visible *Varian Cary 100 Bio*);
- la conductivité (sonde *Idronaut Ocean Seven 316*);
- l'oxygène dissous et la température (sonde *Idronaut Ocean Seven 316*; sonde *YSI 50B*);
- les anions majeurs dissous (Cl^- , F^- , SO_4^{2-} , NO_3^- ; chromatographie ionique; *Dionex ICS-2000*);
- les cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) et les éléments traces (Fe, Al, Mn, Ba, Cu, Zn, P) dissous et particulaires (ICP-AES; *Varian Vista AX*);

- la chlorophylle *a* (extraction à l'acétone et mesure de fluorescence avec fluorimètre; *Turner Designs 10-005R*);
- le carbone inorganique dissous, CID (H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-} , CO_2 ; chromatographie en phase gazeuse; *Varian Chrompak CP-3800*);
- le carbone organique dissous, COD (analyseur de carbone total; *Shimadzu TOC-V_{CPH}*);
- la filtration des échantillons se fait à l'aide de membrane en polycarbonate de 0,45 μm de porosité (*Nuclepore*). Ces membranes sont insérées dans des porte-filtres en polypropylène (joint d'étanchéité en silicone). Les filtres et porte-filtres sont abondamment rincés avec de l'eau ultra-pure avant utilisation.

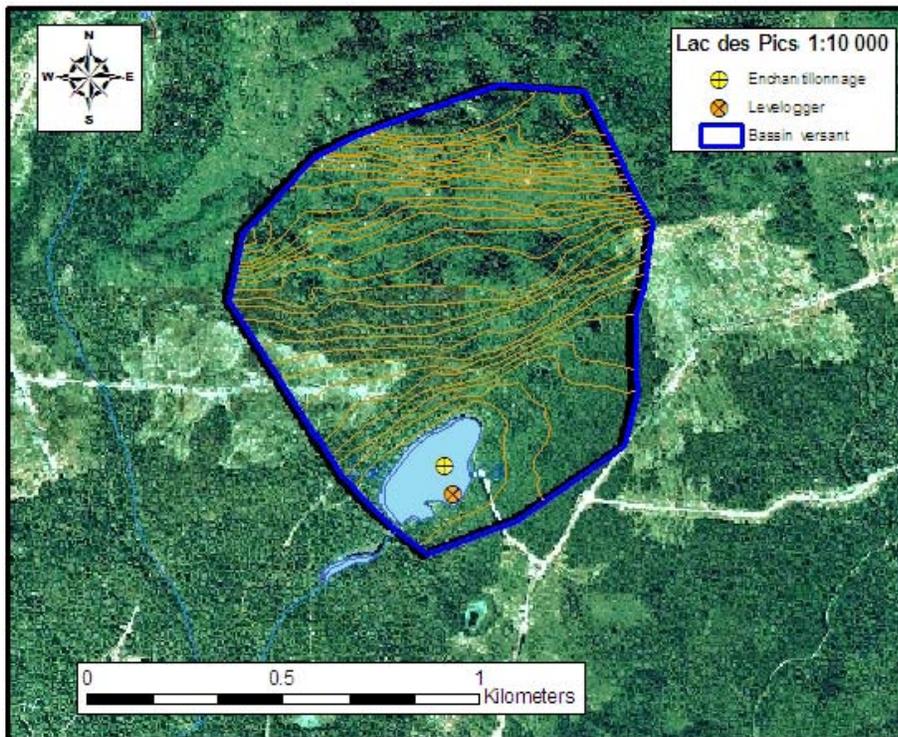


Figure 9. Exemple de localisation d'un point d'échantillonnage et du capteur de pression submersible (*Levellogger*) au lac des Pics

Tous les lacs ont été échantillonnés en leur point le plus profond à l'aide d'embarcations légères (chaloupe, zodiac ou canot). Chaque point d'échantillonnage a été géoréférencé, puis cartographié (Figure 9). Le lieu d'échantillonnage est connu avec précision, ce qui permet de collecter les échantillons toujours au même endroit.

2.2.1. Sonde multiparamétrique

Lors du premier échantillonnage, effectué en juillet 2007, le pH, la conductivité, l'oxygène dissous et la température ont été obtenus de façon efficace et précise sur le terrain, à l'aide d'une sonde multiparamétrique submersible *Idronaut* (*Ocean Seven 316*). Celle-ci permet l'acquisition de données en temps réel, ce qui a l'avantage de rendre possible l'intégration de toutes les données en un très court laps de temps et de les acquérir sur toute la hauteur de la colonne d'eau (profil vertical). La sonde, reliée à un système d'alimentation et à un ordinateur portable, a été descendue graduellement dans l'eau en effectuant des plateaux de 50 ou 100 cm, afin de permettre la stabilisation des lectures d'oxygène dissous lorsque nécessaire. La concordance des données de descente et de remontée a aussi été utilisée pour valider l'exactitude des données acquises tout au long de la colonne d'eau.

Lors des échantillonnages suivants, le pH, l'oxygène dissous et la température de l'eau à la surface des lacs ont été obtenus à l'aide de deux sondes : un pH-mètre (non-submersible) et un oxymètre (submersible). L'utilisation de la sonde multiparamétrique *Idronaut* a été jugée non nécessaire pour la suite du projet, étant donné les faibles variations des paramètres mesurés sur les lacs peu profonds (< 2 m). Pour les deux lacs plus profonds (4 et 7 m), une pompe submersible a été utilisée afin de puiser l'eau de différentes profondeurs jusqu'à la surface et d'en mesurer le Ph, à l'aide du pH-mètre, tandis que l'oxymètre a été descendu manuellement dans la colonne d'eau.

L'étalonnage des différents capteurs de pH et d'oxygène dissous a été systématiquement effectuée au début et à la fin de chaque jour d'échantillonnage. Aucun écart notable n'a été observé au cours de ces étalonnages, indiquant le bon fonctionnement des capteurs utilisés.

2.2.2. Description du protocole de prise d'échantillons d'eau

Les éléments traces, les anions et les cations majeurs dissous, de même que la chlorophylle *a*, sont des paramètres qui doivent être mesurés en laboratoire à l'aide d'équipements spécialisés.

Pour ce faire, différents volumes d'eau ont été collectés d'après un protocole spécifique afin d'être ensuite transportés jusqu'à nos laboratoires pour être analysés.

Sur cinq des six lacs à l'étude, l'échantillonnage de l'eau a été fait à la surface uniquement, tandis que le lac le plus profond (7 m; lac Z) a été échantillonné à la surface et sous la thermocline, soit à environ 5,5 m de la surface.

Voici une liste des échantillons prélevés :

- trois flacons stériles de 50 ml d'eau brute pour l'analyse de la chlorophylle *a*;
- trois flacons (préalablement lavés à l'acide) de 15 ml d'eau brute pour l'analyse des cations totaux;
- trois flacons (préalablement lavés à l'acide) de 15 ml d'eau filtrée à 0,45 µm (filtre en polycarbonate préalablement rincés) pour l'analyse des cations dissous;
- trois flacons de 15 ml d'eau filtrée à 0,45 µm pour l'analyse des anions dissous;
- trois tubes avec septums acidifiés, pesés et purgés préalablement à l'hélium et auxquels 1 ml d'eau filtrée à 0,45 µm est ajouté à l'aide d'une aiguille et d'une seringue pour l'analyse du contenu en carbonates (carbone inorganique dissous);
- une bouteille de 500 ml d'eau brute à titre préventif (en cas de perte d'un échantillon mentionné plus haut).

Trois « blancs de terrain » ont aussi été effectués à chaque mission d'échantillonnage. Cette étape consiste à effectuer le protocole d'échantillonnage complet en utilisant de l'eau ultra-pure du laboratoire qui a été apportée sur le terrain. L'analyse en laboratoire de ces échantillons permet d'identifier les contaminations possibles dues à l'approche méthodologique et de détecter des faux-positifs ou de corriger les valeurs des échantillons d'eau de lac au besoin.

Puisque certains composés chimiques sont susceptibles d'être affectés par la chaleur et la lumière, une fois remplis, les bouteilles, les flacons et les tubes étaient immédiatement déposés dans une glacière contenant de la glace. Les échantillons récoltés pour le dosage des cations et des éléments traces étaient acidifiés à 0,2 % v/v dans les heures suivantes, à l'aide d'acide nitrique concentré (HNO₃).

2.3. Instrumentation hydrométéorologique

Afin de documenter les impacts de la coupe forestière sur le régime hydrologique, nous avons entrepris des travaux afin d'effectuer le bilan hydrologique des lacs à l'étude. Ainsi, un protocole d'instrumentation hydrométéorologique a été développé en fonction des ressources financières octroyées dans le cadre de cette étude. Il a donc été décidé de mesurer la quantité d'eau transitant par les lacs à l'étude et de lier cette information à des données météorologiques représentatives. Ces mesures sont réalisées à l'aide d'une station météorologique et de capteurs de pression submersibles.

2.3.1. Station météorologique

Une station météorologique a été installée le 11 octobre 2007 à proximité des chalets du lac Mont-Louis. Il s'agit d'une station autonome équipée d'un précipitomètre à auget basculant, muni d'un adaptateur non chauffant, pour les précipitations solides, d'un paravent de type *Alter*, d'un thermomètre, d'un hygromètre, d'un anémomètre, d'un baromètre et de deux pyranomètres (Figure 10).



Figure 10. Station météorologique installée à proximité des chalets du lac Mont-Louis

Les informations recueillies à intervalles de 15 minutes par la station sont les suivantes :

- pression atmosphérique (mbar);
- précipitations (mm);
- température (°C);
- humidité relative (%);
- vitesse (m/s) et direction du vent;
- radiation solaire (W/m^2).

La station a été achetée chez *Intermountain Environmental* aux États-Unis (Utah). Cette compagnie distribue les équipements scientifiques d'Onset Computers, les fabricants de la station choisie. Deux trépieds de 3 m ont été achetés, soit un pour l'acquisiteur de données et les appareils électroniques et un autre trépied pour le précipitomètre et le paravent. Des tuyaux et manchons en acier galvanisé ont été employés pour stabiliser ces instruments.

Selon la fiche d'entretien du précipitomètre hivernal, le mélange d'antigel non-toxique et biodégradable, composé d'un mélange 50/50 de propylène glycol et d'éthanol dénaturé, doit être changé après 250 mm de précipitation, car la dilution du mélange le rend graduellement de moins en moins tolérant au gel. Lors de la dernière sortie d'échantillonnage en août, les données enregistrées par la station sont téléchargées, les batteries alcalines sont changées pour des batteries au lithium (plus résistantes au froid) et un antigel est ajouté dans le précipitomètre. Le temps de vidange est coordonné en utilisant, à titre de référence, la sommation des précipitations accumulées dans la région (Stations d'Environnement Canada de Cap-Chat et Cap-Madeleine). Victor Ouellet, un employé saisonnier de la réserve faunique des Chic-Chocs, résident de Mont-Saint-Pierre et titulaire du permis de trappe sur le territoire où la station est installée, était responsable des vidanges du précipitomètre lors de la période hivernale. Les données de la station du lac Mont-Louis sont validées avec deux stations météorologiques à proximité de cette dernière (Figure 11). Ces stations sont gérées par le Ministère du Développement Durable de l'Environnement et des Parcs (MDDEP).

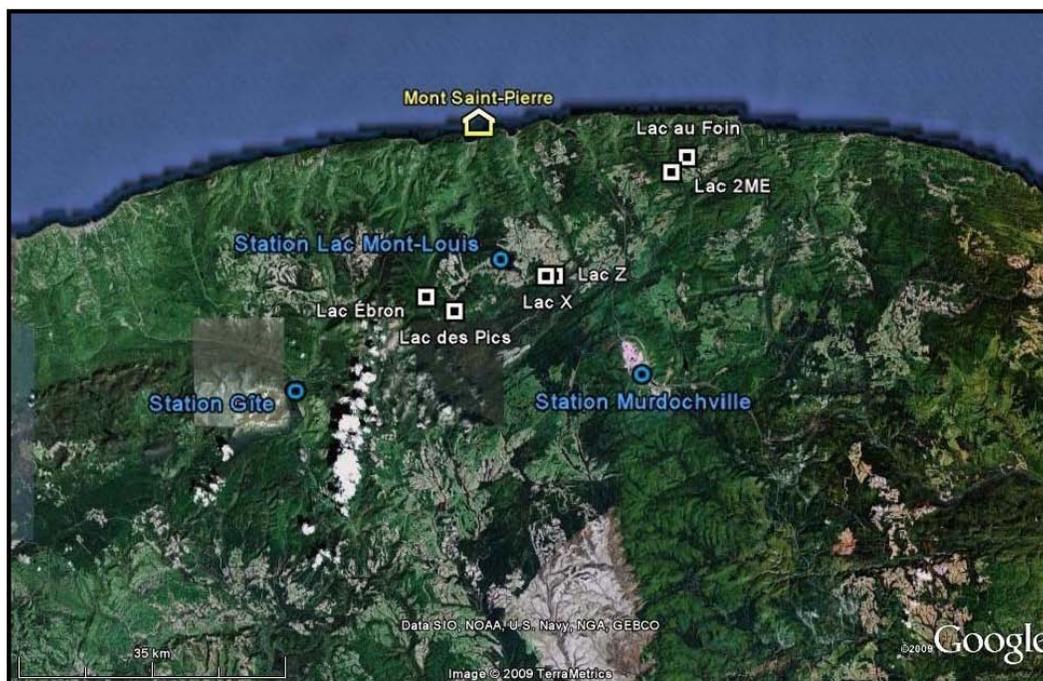


Figure 11. Localisation de la station météorologique près du lac Mont-Louis (Station lac Mont-Louis) et des stations de références (Station Gîte et Station Murdochville)

2.3.2. Station de jaugeage

La hauteur d'eau des lacs est obtenue à l'aide de capteurs de pression submersibles. Le modèle de capteur utilisé est le *Gold M5*, fabriqué par *Solinst* (Georgetown, ON). Ces capteurs sont parfaitement autonomes et étanches, ce qui permet de les installer sous l'eau pour une longue période de temps. Ils sont ancrés à environ 1 m sous la surface de l'eau dans les lacs sélectionnés. L'ancrage est constitué d'un tube de PVC noir qui est enfoncé directement dans les épais sédiments (Figure 12). Ils ne devraient pas directement subir de gel au cours de l'hiver et ainsi permettre la mesure du niveau du lac en continu (intervalles de 60 minutes), même lors de la période de dégel. Les deux premiers capteurs ont été installés à l'automne 2007, puis les autres au printemps 2008. Les données sont téléchargées lors de la première sortie au printemps ainsi qu'à la fin de la saison d'échantillonnage (fin du mois d'août). Ceci permet donc de connaître la fluctuation dans la hauteur des lacs. L'emplacement de chaque capteur submersible a aussi été géoréférencé, puis cartographié pour permettre un repérage plus facile (Figure 9).

Les capteurs de pression submersibles mesurent la pression occasionnée par l'atmosphère (P_{air}) et la pression occasionnée par la colonne d'eau (P_{eau}) au-dessus de ces derniers.

$$P_{\text{capteur}} = P_{\text{air}} + P_{\text{eau}}$$

Afin de connaître la quantité d'eau au-dessus du capteur, il suffit donc de soustraire à la pression mesurée par le capteur la pression barométrique mesurée à la station météorologique. Cette mesure de pression est ensuite transformée en équivalent d'hauteur d'eau (m). Cette démarche correspond à une compensation barométrique (Annexe 1).



Figure 12. Système d'ancrage du capteur de pression submersible

Lors des sorties d'échantillonnages, des mesures sont faites pour valider et ajuster les données saisies par les capteurs de pression submersibles et pour obtenir la hauteur d'eau totale. En effet, les hauteurs d'eau obtenues après compensation barométrique par les capteurs donnent seulement la hauteur d'eau au-dessus de ces derniers (Figure 13). Il faut donc ajouter la hauteur d'eau du fond du lac jusqu'au point d'enregistrement du capteur (Figure 13). Ces mesures sont faites avec un poids de sonde. Des mesures sont aussi faites sur des repères fixes établis sur chaque lacs (roches, arbres). Ces mesures permettent de faciliter et d'augmenter la précision du calage des hauteurs d'eau.

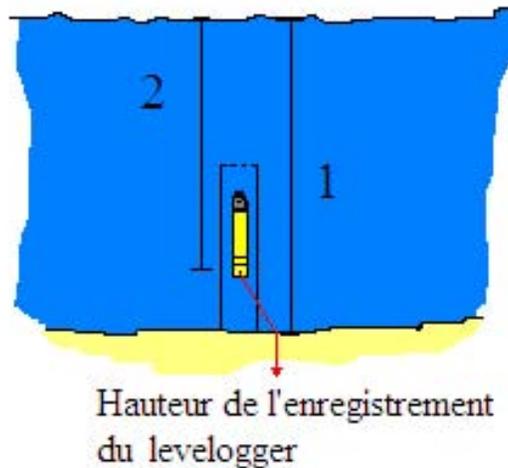


Figure 13. Schéma illustrant les mesures faites avec le poids de sonde. (1) Hauteur d'eau du lac; (2) hauteur de l'enregistrement

2.3.3. Levés bathymétriques

Les levés bathymétriques ont été réalisés lors des étés 2008 et 2009. Ces levés permettent d'établir le volume précis des lacs pour différentes hauteurs d'eau et cette information est utile pour établir le bilan hydrologique de chaque lac. Un *GPS-Sonar* a été utilisé pour faire le levé dans les zones plus profondes du lac et une station totale (Figure 14) a été utilisée pour les zones à faible niveau d'eau et pour délimiter la rive. Cette combinaison d'instruments permet de mesurer rapidement les zones profondes et d'augmenter la précision du relevé, grâce à la station totale, pour les zones peu profondes et les rives.



Figure 14. Levé bathymétrique à l'aide d'une station totale

3. Résultats

3.1. Description des caractéristiques physiques des lacs

La superficie du bassin versant de chacun des lacs a été déterminée à partir des données topographiques les plus précises de la région (BDTQ; 1:20 000) à l'aide du logiciel PHYSITEL développé à l'INRS-ETE (Rousseau *et al.*, soumis). La superficie de chaque bassin versant soumis à la récolte forestière a été fixée d'après les coupes prévues au plan quinquennal d'aménagement forestier (Tableau 1). Le pourcentage des superficies des bassins versants à l'étude affectés par la récolte se situe entre 7 % et 30 %, d'après le plan d'intervention actuel.

Tableau 1. Description des caractéristiques physiques des lacs sélectionnés

Lacs	Profondeurs (m)	Altitudes (m)	Bassins versants (ha)	Lacs (ha)	Ratios BV:Lac	Récoltes passées# (%)	Récoltes actuelles (%)
Ébron	1,5	551	168	2,6	65:1	0	7**
Pics	1,2	586	92	3,8	24:1	5 (1998)	0
X	5,0	430	34	2,8	12:1	1 (1995)	0
Z	7,2	392	71	6,3	11:1	16 (1995)	30**
Foin	1,2	371	210	4,7	45:1	23 (1994)	0
2ME	1,2	386	104	1,9	55:1	26 (1994)	16***

L'année de récolte principale apparaît entre parenthèses.

* Une récolte forestière est prévue sur le bassin versant de ce lac, mais il a été convenu avec l'exploitant de la retarder jusqu'à la fin de l'étude.

** Les travaux de récoltes ont eu lieu à la fin de l'automne 2008.

*** Les travaux de récoltes ont eu lieu au début du mois de septembre 2009.

3.1.1. Levés bathymétriques

La campagne des levés bathymétriques s'est terminée à l'été 2009. La combinaison du *GPS-Sonar* et de la station totale a donné de bons résultats (Figures 15 à 20). En établissant la bathymétrie des lacs, le volume d'eau a pu être calculé selon les diverses hauteurs enregistrées par le capteur de pression submersible. Une équation hauteur/volume, qui décrit la relation entre la hauteur d'eau au point d'enregistrement et le volume d'eau total, a pu être établie. Cette équation est propre à chaque lac. Les données de hauteurs récoltées par les capteurs submersibles sont transformées en volume avec ces équations.

Paire de lacs N° 1

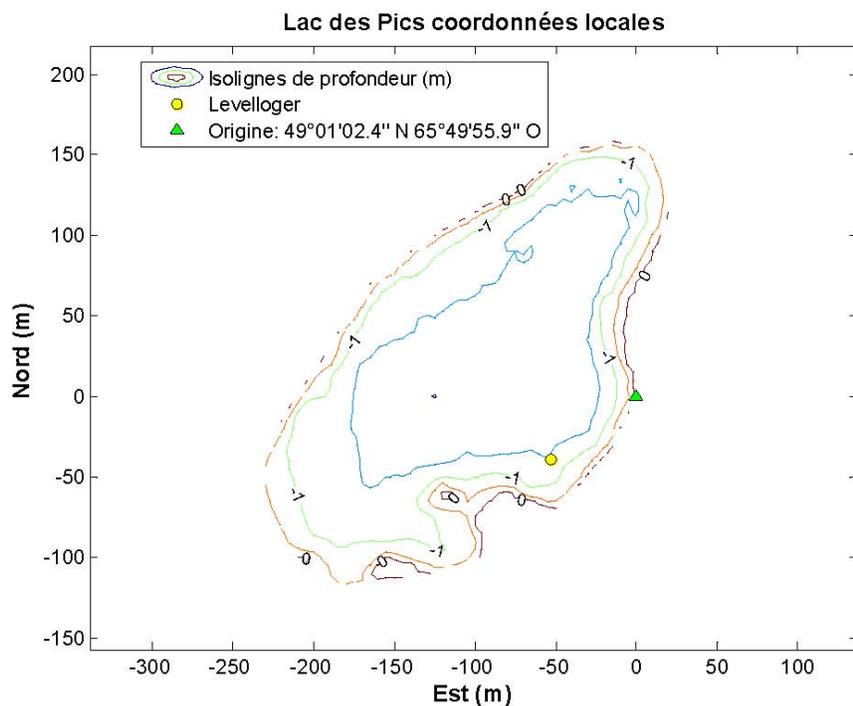


Figure 15. Levé bathymétrique du lac des Pics

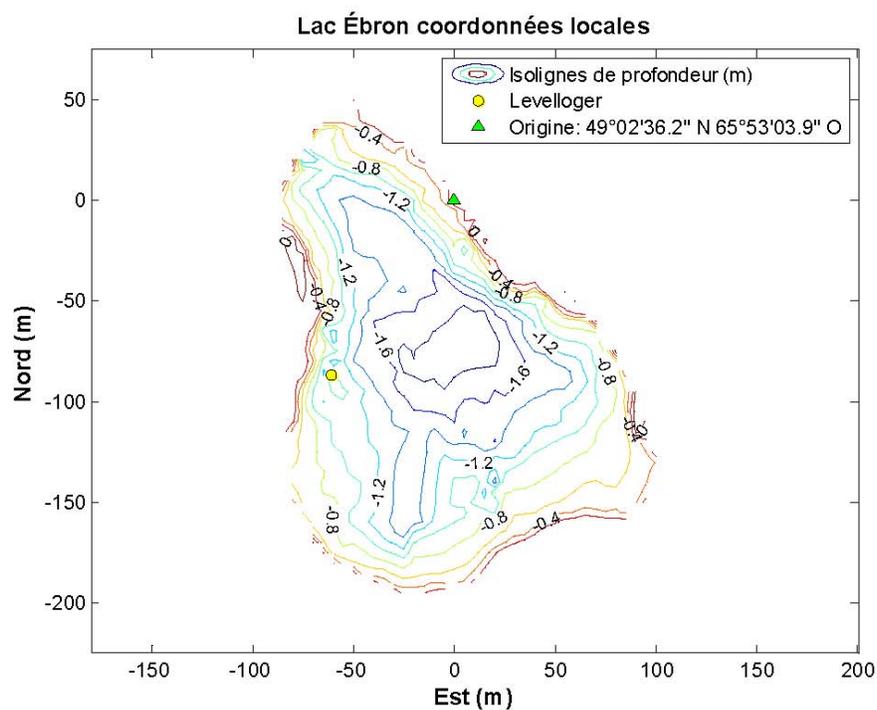


Figure 16. Levé bathymétrique du lac Ébron

Paire de lacs N° 2

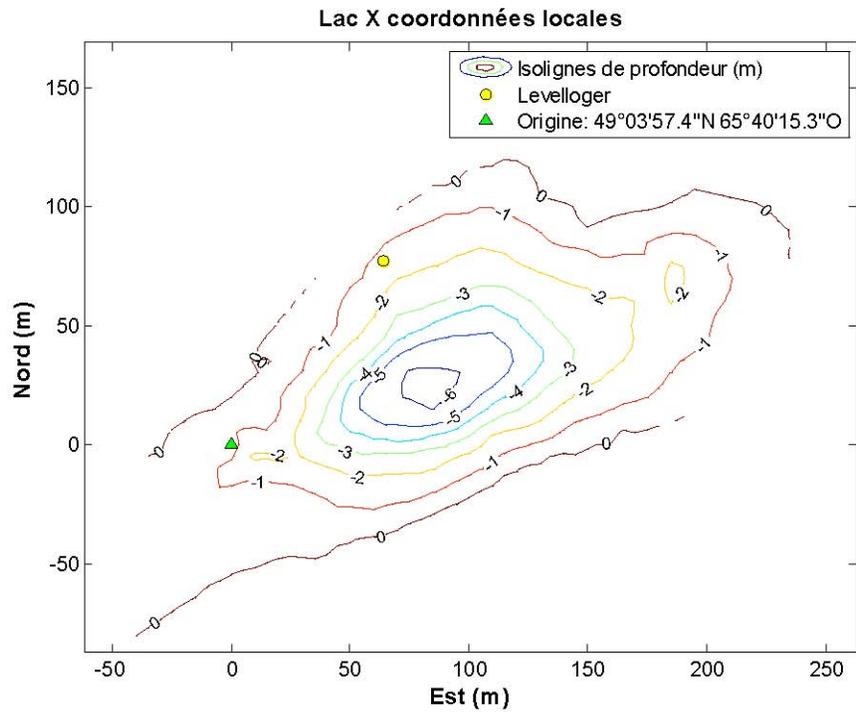


Figure 17. Levé bathymétrique du lac X

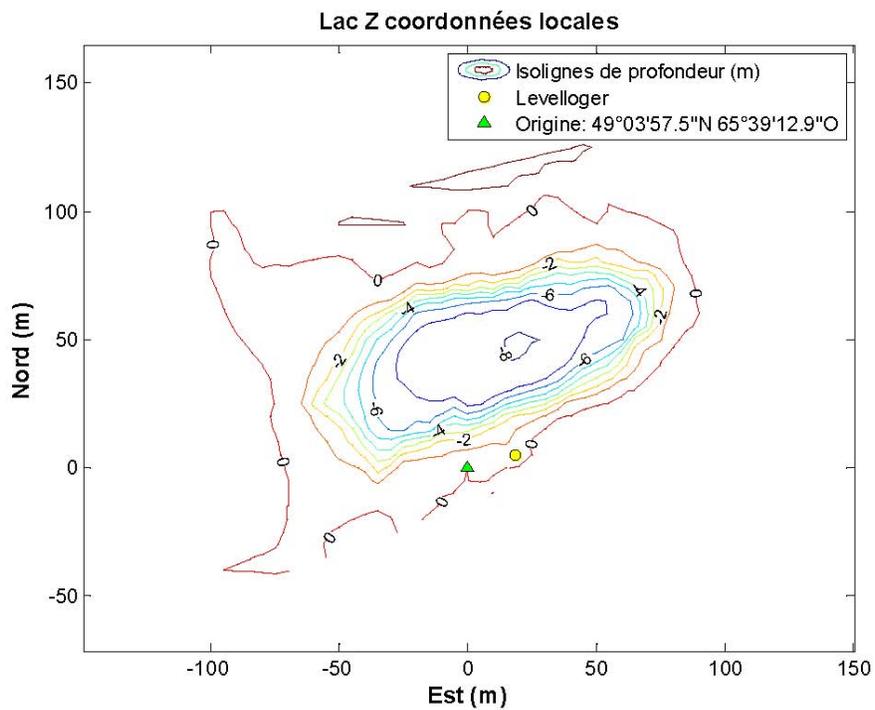


Figure 18. Levé bathymétrique du lac Z

Paire de lacs N° 3

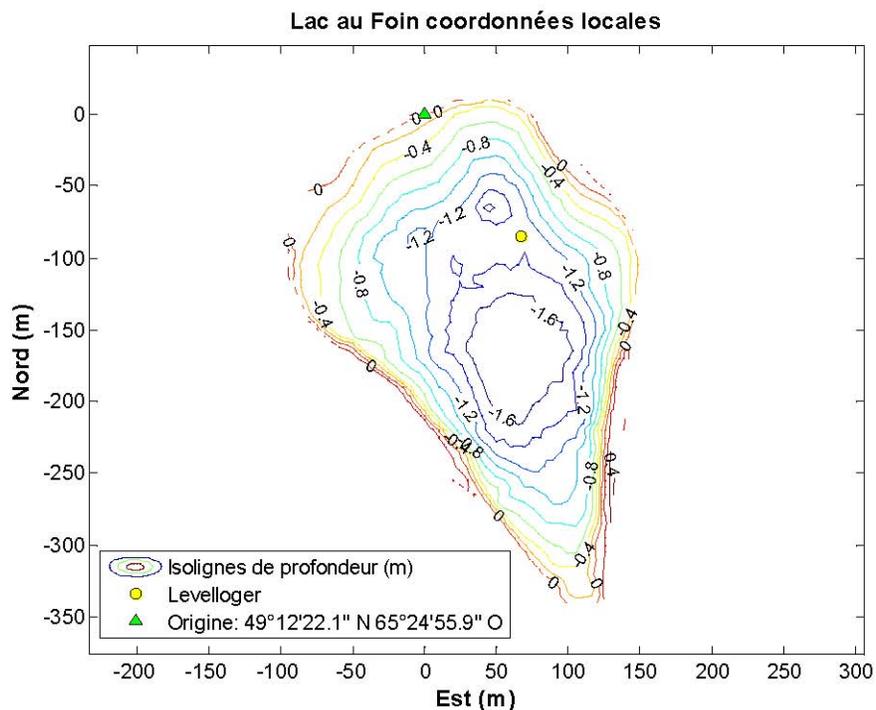


Figure 19. Levé bathymétrique du lac au Foin

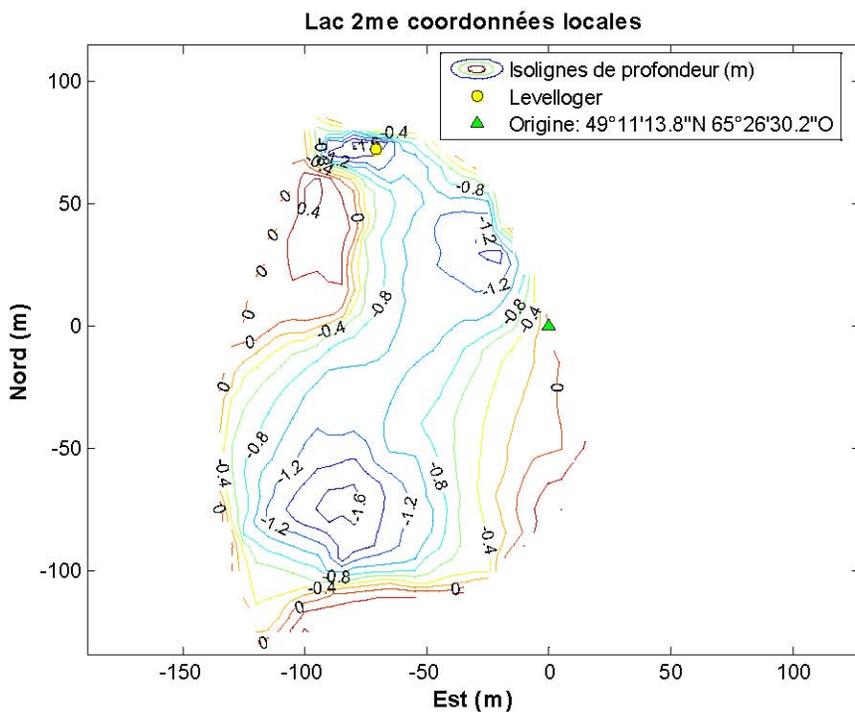


Figure 20. Levé bathymétrique du 2^e lac de Manche-d'Épée

3.2. Suivi de la physico-chimie des lacs

Afin de donner un aperçu initial de la physico-chimie de chaque paire de lacs, nous avons présenté les données obtenues à l'aide de la sonde *Idronaut* à la figure 21 lors des visites de terrain du 17 au 19 juillet 2007. Nous avons effectué plusieurs passages de la sonde dans la colonne d'eau avec acquisition des données en temps réel (~ 4 lectures/sec). Afin de présenter les données de façon claire et concise, nous les avons compilées et regroupées par tranche d'épaisseur variable selon la profondeur de chaque lac. Ainsi, les barres d'erreurs représentent les écarts-types des valeurs moyennes pour chaque segment de profondeur. On notera une augmentation de l'incertitude dans les segments où des changements notables se dessinent dans les profils verticaux. Ceci est dû au regroupement des données ainsi qu'au délai de réponse de certains capteurs de la sonde qui sont sensibles à la vitesse de déplacement de la sonde.

Les profils verticaux illustrés à la figure 21 confirment la similarité des caractéristiques physico-chimiques à l'intérieur de chaque paire de lacs. Les lacs X et Z sont les plus minéralisés (conductivité entre 0,19 et 0,28 mS/cm) et les lacs les moins minéralisés sont les lacs Ébron et des Pics (conductivité entre 0,056 et 0,063 mS/cm; notez que les échelles de conductivité sont différentes pour chaque paire de lacs). En ce qui concerne l'oxygène dissous, les eaux de surface sont proches de la saturation.

Le lac Z montre une stratification au cours de l'été avec la formation d'une thermocline vers le 5,5 mètres de profondeur. Le lac Z est donc échantillonné en surface et en profondeur sous la thermocline (5,5 m) lors de chaque visite. Le lac X, étant moins profond que le lac Z, ne montre pas de stratification au courant de l'été. Le suivi des paramètres physico-chimiques sur cette paire de lacs se fait avec les échantillons en surface. Les échantillons en profondeur recueillis au lac Z servent à titre indicatif seulement.

Le fond du 2^e lac de Manche-d'Épée (2ME) est caractérisé par la présence de quelques résurgences d'eau souterraine (eau plus froide et moins oxygénée). Le profil vertical présenté à la figure 21 pour ce lac a d'ailleurs été obtenu directement au-dessus de l'une de ces résurgences. Celles-ci présentent certains paramètres physico-chimiques (T° , pH, OD) différents des eaux du lac. Le mélange de ces eaux souterraines avec celles du lac se fait graduellement, limitant leurs impacts près des résurgences et en profondeur. L'échantillonnage en surface n'est pas affecté

par les résurgences. Par mesure de précaution, le point d'échantillonnage est quand même situé à distance d'une résurgence.

Nous avons prélevé des échantillons de surface pour analyse (cf. section 2.2.2) en juillet et août 2007 ainsi qu'en juin, juillet et août 2008 et 2009. Les valeurs de pH sont présentées à la figure 22. Les valeurs moyennes d'autres paramètres pour les échantillons de surface récoltés lors de la période de calibration sont présentées dans les tableaux 2 et 3. Les résultats complets pour chaque sortie d'échantillonnage sont disponibles à la fin de ce document (Annexe 2).

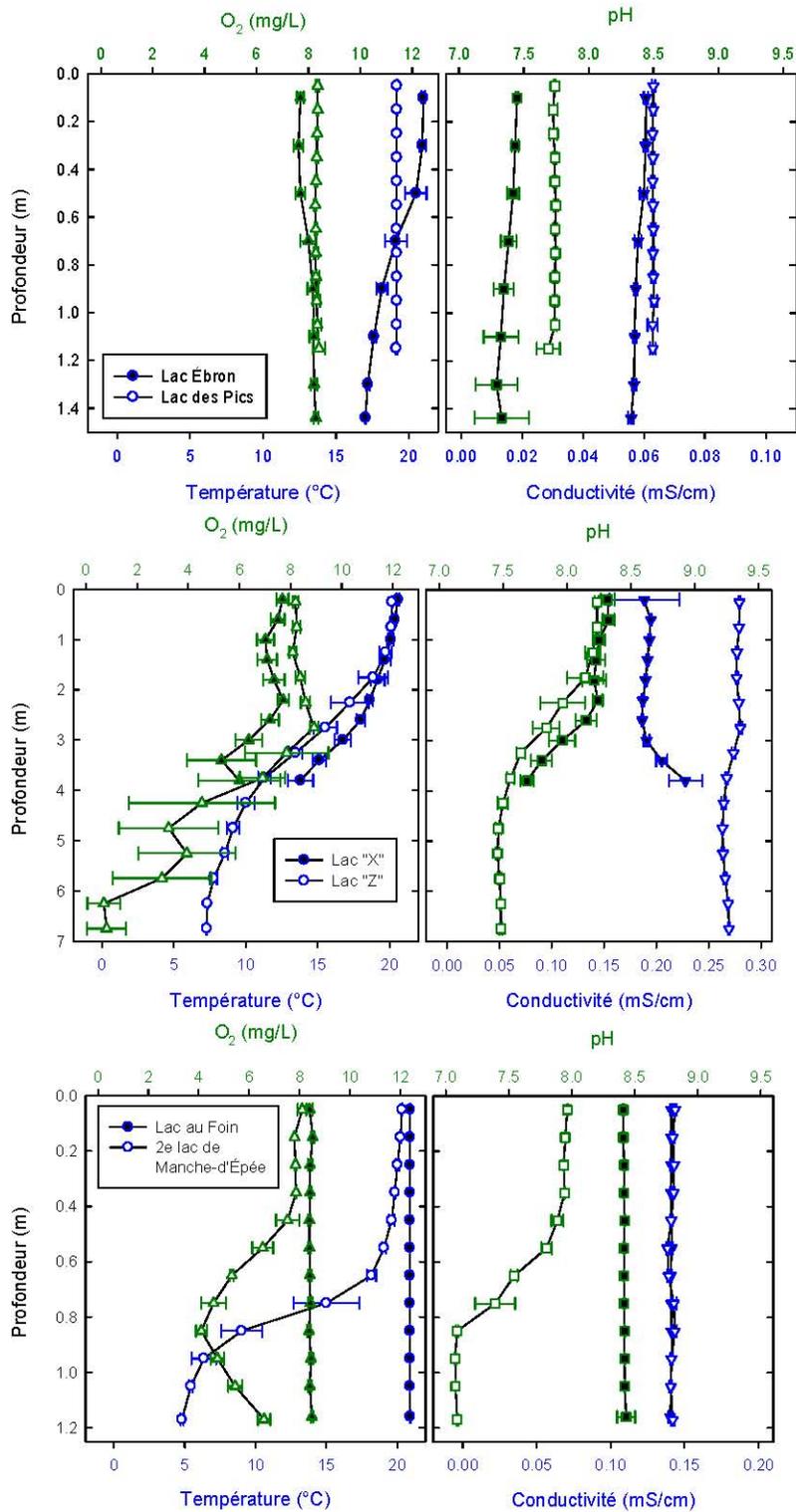


Figure 21. Profils verticaux de quatre paramètres mesurés par sonde submersible dans chaque paire de lacs entre les 17 et 19 juillet 2007 (●○ : Température; ▲△ : O₂ dissous; ■□ : pH; ▼▽ : Conductivité)

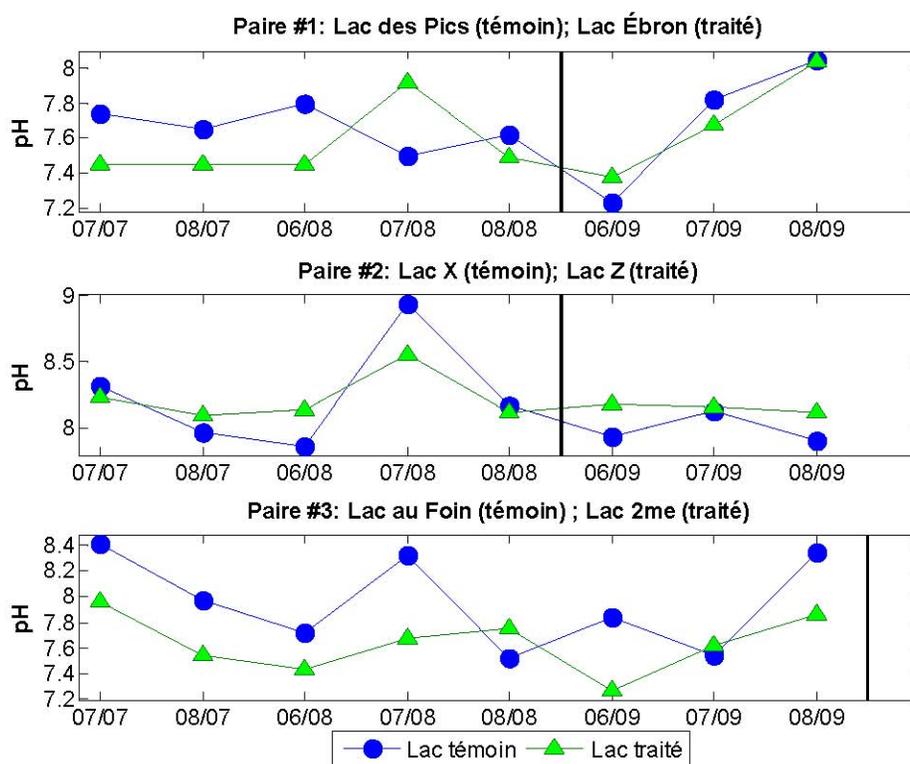


Figure 22. Évolution du pH dans les lacs sélectionnés entre 2007 et 2009

Tableau 2. Moyennes de quelques paramètres physico-chimiques pour la période de calibration (Paires N° 1 et N° 2 : 2007-2008; paire N° 3 : 2007-2009)

Lacs	pH	T (°C)	OD (mg/L)	Chl a (µg/L)	Turbidité (unités relatives)
Ébron	7,6	16,8	8,5	0,50	0,0016
Pics	7,7	17,4	9,1	0,51	0,0011
X	8,3	17,8	8,6	0,75	0,0016
Z	8,2	17,3	8,6	0,53	0,0009
Foin	8,0	17,4	9,6	0,41	0,0017
2ME	7,6	16,1	9,3	0,19	0,0012

Chaque paire de lacs présente des caractéristiques très similaires au niveau de la profondeur (Tableau 1), du pH, de la conductivité et de la productivité (Chl a; tableau 2). Les lacs sont peu profonds (< 2 m) à l'exception des lacs X et Z, qui ont respectivement 6,1 et 8,3 m de profondeur. Ils ont tous des eaux très transparentes, comme en font foi les données de turbidité

(Tableau 2). L'utilisation d'un spectrophotomètre pour déterminer la turbidité s'est avérée nécessaire ici, puisque dans quatre des six lacs le fond était visible, ce qui rendait l'utilisation d'un disque de Secchi inutile. On notera que tous les lacs sont oligotrophes ($Chl\ a < 4,5\ \mu\text{g/L}$; Wetzel, 2001).

La composition en anions et cations (Tableau 3) reflète les mesures de conductivité, c'est-à-dire que les concentrations les plus élevées sont observées dans les lacs X et Z, alors que les plus faibles sont dans les lacs Ébron et des Pics. Pour l'année 2007, les concentrations de nitrates n'étaient pas significativement différentes des blancs de terrain (eau ultra-pure du laboratoire filtrée sur le terrain; $0,07 \pm 0,02\ \text{mg/L}\ \text{NO}_3^-$) ou étaient inférieures à la limite de détection de l'appareil ($0,03\ \text{mg/L}$). Pour l'année 2008, les concentrations de nitrates des blancs de terrain avaient des concentrations plus élevées qu'en 2007. Ces mesures devaient être soustraites des valeurs de nitrates obtenues pour les lacs. Toutefois, après cette soustraction, les concentrations devenaient négligeables. Les concentrations de nitrates en 2009 étaient généralement négligeables.

Tableau 3. Concentrations dissoutes mesurées de certains ions dans les lacs sélectionnés pour la période de calibration (paires N° 1 et N° 2 : 2007-2008; paire N° 3 : 2007-2009)

Lacs	F ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Al ³⁺ (mg/L)	Ba ²⁺ (mg/L)
Ébron	0,016	1,2	4,7	11	0,42	1,3	1,3	0,025	0,011
Pics	0,014	0,8	2,2	11	0,18	1,7	1,1	0,054	0,057
X	0,028	1,7	5,7	36	0,28	6,8	2,0	0,013	0,053
Z	0,058	1,9	4,8	52	0,31	9,0	2,2	0,008	0,108
Foin	0,021	3,2	7,5	19	0,38	4,65	2,69	0,023	0,019
2ME	0,024	4,0	7,8	19	0,39	4,94	3,12	0,013	0,029

Certains éléments traces étaient présents en concentrations suffisamment élevées pour être quantifiés. C'est le cas pour le fer, l'aluminium et le manganèse (Annexe 2). En revanche, les concentrations de cuivre et de zinc étaient très rarement détectables (limites de détection respectives de $0,5$ et $1\ \mu\text{g/L}$). De plus, les concentrations de phosphore étaient toujours inférieures à la limite de détection ($7\ \mu\text{g/L}$), quoique la méthode utilisée soit peu sensible. Nous avons aussi déterminé les concentrations totales en cations majeurs et traces (échantillons non filtrés), ce qui nous a permis de déduire les concentrations particulières (Annexe 3). Globalement, les concentrations en Al, Fe et Mn particulières étaient inférieures aux

concentrations dissoutes alors que la présence sous forme particulière des autres éléments était négligeable.

Les tests statistiques sont faits avec les différences entre un même paramètre pour une même paire de lacs. Ces différences (lac témoin – lac traité) pour la période de contrôle seront attribuables à la variation naturelle. Les différences pour la période de contrôle sont regroupées ensemble, ce qui permet d'augmenter la signification statistique du test. Les différences calculées pour la période post-traitement sont attribuables à la variation naturelle ainsi qu'au potentiel effet du traitement. La comparaison statistique des deux types de différences (période de contrôle et période post-traitement) permet de savoir si le traitement a un effet statistiquement significatif sur les divers paramètres (Duhaim et Pinel-Alloul, 2005). Les différences pour la période de contrôle seront comparées avec les différences pour la période post-traitement en utilisant un test non paramétrique de Wilcoxon-Mann-Whitney (*Rank sum test*) avec un intervalle de confiance de 95 % et ce, pour les divers paramètres mesurés (Tremblay *et al.*, 2009). Une différence significative apportera la conclusion d'un effet dû au traitement et une différence non significative, l'effet nul du traitement.

Suivant la première année du traitement, les lacs traités des paires N° 1 et N° 2 n'ont subi aucun changement significatif dans les paramètres physico-chimiques de leurs eaux à une exception près (Tableaux 4 à 7). Le seul changement significatif enregistré est l'augmentation de 5 % de la concentration en Na⁺ dans les eaux du lac Z. Notons qu'aucune augmentation de pH n'a été enregistrée suivant la première année du traitement pour les paires N° 1 et N° 2.

Tableau 4. Moyennes des paramètres de base pour la période de calibration (Paires N° 1 et N° 2 : 2007-2008; paire N° 3 : 2007-2009) et post-traitement (Paires N° 1 et N° 2 : 2009) et effet dû au traitement pour chaque paire de lacs

Paramètres de base	Périodes	Paire N° 1				Paire N° 2				Paire N° 3			
		Lac des Pics	Lac Ébron	Effet traitement	(%)	Lac X	Lac Z	Effet traitement	(%)	Lac au Foin	Lac 2ME	Effet traitement	(%)
		(µ)	(µ)			(µ)	(µ)			(µ)	(µ)		
pH	Calibration	7,7	7,6	0,1	1	8,3	8,2	0,2	2	8,0	7,6		
	Post-traitement	7,7	7,7			8,0	8,2						
T (°C)	Calibration	17,4	16,8	-0,8	-5	17,8	17,3	0,8	4	17,4	16,1		
	Post-traitement	17,3	15,9			18,9	19,2						
OD (mg/L)	Calibration	9,1	8,5	0,77	9	8,6	8,6	0,3	3	9,6	9,3		
	Post-traitement	8,9	9,1			8,7	9,0						
Turbidité	Calibration	0,0011	0,0016	-0,0004	-20	0,0016	0,0009	-0,0008	-54	0,0017	0,0012		
	Post-traitement	0,0016	0,0017			0,0021	0,0007						
Chl a (µg/L)	Calibration	0,51	0,51	-0,18	-31	0,75	0,53	0,18	53	0,41	0,19		
	Post-traitement	0,60	0,41			0,57	0,53						
COD (mg/L)	Calibration	5,4	4,8	0,3	7	4,8	5,1	-0,49	-10	4,2	2,8		
	Post-traitement	4,7	4,4			4,8	4,5						
CID (mM)	Calibration	0,68	0,61	0,05	9	2,1	3,3	-0,26	-9	1,2	1,5		
	Post-traitement	0,57	0,56			1,9	2,8						

*Effet traitement significatif (P < 0,05)

Tableau 5. Moyennes des concentrations des anions pour la période de calibration (Paires N° 1 et N° 2 : 2007-2008; paire N° 3 : 2007-2009) et post-traitement (Paires N° 1 et N° 2 : 2009) et effet dû au traitement pour chaque paire de lacs

Anions	Périodes	Paire N° 1				Paire N° 2				Paire N° 3			
		Lac des Pics	Lac Ébron	Effet traitement	(%)	Lac X	Lac Z	Effet traitement	(%)	Lac au Foin	Lac 2ME	Effet traitement	(%)
		(µ)	(µ)			(µ)	(µ)			(µ)	(µ)		
F (mg/l)	Calibration	0,014	0,016	0,007	28	0,028	0,059	0	0	0,021	0,024		
	Post-traitement	0,020	0,028			0,039	0,069						
Cl (mg/l)	Calibration	0,78	1,16	0,11	11	1,73	1,87	0,10	7	3,23	3,98		
	Post-traitement	0,63	1,12			1,25	1,49						
SO₄ (mg/l)	Calibration	2,16	4,67	-0,04	-1	5,65	4,81	0,53	13	7,52	7,83		
	Post-traitement	2,08	4,54			4,78	4,47						

*Effet traitement significatif (P < 0,05)

Tableau 6. Moyennes des concentrations des cations majeurs pour la période de calibration (Paires N° 1 et N° 2 : 2007-2008; paire N° 3 : 2007-2009) et post-traitement (Paires N° 1 et N° 2 : 2009) et effet dû au traitement pour chaque paire de lacs

Cations majeurs	Période	Paire N° 1				Paire N° 2				Paire N° 3			
		Lac des Pics	Lac Ébron	Effet traitement	(%)	Lac X	Lac Z	Effet traitement	(%)	Lac au Foin	Lac 2ME	Effet traitement	(%)
		(µ)	(µ)			(µ)	(µ)			(µ)	(µ)		
Ca (mg/l)	Calibration	10,6	10,7	0,2	2	35,6	52,3	-0,4	-1	19,3	19,8		
	Post-traitement	10,8	11,1			34,2	50,5						
K (mg/l)	Calibration	0,18	0,42	-0,02	-4	0,28	0,31	-0,04	-11	0,38	0,39		
	Post-traitement	0,23	0,44			0,30	0,30						
Mg (mg/l)	Calibration	1,72	1,33	0,09	7	6,83	8,96	0,25	3	4,65	4,94		
	Post-traitement	1,71	1,41			6,40	8,78						
Na (mg/l)	Calibration	1,10	1,29	0,06	5	1,97	2,21	0,10*	5*	2,69	3,12		
	Post-traitement	1,06	1,31			1,69	2,03						

*Effet traitement significatif (P < 0,05)

Tableau 7. Moyennes des concentrations des éléments traces et de S pour la période de calibration (Paires N° 1 et N° 2 : 2007-2008; paire N° 3 : 2007-2009) et post-traitement (Paires N° 1 et N° 2 : 2009) et effet dû au traitement pour chaque paire de lacs

Éléments traces	Périodes	Paire N° 1				Paire N° 2				Paire N° 3			
		Lac des Pics	Lac Ébron	Effet traitement	(%)	Lac X	Lac Z	Effet traitement	(%)	Lac au Foin	Lac 2ME	Effet traitement	(%)
		(µ)	(µ)			(µ)	(µ)			(µ)	(µ)		
Al (mg/l)	Calibration	0,054	0,025	0,004	18	0,012	0,008	-0,001	-4	0,023	0,013		
	Post-traitement	0,051	0,025			0,015	0,010						
Ba (mg/l)	Calibration	0,057	0,011	-0,002	-12	0,053	0,108	0,002	2	0,019	0,029		
	Post-traitement	0,060	0,012			0,052	0,109						
Fe (mg/l)	Calibration	0,019	0,056	-0,015	-26	0,012	0,006	0	2	0,020	0,012		
	Post-traitement	0,019	0,041			0,009	0,004						
Mn (mg/l)	Calibration	0,0009	0,0050	-0,0015	-29	0,0018	0,0012	0,0007	281	0,0016	**		
	Post-traitement	0,0013	0,0038			0,0008	0,0009						
S (mg/l)	Calibration	0,8	1,6	0,0	1	1,9	1,7	0,1	9	2,6	2,7		
	Post-traitement	0,8	1,6			1,7	1,6						

*Effet traitement significatif (P < 0,05)

** Sous le seuil de détection

3.3. Suivi des données hydrométéorologiques

La figure 18 illustre que la précipitation totale cumulée à la station du lac Mont-Louis est légèrement supérieure à celles des deux stations de références. Cette différence s'explique en partie par un enregistrement de précipitations sous forme de neige plus grandes à la station expérimentale. Pour l'année 2008, la fraction nivale à la station expérimentale était de 40 % comparativement à 23 % et 28 % pour les stations de références; la fraction nivale moyenne pour la région d'étude étant entre 35 % et 45 % (Wilson, 1971). À noter que l'hiver 2008 a connu des accumulations de neige supérieures à la moyenne pour la région des Chic-Chocs. La comparaison des données météorologiques permet ainsi de corroborer la validité des données récoltées à la station expérimentale.

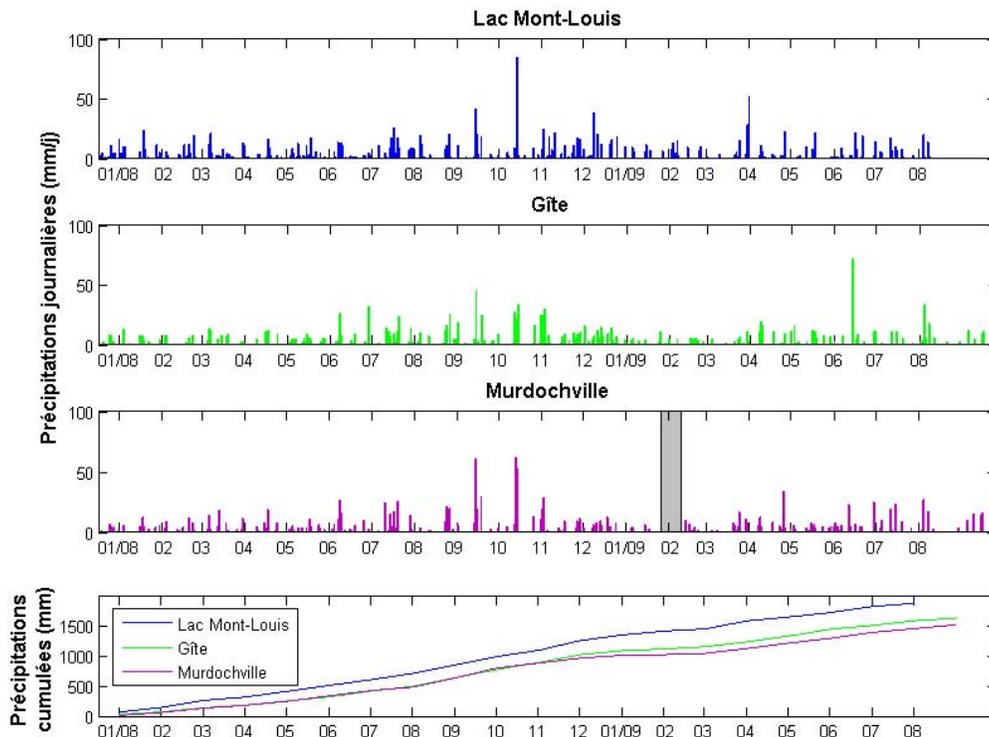


Figure 23. Précipitations journalières et cumulées pour chaque station météorologique

Le dispositif de capteur submersible jumelé avec les données de pressions atmosphériques de la station météorologique s'est avéré être une méthode efficace de mesure en continu de la

hauteur d'eau d'un lac. Après avoir fait la compensation barométrique appropriée, la précision de cette mesure se situe entre 1 et 2 cm pour tous les lacs. Cette précision a été calculée en comparant les hauteurs d'eau mesurées par le capteur submersible avec les mesures manuelles effectuées lors des sorties d'échantillonnage. Par la suite les hauteurs ont été utilisées pour évaluer les volumes d'eau des lacs à l'aide des équations hauteur/volume établies pour chacun de ceux-ci. L'analyse statistique des données hydrologiques a été, par la suite, faite sur la base de ces volumes. Cette variable donne un meilleur suivi hydrologique, car la variation de hauteur ne présente pas une variation linéaire du volume. En effet, pour un incrément de niveau donné, les variations de volumes et de superficies des lacs dépendent de la hauteur initiale de l'eau dans les lacs à un point de référence. L'utilisation des hauteurs serait donc biaisée. Le dispositif a démontré son efficacité par une excellente concordance entre la variation de volume d'eau des lacs et les principaux événements météorologiques (Figure 24). Il est à noter que les données recueillies lors de la période de gel ne sont pas utilisées. La pression exercée par le couvert de glace affecte les mesures saisies par les capteurs submersibles, ce qui est difficilement quantifiable.

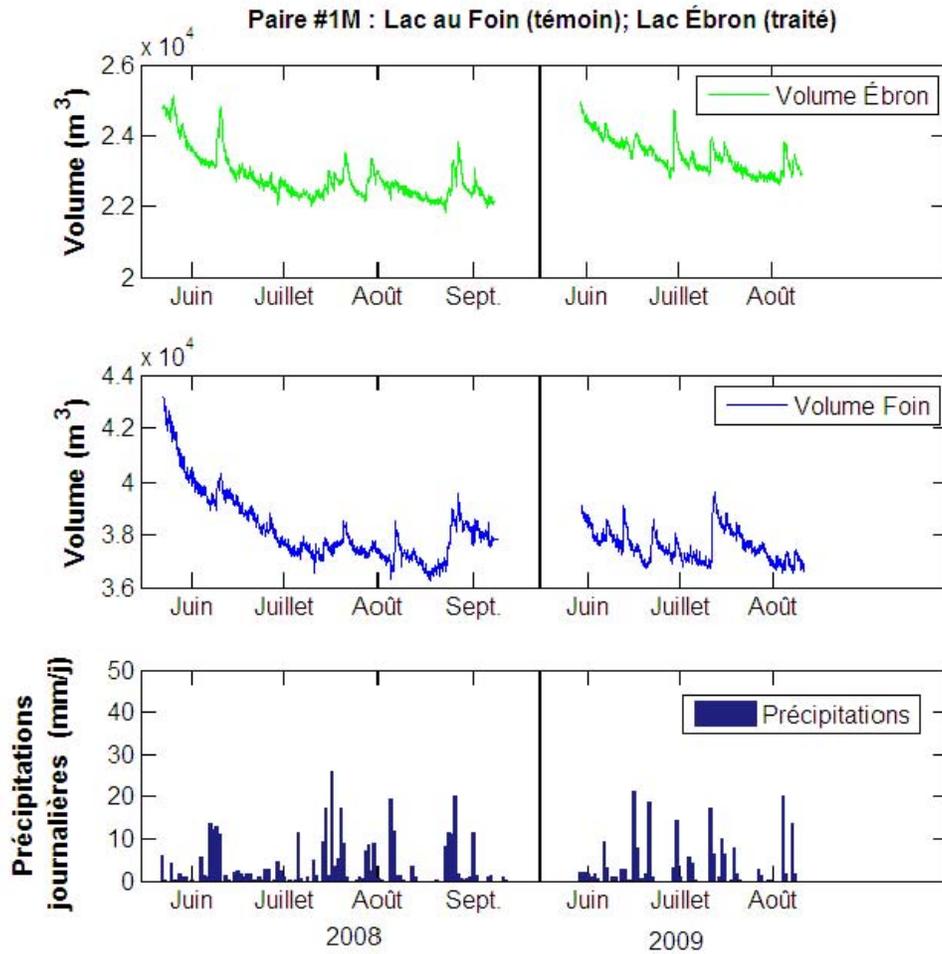


Figure 24. Volume d'eau en période estivale au lac Ébron (traité) et au lac au Foin (témoin) pour la période de calibration (2008) et la période post-traitement (2009)

Le lac témoin de la paire N° 1 a subi une perturbation lors de l'été 2009. Des castors ont débuté la construction d'un barrage entre la sortie d'échantillonnage du mois de juin et celle de juillet. Le niveau d'eau du lac des Pics a augmenté de 15 à 20 cm en seulement deux à trois semaines et ce, en période d'étiage. Ce lac ayant subi une perturbation importante, il ne peut plus être utilisé comme témoin en ce qui concerne le suivi hydrologique, puisque la relation hauteur/volume établie lors de la période de calibration n'est plus valide. Le lac au Foin servira donc désormais de lac témoin au lac Ébron pour l'analyse hydrologique. Suite à cette modification, la paire N° 1 sera nommée paire N° 1M. Le lac au Foin a été préféré au lac X, car il est plus similaire au lac des Pics. L'augmentation d'eau causée par le barrage de castor a fait

fluctuer l'eau à des niveaux retrouvés lors de la période de fonte des neiges. En revanche, nous ne croyons pas que ce changement de niveau ait affecté de façon notable les divers paramètres physico-chimiques de l'eau. Pour cette raison, le lac des Pics garde tout de même son statut de lac témoin en ce qui a trait à la comparaison des paramètres physico-chimiques.

Tableau 8. Coefficients de régression des droites logarithmiques des volumes de chaque paire pour la période de calibration (Paires N° 1M et N° 2 : 2007-2008; paire N° 3 : 2007-2009) et post-traitement (Paires N° 1M et N° 2 : 2009)

Paires	Périodes	n	Pentes	Ordonnées à l'origine	R ²
Paire N° 1M	Calibration	2 598	0,75	0,90	0,91
	Post-traitement	1 758	0,74	0,97	0,57
Paire N° 2	Calibration	3 098	0,77	1,09	0,87
	Post-traitement (p1)	601	0,64*	1,65*	0,91
	Post-traitement (p2)	701	0,55*	2,08*	0,92
	Post-traitement (p3)	420	0,52*	2,23*	0,88
Paire N° 3	Calibration	4 268	2,12	-5,89	0,92

*Différence significative (P < 0,05)

La comparaison des volumes est faite avec une analyse de régression. Cette méthode est basée sur la forte corrélation entre les volumes d'eau des deux lacs constituant une paire avant traitement. Une équation de régression est établie pour chaque paire de lacs avec les volumes recueillis lors de la période de calibration. Ces équations tiennent compte des variations dues aux facteurs naturels. Les équations de calibration calculées montrent une forte corrélation ($R^2 > 0,81$) (Tableau 8). Par la suite une équation de régression est établie pour la période post-traitement. Ces équations tiennent compte des variations dues aux facteurs naturels et à l'effet possible suite au traitement. Les coefficients de régression des équations de calibration et de post-traitement sont comparés en utilisant un test de *Student*. L'analyse des résultats du test statistique permet de savoir si le traitement a eu pour effet d'augmenter les volumes des lacs traités. Cette démarche a permis de conclure que les lacs Ébron et « Z » n'ont pas subi d'augmentation significative de volumes lors de la première année suivant les traitements. Le lac Ébron a subi une augmentation de volume de 5,6 % (≈ 4 cm) qui est non significative (Figure 20). La corrélation de l'équation post-traitement de cette paire est moins bonne ($R^2 = 0,57$). Même si l'effet du traitement était non significatif, ce dernier aurait pu modifier légèrement le comportement hydrologique du lac traité et ainsi modifier la relation avec le lac témoin. L'analyse hydrologique du lac Z a été plus complexe. Le lac Z est entouré d'un milieu organique (tourbière). Ce milieu organique a pu agir comme une éponge en absorbant le surplus en apport d'eau suite au traitement. Le potentiel tampon du milieu organique aurait diminué tout

au long de la saison de croissance de par sa saturation. Ainsi, pour obtenir une bonne corrélation avec les données de volumes post-traitements pour cette paire de lacs, il a fallu séparer les données en trois périodes (Période 1 : du 14 juin au 9 juillet, période 2 : du 9 juillet au 7 août, période 3 : du 7 au 25 août) afin d'obtenir trois équations post-traitements. L'analyse statistique donne des différences statistiques entre les coefficients de régression de ces trois équations et les coefficients de régression de l'équation de calibration (Tableau 8). Lorsque de tels résultats sont obtenus, une analyse graphique est nécessaire pour tirer les conclusions adéquates (Figure 26). Ainsi, cette analyse graphique permet de conclure que le volume du lac Z n'a pas subi de hausse significative suivant la première année du traitement.

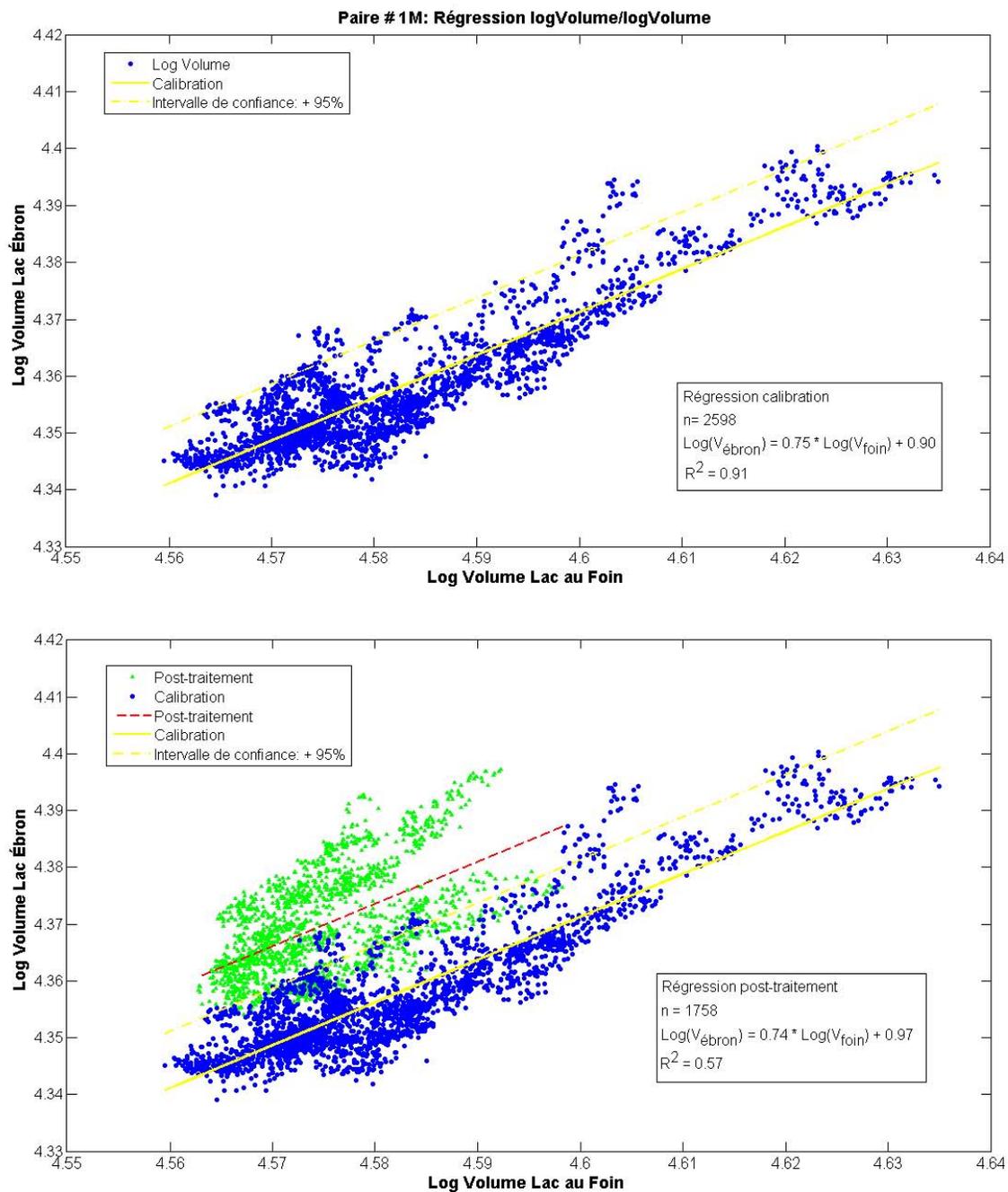


Figure 25. Analyse de régression pour la paire N° 1M (Lac au Foin témoin; lac Ébron traité) pour la période de calibration (2008) et la période post-traitement (2009)

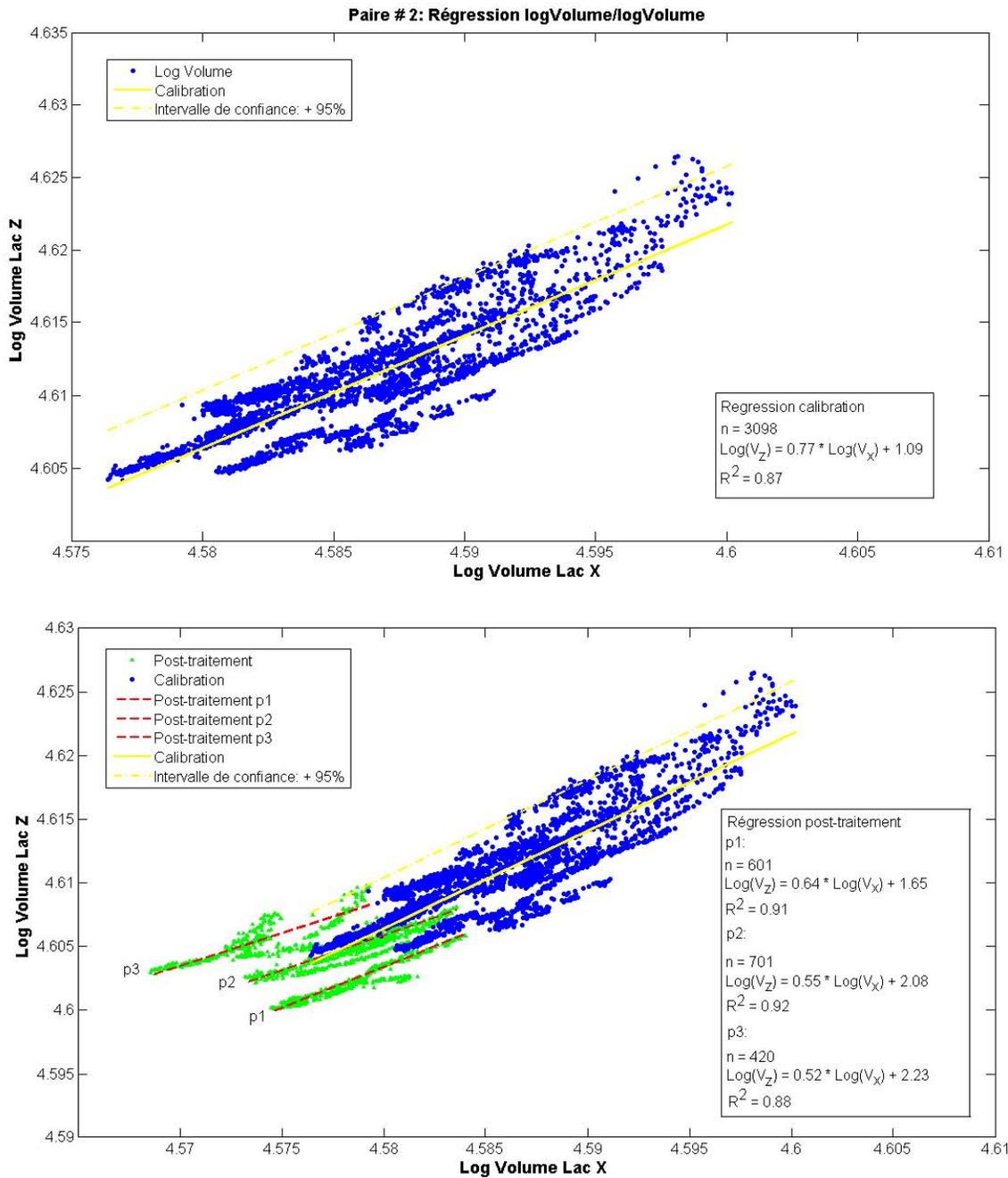


Figure 26. Analyse de régression pour la paire N° 2 (Lac X témoin; lac Z traité) pour la période de calibration (2008) et la période post-traitement (2009)

4. Discussion

Globalement, les objectifs poursuivis au cours des trois premières années de ce projet de quatre ans ont été atteints ou sont en voie d'être atteints. De la sélection des lacs à l'échantillonnage, l'atteinte des objectifs est liée à l'excellente collaboration avec les intervenants du milieu. Les six lacs choisis répondent aux nombreux critères de sélection initiaux. Bien qu'il aurait été préférable d'avoir une proportion de superficie récoltée plus élevée pour maximiser les probabilités d'observer un effet de la récolte, ces conditions demeurent néanmoins représentatives des opérations forestières typiquement réalisées sur les bassins versants de la réserve faunique des Chic-Chocs.

Les paramètres limnologiques déterminés nous indiquent que le choix des paires de lacs était judicieux. En effet, les lacs à l'intérieur de chaque paire sont très similaires en matière de profondeur, de pH, de conductivité et de productivité (Chl *a*). Les lacs sont peu profonds, peu turbides et oligotrophes. De plus, les concentrations en calcium et carbonates (carbone inorganique dissous) sont très proches pour chaque paire de lacs, deux paramètres qui seront suivis attentivement lors de la période post-traitement. Nous n'avons pas détecté de présence de marne en suspension pendant la période de calibration. Les analyses statistiques ont permis de conclure qu'aucun changement significatif des paramètres physico-chimiques n'avait été enregistré sur les lacs traités des paires N° 1 et N° 2 suivant la première année du traitement, à la seule exception des concentrations en Na⁺ sur le lac Z. Le pH, qui est un paramètre d'importance dans cette étude, n'a connu aucun changement significatif lors de la première année suivant le traitement pour les lacs traités.

Le dispositif expérimental utilisé pour faire la saisie de données hydrométéorologiques montre une bonne efficacité pour enregistrer la hauteur d'eau dans chaque lac, en réponse aux événements météorologiques. Au cours de l'été 2008, chacune des paires de lacs a montré des variations de hauteur d'eau similaires en temps et en intensité. La méthode pour établir la bathymétrie des lacs, avec l'utilisation conjointe d'un *GPS-Sonar* et d'une station totale, s'est montrée très efficace, car elle a permis de bien connaître la géométrie générale et périphérique des lacs. Cette information, une fois combinée avec les données hydrométéorologiques, permet de connaître le volume de chaque lac en fonction de la hauteur d'eau mesurée en un point donné. Les analyses de régression exécutées avec les volumes des lacs témoin et traités de la paire N° 1M et N° 2 permettent de conclure que le traitement n'a entraîné aucun changement

significatif dans le volume des lacs traités suivant la première année du traitement. Pour l'analyse hydrologique, la paire N° 1 a dû être modifiée. Un barrage de castor a été construit sur le lac témoin (Lac des Pics) au courant de l'été 2009. Ayant subi une perturbation, le lac témoin ne pouvait plus remplir son rôle. Le lac au Foin, qui est le lac témoin de la paire N° 3, a donc été choisi comme lac témoin de cette paire pour former la paire N° 1M avec le lac Ébron. Ce changement ne nuit pas à l'analyse hydrologique, étant donné que le volume des deux lacs de la paire N° 1M montre une bonne corrélation.

En 2008 nous avons augmenté la fréquence d'échantillonnage en effectuant une troisième sortie de terrain. La cadence a été maintenue en 2009, ce qui augmente la puissance statistique des comparaisons. La prochaine sortie d'échantillonnage (juin 2010) marquera le début de la deuxième année post-traitement pour les paires N° 1 et N° 2 et la première année post-traitement pour la paire N° 3. Cette campagne d'échantillonnage va permettre de confirmer ou informer les résultats obtenus jusqu'à maintenant des effets de la récolte sur la physico-chimie et le régime hydrologique des lacs alcalins de la réserve faunique des Chic-Chocs. Les travaux prévus sur le bassin versant du 2^e lac de Manche-d'Épée ont eu lieu en début septembre 2009. Bien que nous anticipions une coupe à l'automne 2008 comme pour les autres bassins versants, un malentendu concernant la localisation des travaux a repoussé la récolte à l'été 2009. Il en résulte donc une période de calibration plus longue pour cette paire de lac. La cueillette de données après traitement, pour le 2^e lac de Manche-d'Épée, débutera ainsi en juin 2010. Outre ce malentendu, l'excellente collaboration entre notre équipe et l'exploitant forestier a permis de façon générale une très bonne orchestration des travaux et de l'échantillonnage.

4.1. Calendrier des réalisations et des activités à venir

Été et automne 2007 :

- Sélections des lacs
- Récolte et analyse d'échantillons sur le terrain (juillet; août)

Printemps et été 2008 :

- Recrutement d'un étudiant à la maîtrise (Marc-André Robin)
- Installation des capteurs de pression submersibles

- Mise en place de la station météo
- Exécution d'un inventaire forestier des bassins versants
- Début des levés bathymétriques des lacs
- Échantillonnage de l'eau des lacs (juin; juillet; août)

Automne 2008 :

- Analyse des échantillons
- Récolte forestière (Lacs Z et Ébron)

Hiver 2009 :

- Poursuite de la revue de littérature amorcée par les chercheurs

Été et automne 2009 :

- Récolte et analyse d'échantillons sur le terrain (juin; juillet; août)
- Poursuite des levés bathymétriques des lacs
- Récolte forestière (2^e lac de Manche-d'Épée; septembre)

Hiver 2010 :

- Début de rédaction du mémoire de maîtrise

Été et automne 2010 :

- Récolte et analyse d'échantillons sur le terrain (juin; juillet; août)
- Analyses statistiques

Hiver 2011 :

- Dépôt du rapport final et du mémoire de maîtrise
- Publication des résultats dans un périodique scientifique reconnu

5. Conclusion et perspectives

Les données post-traitements disponibles (paires de lacs N° 1 et N° 2) n'indiquent pas, pour l'année suivant les traitements, d'effets significatifs de la coupe forestière sur les paramètres clés mesurés dans cette étude. La récolte de données supplémentaires en 2010 permettra de confirmer de façon robuste (avec plus de puissance statistique) cette observation préliminaire. Le cas échéant, ces travaux confirmeront que les activités forestières telles que celles pratiquées dans cette étude ne causent pas, notamment, de changements significatifs du pH des eaux de surface.

Au démarrage de ce projet, les risques de complications étaient relativement élevés. La plupart de ces risques sont maintenant écartés, puisque les coupes sont complétées sur tous les bassins versants expérimentaux. Une complication possible viendrait du développement éolien dans la région des Chic-Chocs, qui va apporter la construction d'une route traversant le bassin versant du 2^e lac de Manche-d'Épée. Par contre, selon nos informations, ces travaux ne chevaucheront pas la période de la présente étude. Aussi, un projet de pisciculture entretenue par un particulier pour le lac au Foin était dans l'air, mais il semble que le particulier en question n'ait pas donné suite à son projet. Il est important de maintenir des conditions stables sur les bassins versants à l'étude pour minimiser les variations dues à des facteurs anthropiques autres que la récolte forestière. Comme nous avons échantillonné un nombre limité de lacs, il est nécessaire de minutieusement poursuivre leur aménagement forestier selon le plan établi en collaboration avec le MRNF et l'exploitant forestier au cours de la prochaine année (ex.: les coupes forestières prévues dans le bassin versant du lac X ne doivent pas avoir lieu avant l'automne 2011). Nous poursuivrons donc notre étroite collaboration avec les partenaires de ce projet. L'établissement d'un barrage de castor sur le lac des Pics, au courant de l'été 2009, nous a forcés à modifier le traitement des données de la paire N° 1 au niveau du suivi hydrologique. Cet imprévu, qui était incontrôlable lors de la réalisation de l'étude, a pu être surmonté en utilisant le lac au Foin comme lac témoin pour créer ainsi la paire N° 1M. Étant donné la bonne corrélation des volumes des lacs de la paire N° 1M, le suivi hydrologique sera d'aussi bonne qualité qu'avant cet imprévu.

Nous avons présenté les premiers résultats au conseil d'administration de la réserve faunique des Chic-Chocs le 7 novembre 2007. Les principaux partenaires y étaient présents, soit Langis Fournier et René Lafond du MRNF, ainsi que Pierre Pitre et Bermans Drouin de la

SÉPAQ. Une présentation a aussi été donnée en février 2009, lors du *Environmental Science and Engineering Research Conference* à Gananoque, en Ontario. Cette année, nous prévoyons diffuser les résultats lors de la conférence *Water 2010* en juillet à Québec.

6. Bibliographie

- BROWN B.E., FASSBENDER J.L., WINKLER R., 1992. Carbonate production and sediment transport in a marl lake of Southeastern Wisconsin. *Limnology and Oceanography*, 37, 184-191.
- CÔTÉ M., FORTIN, S., 2003. Avis émis en regard de la problématique des pH basiques et de l'exploitation forestière en Gaspésie. Consortium pour le développement durable de la forêt gaspésienne, 4 p.
- DRUMMOND C.N., PATTERSON W.P., WALKER J.C.G., 1995. Climatic forcing of carbon-oxygen isotopic covariance in temperate-region marl lakes. *Geology*. 23, 1031-1034.
- DUHAIME L., PINEL-ALLOUL B., 2005. Méthode de sélection de lacs de référence dans le cadre d'une étude Before-After Control-Impact (BACI) évaluant les effets des coupes forestières sur le zooplancton des lacs de la forêt boréale. *Revue des Sciences de l'Eau*. 18 (hors-série), 199-220.
- GUITARD A., FLEURY M., 2002. Diagnose écologique du lac Joffre situé dans la réserve faunique de Matane. Faune-Expert inc., pour la Société des établissements de plein air du Québec. Bic. 23 p. + annexes.
- LANGÉVIN R., TURCOTTE C., 2004. Avis sur l'impact de la récolte forestière sur le pH de lacs présentant un niveau critique d'alcalinité. Présenté au Ministère des Ressources naturelles, de la faune et des parcs et à la Société de la faune et des parcs du Québec, 5 p.
- LIKENS G.E., BORMANN F.H., 1995. *Biogeochemistry of a Forested Ecosystem*, 2^e édition, Springer-Verlag, New York, 159 p.
- OTSUKI A., WETZEL R.G., 1972. Coprecipitation of phosphate with carbonates in a marl lake. *Limnology and Oceanography*. 17, 763-767.
- PLAMONDON A.P., 1993. Influences des coupes forestières sur le régime d'écoulement de l'eau et sa qualité. Revue de littérature. Faculté de foresterie et de géomatique. Ministère des Forêts du Québec, Publication C-47, 179 p.
- PENTECOST A., SPIRO B., NUÑEZ R., 2000. Palaeoenvironmental interpretation of the early postglacial sedimentary record of a marl lake. [Goldschmidt 2000. 3-8 sept. 2000. Oxford, UK.] *Journal of Conference Abstracts* 5: 782.

- PREPAS E.E., PINEL-ALLOUL B., STEEDMAN R.J., PLANAS D., CHARETTE T., 2003. Impacts of forest disturbance on boreal surface waters in Canada. Dans : *Towards Sustainable Management of the Boreal Forest*. Chapter 10. P.J. Burton, C. Messier, D.W. Smith et W.L. Adamowicz. Eds., NRC Research Press, Ottawa, Canada, 369-393.
- ROUSSEAU A.N., FORTIN J.-P., TURCOTTE R., ROYER A., SAVARY S., QUÉVY F., NOËL P., PANICONI C., 2010. PHYSITEL, a specialized GIS for determining drainage structure, hillslopes, sub-basins, and physiographic databases for distributed hydrological models. (Article soumis le 3/12/2009 au Environmental Modelling & Software).
- SETO M., 2005. Effets de l'exploitation forestière sur la qualité de l'eau en forêt boréale. Mémoire de maîtrise, Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval, 76 p.
- TREMBLAY Y., ROUSSEAU A.N., PLAMONDON A.P., LÉVESQUE D., JUTRAS S., 2008. Rainfall peakflow response of clearcutting 50% of three watersheds in a boreal forest, Montmorency Forest, Québec. *Journal of Hydrology*, 352: 67-76.
- TREMBLAY Y., ROUSSEAU A. N., PLAMONDON A.-P., LÉVESQUE D., PRÉVOST M., 2009. Changes in stream water quality due to logging of the boreal forest in the Montmorency Forest, Québec. *Hydrological Processes*, 23: 764-776. DOI: 10.1002/hyp.7175.
- WETZEL R.G., 2001. *Limnology – Lake and River Ecosystems*. 3^e édition. Academic Press. New York. 1006 p.
- WILSON C.V., 1971. Le climat du Québec. Atlas climatique, Service météorologique du Canada, Étude climatologique 11. Ottawa, Canada, 44 p.

7. ANNEXES

ANNEXE 1 : Compensation barométrique

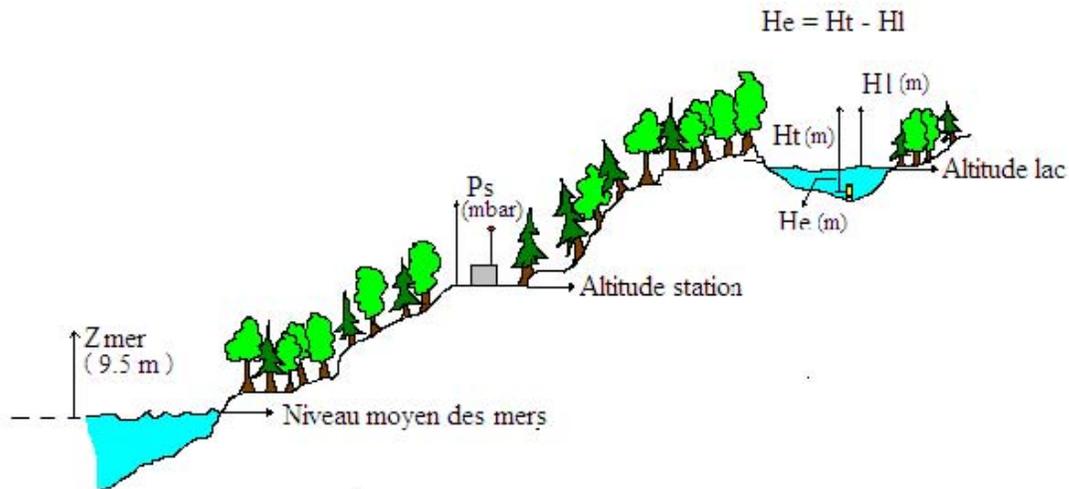


Figure 27. Schéma illustrant la nécessité d'une compensation barométrique.

La pression lue par le capteur de pression submersible (*Levellogger M5 Gold, Solinst inc., ON, Canada*) représente la somme des pressions qui sont exercées sur l'appareil, soit la pression de la colonne d'eau et la pression atmosphérique. Pour connaître la hauteur d'eau au-dessus du capteur, il faut donc calculer la différence entre la pression mesurée par l'appareil et la pression atmosphérique.

La pression atmosphérique peut être mesurée de différentes manières, mais lors de cette étude, nous avons choisi de la mesurer à un seul endroit, à l'aide d'un capteur branché directement à une station météorologique. La pression atmosphérique est une variable qui est affectée par l'altitude et de nombreuses équations existent afin de corriger sa valeur en fonction de l'endroit où l'on se trouve. Afin d'obtenir la pression atmosphérique la plus exacte pour chaque lac (altitude variant de xx m à yy m), la correction altimétrique a donc été utilisée (*Guide utilisateur Levellogger Gold, Solinst inc., ON, Canada*).

Afin de réduire les valeurs mesurées par leurs appareils, *Solinst inc.* a inclus une équation simple permettant d'adapter les valeurs mesurées à l'altitude où les appareils se trouvent. Puisque ceux-ci sont conçus pour l'atmosphère terrestre, une partie de la pression atmosphérique est automatiquement déduite des valeurs mesurées. En fait, une valeur standard

correspondant à la plus petite pression atmosphérique mesurée au niveau de la mer est automatiquement déduite de la valeur mesurée. La valeur de la pression minimale choisie par *Solinst inc.* est de 92,955 kPa, ou 9,5 m d'équivalent en eau (1 kPa = 0,1022 m d'eau). À titre comparatif, la pression atmosphérique normale standard au niveau international (Alt. = 0 m) est de 101,325 kPa, ou 10,355 m d'équivalent en eau. De plus, la pression diminue avec l'altitude (perte de l'équivalent en eau de 1,21 m par 1 000 m d'altitude; d'après *Solinst inc.*), une compensation altimétrique s'ajoute à la correction précédemment décrite.

Ainsi, pour un capteur situé à 1 m sous la surface de l'eau d'un lac dont l'altitude est de 400 m et où la pression atmosphérique réelle à la même altitude est de 100 kPa (10,22 m d'eau), la valeur mesurée par l'appareil sera 2,204 m.

Afin d'obtenir la hauteur d'eau réelle au-dessus de l'appareil, il faut soustraire la pression atmosphérique compensée à la valeur mesurée par l'appareil, afin de ramener le tout au niveau de la mer.

Hauteur d'eau au-dessus de l'appareil = Hauteur mesurée par l'appareil - Pression compensée.

Puisque la station météorologique ne se situe pas à la même altitude que le lac en question, une compensation altimétrique de cette valeur doit être faite. La pression atmosphérique mesurée à la station (Alt. = 486 m) devrait correspondre à 99,02 kPa (10,12 m d'eau). Cette pression doit être corrigée pour correspondre à la pression observée à l'altitude du lac (400 m), avant d'être soustraite.

$$P_{400} = P_{486} - (1,21 \text{ m} \times (400 \text{ m} - 486 \text{ m}) / 1\,000 \text{ m})$$

$$P_{400} = 10,12 \text{ m} - (-0,10 \text{ m}) = 10,22 \text{ m} \text{ (pression atmosphérique à 400 m)}$$

Pression compensée = Pression atmosphérique - (compensation de base) + (compensation altimétrique)

$$= P_{400} - (\text{compensation de base}) + (\text{compensation altimétrique})$$

$$= 10,22 \text{ m} - (9,5 \text{ m}) + (1,21 \text{ m} \times 400 \text{ m} / 1000 \text{ m}) = 1,204 \text{ m}$$

Hauteur d'eau au-dessus de l'appareil = Hauteur mesurée par l'appareil - Pression compensée

$$= 2,204 \text{ m} - 1,204 \text{ m} = 1 \text{ m}$$

ANNEXE 2. Résultats bruts des paramètres physiques, biologiques et chimiques

Tableau 9. Paramètres de base (Paire N° 1)

Lac	Période	Date (jour/mois/an)	Profondeur (m)	pH	Température (°C)	Oxygène dissous (mg/L)	Turbidité		Chl a		COD		CID	
								σ	($\mu\text{g/L}$)	σ	(mg/L)	σ	(mM)	σ
Ébron	Calibration	/07/2007	surface	7,45	21,0	7,7	0,0017	0,0001	0,88	0,13	5,17	0,27	0,64	0,07
		/08/2007	surface	7,45	16,1	9,9	0,0014	0,0001	0,77	0,12	4,61	0,11	0,62	0,05
		04/06/2008	surface	7,45	9,0	10,7	0,0029	0,0010	0,13	0,01	3,99	0,06	0,48	0,02
		10/07/2008	surface	7,92	21,0	7,4	0,0010	0,0004	0,51	0,04	3,92	0,04	0,72	0,02
		19/08/2008	surface	7,49	16,9	7,0	0,0013	0,0002	0,21	0,09	6,12	0,04	0,59	0,01
	Post-trait.	10/06/2009	surface	7,38	9,7	10,4	0,0007	0,0004	0,34	0,07	3,31	0,083	0,20	0,04
		19/07/2009	surface	7,68	17,9	8,4	0,0034	0,0004	0,49	0,03	5,05	0,031	0,76	0,19
		24/08/2009	surface	8,04	20,1	8,5	0,0011	0,0004	0,41	0,03	4,86	0,057	0,71	0,16
Pics	Calibration	/07/2007	surface	7,74	19,2	8,4	0,0011	0,0003	0,63	0,04	4,28	0,120	0,75	0,08
		/08/2007	surface	7,65	17,5	9,7	0,0011	0,0006	0,80	0,06	7,95	0,090	0,63	0,02
		04/06/2008	surface	7,8	12,7	9,9	0,0009	0,0003	0,27	0,01	5,76	0,070	0,43	0,03
		10/07/2008	surface	7,5	21,1	8,4	0,0010	0,0002	0,56	0,04	4,40	0,040	0,85	0,12
		19/08/2008	surface	7,62	16,5	8,9	0,0013	0,0005	0,26	0,05	4,37	0,200	0,73	0,02
	Post-trait.	10/06/2009	surface	7,23	11,9	9,7	0,0025	0,0005	0,65	0,06	5,20	0,036	0,20	0,06
		19/07/2009	surface	7,82	18,9	8,8	0,0011	0,0010	0,53	0,06	4,41	0,008	0,75	0,05
		24/08/2009	surface	8,05	21,2	8,1	0,0012	0,0004	0,61	0,08	4,48	0,040	0,77	0,13

Tableau 10. Anions (Paire N° 1)

Lac	Période	Date (jour/mois/an)	Profondeur (m)	F ⁻	Écart- type	Cl ⁻	Écart- type	SO ₄ ²⁻	Écart- type	NO ₃ ⁻	Écart-type
				(mg/L)	σ	(mg/L)	σ	(mg/L)	σ	(mg/L)	σ
Ébron	Calibration	/07/2007	surface	0,015	0,000	1,19	0,01	4,72	0,03	*	
		/08/2007	surface	0,016	0,002	1,15	0,00	5,13	0,04	*	
		04/06/2008	surface	0,015	0,000	0,97	0,00	4,41	0,00	0,08**	0,02
		10/07/2008	surface	0,019	0,000	1,26	0,00	4,95	0,02	0,13**	0,02
		19/08/2008	surface	0,017	0,001	1,24	0,03	4,14	0,00	0,21**	0,06
	Post- trait.	10/06/2009	surface	0,014	0,00	1,00	0,01	4,71	0,01	0,10	0,00
		19/07/2009	surface	0,035	0,000	0,95	0,01	4,22	0,02	0,05	0,01
		24/08/2009	surface	0,035	0,001	1,42	0,01	4,69	0,01	0,11	0,02
Pics	Calibration	/07/2007	surface	0,015	0,001	0,96	0,01	2,31	0,01	*	
		/08/2007	surface	0,013	0,001	0,77	0,01	2,13	0,01	*	
		04/06/2008	surface	0,014	0,000	0,75	0,00	1,89	0,01	0,11**	0,03
		10/07/2008	surface	0,016	0,000	0,72	0,00	2,30	0,01	0,09**	0,04
		19/08/2008	surface	0,013	0,000	0,68	0,01	2,18	0,03	0,17**	0,10
	Post- trait.	10/06/2009	surface	0,01	0,14	0,64	0,01	1,85	0,01	0,08	0,01
		19/07/2009	surface	0,023	0,000	0,55	0,01	2,10	0,01	0,06	0,00
		24/08/2009	surface	0,023	0,000	0,69	0,00	2,29	0,00	0,08	0,01

* Sous le seuil de détection

** Contamination en nitrates

Tableau 11. Cations majeurs (Paire N° 1)

Lac	Période	Date (jour/mois/an)	Profondeur	Ca	Écart- type	Mg	Écart- type	Na	Écart- type	K	Écart- type
			(m)	(mg/L)	σ	(mg/L)	σ	(mg/L)	σ	(mg/L)	σ
Ébron	Calibration	/07/2007	surface	9,84	0,09	1,214	0,010	1,25	0,01	0,36	0,00
		/08/2007	surface	11,02	0,11	1,334	0,014	1,34	0,02	0,40	0,00
		04/06/2008	surface	8,49	0,03	1,059	0,002	1,04	0,00	0,41	0,00
		10/07/2008	surface	12,28	0,06	1,499	0,006	1,37	0,01	0,48	0,00
		19/08/2008	surface	12,06	0,07	1,519	0,011	1,44	0,01	0,43	0,00
	Post-trait.	10/06/2009	surface	9,44	0,03	1,169	0,004	1,15	0,00	0,47	0,01
		19/07/2009	surface	11,44	0,12	1,453	0,014	1,31	0,02	0,43	0,00
		24/08/2009	surface	12,53	0,63	1,603	0,076	1,47	0,04	0,42	0,02
Pics	Calibration	/07/2007	surface	10,66	0,02	1,718	0,003	1,12	0,00	0,18	0,00
		/08/2007	surface	10,74	0,09	1,703	0,015	1,15	0,01	0,15	0,00
		04/06/2008	surface	7,33	0,10	1,195	0,014	0,88	0,01	0,17	0,00
		10/07/2008	surface	11,12	0,07	1,781	0,011	1,10	0,01	0,19	0,00
		19/08/2008	surface	13,29	0,09	2,188	0,013	1,24	0,03	0,21	0,01
	Post-trait.	10/06/2009	surface	7,91	0,02	1,259	0,003	0,90	0,00	0,18	0,00
		19/07/2009	surface	10,66	0,57	1,725	0,088	1,05	0,04	0,23	0,01
		24/08/2009	surface	13,84	0,04	2,157	0,007	1,21	0,01	0,27	0,00

Tableau 12. Éléments traces et S (Paire N° 1)

Lac	Période	Date (jour/mois/ an)	Profondeur (m)	Al	Écart- type	Ba	Écart- type	Cu	Écart- type	Fe	Écart- type	Mn	Écart- type	S	Écart- type	Zn	Écart- type
				(mg/L)	σ												
Ebron	Calibration	/07/2007	surface	0,024	0,000	0,0097	0,0001	*	*	0,067	0,003	0,0071	0,0001	1,45	0,01	*	*
		/08/2007	surface	0,022	0,000	0,0098	0,0001	*	*	0,049	0,000	0,0038	0,0001	1,65	0,02	*	*
		04/06/2008	surface	0,028	0,001	0,0068	0,0001	*	*	0,045	0,002	0,0034	0,0013	1,50	0,00	*	*
		10/07/2008	surface	0,025	0,001	0,0129	0,0001	0,0013	0,0003	0,037	0,001	0,0040	0,0004	1,75	0,00	*	*
		19/08/2008	surface	0,027	0,001	0,0155	0,0001	0,0007	0,0002	0,082	0,003	0,0065	0,0004	1,56	0,01	*	*
	Post-trait,	10/06/2009	surface	0,026	0,001	0,0083	0,0001	*	*	0,032	0,000	0,0020	0,0000	1,64	0,02	0,001	0,000
		19/07/2009	surface	0,027	0,001	0,0124	0,0001	*	*	0,051	0,001	0,0028	0,0004	1,53	0,01	*	*
		24/08/2009	surface	0,023	0,001	0,0147	0,0008	*	*	0,041	0,002	0,0066	0,0004	1,68	0,08	*	*
Pics	Calibration	/07/2007	surface	0,038	0,001	0,0548	0,0001	0,0020	0,0001	0,014	0,002	0,0009	0,0001	0,74	0,01	*	*
		/08/2007	surface	0,070	0,003	0,0558	0,0004	0,0027	0,0002	0,031	0,003	0,0012	0,0000	0,73	0,01	*	*
		04/06/2008	surface	0,076	0,001	0,0404	0,0005	0,0026	0,0002	0,020	0,000	0,0009	0,0004	0,66	0,01	*	*
		10/07/2008	surface	0,048	0,000	0,0596	0,0001	0,0028	0,0014	0,015	0,001	0,0003	0,0000	0,82	0,00	*	*
		19/08/2008	surface	0,039	0,002	0,0746	0,0007	0,0023	0,0003	0,017	0,001	0,0013	0,0002	0,85	0,01	*	*
	Post-trait,	10/06/2009	surface	0,071	0,001	0,0443	0,0001	0,0030	0,0003	0,020	0,001	0,0007	0,0001	0,69	0,03	0,001	0,000
		19/07/2009	surface	0,045	0,001	0,0589	0,0032	0,0022	0,0002	0,017	0,001	0,0010	0,0003	0,81	0,02	0,001	0,001
		24/08/2009	surface	0,036	0,001	0,0751	0,0001	0,0019	0,0007	0,019	0,001	0,0022	0,0003	0,82	0,00	*	*

* Sous le seuil de détection

** Les concentrations en P sont toujours sous le seuil de détection

Tableau 13. Paramètres de base (Paire N° 2)

Lac	Période	Date (jour/mois/an)	Profondeur (m)	pH	Température (°C)	Oxygène dissous (mg/L)	Turbidité		Chl a		COD		CID	
								σ	($\mu\text{g/L}$)	σ	(mg/L)	σ	(mM)	σ
Lac X	Calibration	/07/2007	surface	8,32	20,6	7,7	0,0015	0,0001	0,73	0,47	4,76	0,13	2,09	0,04
		/08/2007	surface	7,97	17,6	9,0	0,0018	0,0004	1,40	0,02	5,78	0,15	2,30	0,20
		03/06/2008	surface	7,86	12,3		0,0013	0,0009	0,29	0,02	4,21	0,07	2,57	0,12
		11/07/2008	surface	8,94	21,0	8,0	0,0017	0,0003	0,74	0,07	4,58	0,04	2,37	0,31
		20/08/2008	surface	8,17	17,4	7,0	0,0017	0,0001	0,59	0,09	4,90	0,24	1,26	0,06
	Post-trait.	14/06/2009	surface	7,94	16,3	9,5	0,0011	0,0008	0,51	0,02	3,91	0,05	0,79	0,16
		16/07/2009	surface	8,13	19,5	8,6	0,0034	0,0008	0,59	0,08	5,26	0,14	2,38	0,37
25/08/2009		surface	7,90	20,9	8,0	0,0018	0,0003	0,60	0,10	5,10	0,04	2,42	0,42	
Lac Z	Calibration	/07/2007	surface	8,23	20,2	8,2	0,0013	0,0004	0,43	0,18	5,07	0,13	2,90	0,06
		/08/2007	surface	8,1	16,1	9,8	0,0006	0,0002	0,77	0,03	6,42	0,02	3,76	0,08
		03/06/2008	surface	8,14	12,8	10,8	0,0017	0,0010	0,30	0,06	3,72	0,06	4,84	0,32
		11/07/2008	surface	8,55	19,8	6,8	0,0003	0,0003	0,65	0,02	4,55	0,08	3,01	0,28
		20/08/2008	surface	8,12	17,6	7,5	0,0009	0,0003	0,50	0,03	5,56	0,30	2,13	0,09
	Post-trait.	14/06/2009	surface	8,18	17,3	9,8	0,0006	0,0002	0,59	0,04	3,97	0,02	1,19	0,21
		17/07/2009	surface	8,16	19,9	8,7	0,0006	0,0003	0,46	0,02	4,70	0,04	3,78	0,88
		25/08/2009	surface	8,12	20,4	8,5	0,0008	0,0003	0,54	0,07	4,78	0,01	3,47	0,50
	Calibration	/07/2007	5,5	7,48	8,6	3,9	0,0014	0,0006	0,36	0,06	4,00	0,04	3,75	0,20
		/08/2007	5,5	7,40	10,6	0,6	0,0022	0,0001	3,81	0,46	4,22	0,13	5,27	0,75
		03/06/2009	5,5	7,46	6,1	2,2	0,0091	0,0014	1,58	0,06	3,22	0,02	6,25	0,46
		11/07/2008	5,5		8,9	1,2	0,0016	0,0008	1,03	0,09	3,83	0,02	4,49	0,05
		20/08/2008	5,5	7,04	11,3	0,8	0,0041	0,0007	2,57	0,07	4,11	0,22	3,95	0,11
	Post-trait.	14/06/2009	5,5	7,12	6,2	3,4	0,0032	0,0006	1,75	0,15	3,78	0,13	1,61	0,32
		17/07/2009	5,5	7,02	8,8	2,1	0,0011	0,0003	0,45	0,02	4,20	0,09	5,26	1,28
25/08/2009		5,5	7,35	12,1	2,6	0,0031	0,0008	1,42	0,16	3,90	0,03	5,72	0,09	

Tableau 14. Anions (Paire N° 2)

Lac	Période	Date (jour/mois/an)	Profondeur (m)	F ⁻	Écart-type	Cl ⁻	Écart-type	SO ₄ ²⁻	Écart-type	NO ₃ ⁻	Écart-type
				(mg/L)	σ	(mg/L)	σ	(mg/L)	σ	(mg/L)	σ
Lac X	Calibration	/07/2007	surface	0,028	0,001	2,03	0,01	6,20	0,04	*	
		/08/2007	surface	0,028	0,001	1,93	0,01	5,64	0,03	*	
		03/06/2008	surface	0,026	0,001	1,54	0,00	5,22	0,03	0,05**	0,03
		11/07/2008	surface	0,030	0,000	1,56	0,01	5,60	0,01	0,10**	0,04
		20/08/2008	surface	0,029	0,000	1,58	0,01	5,59	0,03	0,12**	0,13
	Post-trait.	14/06/2009	surface	0,03	0,00	1,27	0,00	4,61	0,02	0,14	0,01
		16/07/2009	surface	0,042	0,009	1,15	0,03	4,53	0,03	0,16	0,02
25/08/2009		surface	0,047	0,001	1,33	0,01	5,20	0,00	0,17	0,02	
Lac Z	Calibration	/07/2007	surface	0,063	0,001	2,01	0,01	4,64	0,05	*	
		/08/2007	surface	0,059	0,000	2,02	0,01	4,45	0,05	*	
		03/06/2008	surface	0,056	0,000	1,78	0,01	5,47	0,01	0,06**	0,02
		11/07/2008	surface	0,059	0,000	1,68	0,01	5,01	0,04	0,19**	0,11
		20/08/2008	surface	0,055	0,001	1,87	0,04	4,47	0,03	0,11**	0,10
	Post-trait.	14/06/2009	surface	0,06	0,00	1,49	0,01	4,53	0,02	0,17	0,01
		17/07/2009	surface	0,073	0,001	1,30	0,01	4,37	0,02	0,14	0,02
		25/08/2009	surface	0,071	0,000	1,69	0,01	4,50	0,01	0,18	0,01
	Calibration	/07/2007	5,5	0,069	0,003	2,40	0,01	6,29	0,07	*	
		/08/2007	5,5	0,100	0,003	2,39	0,01	5,60	0,03	*	
		03/06/2009	5,5	0,073	0,001	2,35	0,01	6,90	0,01	0,07**	0,01
		11/07/2008	5,5	0,066	0,000	2,37	0,01	6,58	0,07	0,19**	0,03
		20/08/2008	5,5	0,072	0,001	2,37	0,13	5,95	0,07	0,27**	0,30
	Post-trait.	14/06/2009	5,5	0,06	0,00	2,09	0,05	6,30	0,02	0,26	0,04
17/07/2009		5,5	0,083	0,000	2,01	0,03	6,13	0,03	0,19	0,02	
25/08/2009		5,5	0,080	0,000	2,08	0,01	5,97	0,01	0,22	0,04	

* Sous le seuil de détection

** Contamination en nitrates

Tableau 15. Cations majeurs (Paire N° 2)

Lac	Période	Date (jour/mois/an)	Profondeur	Ca	Écart-type	Mg	Écart-type	Na	Écart-type	K	Écart-type
			(m)	(mg/L)	σ	(mg/L)	σ	(mg/L)	σ	(mg/L)	σ
Lac X	Calibration	/07/2007	surface	32,48	0,20	6,489	0,036	1,98	0,01	0,24	0,00
		/08/2007	surface	35,49	0,06	6,904	0,023	2,07	0,02	0,25	0,01
		03/06/2008	surface	34,12	0,04	6,415	0,025	1,79	0,00	0,30	0,00
		11/07/2008	surface	37,35	0,67	6,926	0,118	1,93	0,03	0,31	0,00
		20/08/2008	surface	38,65	0,14	7,422	0,015	2,10	0,01	0,30	0,00
	Post-trait.	14/06/2009	surface	32,18	0,18	6,091	0,022	1,60	0,02	0,30	0,00
		16/07/2009	surface	33,62	0,58	6,257	0,114	1,70	0,03	0,34	0,01
25/08/2009		surface	36,75	0,36	6,838	0,068	1,76	0,02	0,27	0,00	
Lac Z	Calibration	/07/2007	surface	48,60	0,30	8,664	0,058	2,29	0,01	0,27	0,00
		/08/2007	surface	50,00	0,03	8,628	0,013	2,23	0,01	0,25	0,01
		03/06/2008	surface	55,39	0,10	8,899	0,005	2,11	0,00	0,37	0,00
		11/07/2008	surface	55,07	0,44	9,226	0,064	2,18	0,01	0,31	0,00
		20/08/2008	surface	52,39	0,16	9,404	0,042	2,26	0,03	0,35	0,06
	Post-trait.	14/06/2009	surface	50,56	0,09	8,275	0,021	1,95	0,00	0,32	0,00
		17/07/2009	surface	50,38	0,18	8,771	0,020	2,03	0,01	0,28	0,00
		25/08/2009	surface	50,60	0,27	9,282	0,052	2,10	0,01	0,29	0,00
	Calibration	/07/2007	5,5	62,77	0,43	10,847	0,062	3,29	0,03	0,55	0,00
		/08/2007	5,5	67,79	0,62	11,945	0,114	3,85	0,06	0,75	0,01
		03/06/2009	5,5	69,84	0,92	11,994	0,123	3,50	0,03	0,72	0,01
		11/07/2008	5,5	68,86	0,41	11,397	0,065	3,17	0,04	0,67	0,03
		20/08/2008	5,5	67,97	0,37	11,682	0,071	3,41	0,03	0,99	0,22
	Post-trait.	14/06/2009	5,5	65,33	0,08	10,110	0,017	2,51	0,02	0,58	0,01
		17/07/2009	5,5	66,04	0,31	10,577	0,060	2,83	0,05	0,63	0,05
		25/08/2009	5,5	67,88	0,37	10,733	0,064	2,76	0,02	0,55	0,00

Tableau 16. Éléments traces et S (Paire N° 2)

Lac	Période	Date (jour/mois/an)	Profondeur (m)	Al	Écart- type	Ba	Écart- type	Cu	Écart- type	Fe	Écart- type	Mn	Écart- type	S	Écart- type	Zn	Écart- type
				(mg/L)	σ												
Lac X	Calibration	/07/2007	surface	0,011	0,001	0,0473	0,0002	*	*	0,012	0,005	0,0012	0,0005	1,99	0,01	*	*
		/08/2007	surface	0,010	0,001	0,0519	0,0000	*	*	0,012	0,000	0,0020	0,0000	1,87	0,00	*	*
		03/06/2008	surface	0,011	0,001	0,0478	0,0001	*	*	0,013	0,001	0,0014	0,0001	1,81	0,01	*	*
		11/07/2008	surface	0,015	0,000	0,0571	0,0008	0,0011	0,0003	0,011	0,001	0,0015	0,0004	1,96	0,02	*	*
		20/08/2008	surface	0,015	0,000	0,0628	0,0002	0,0007	0,0002	0,011	0,001	0,0031	0,0009	2,11	0,01	*	*
	Post-trait.	14/06/2009	surface	0,014	0,001	0,0478	0,0002	*	*	0,012	0,001	0,0012	0,0001	1,62	0,02	0,001	0,000
		16/07/2009	surface	0,015	0,001	0,0522	0,0006	*	*	0,007	0,001	0,0007	0,0001	1,61	0,04	0,001	0,000
25/08/2009		surface	0,017	0,000	0,0566	0,0006	*	*	0,008	0,000	0,0006	0,0001	1,80	0,01	*	*	
Lac Z	Calibration	/07/2007	surface	0,006	0,001	0,0959	0,0006	*	*	0,005	0,000	0,0012	0,0004	1,63	0,01	*	*
		/08/2007	surface	0,006	0,000	0,0985	0,0002	*	*	0,008	0,001	0,0010	0,0000	1,50	0,01	*	*
		03/06/2008	surface	0,008	0,001	0,1116	0,0003	*	*	0,006	0,001	0,0013	0,0003	1,88	0,01	*	*
		11/07/2008	surface	0,009	0,001	0,1162	0,0007	0,0008	0,0002	0,005	0,001	0,0013	0,0001	1,76	0,02	*	*
		20/08/2008	surface	0,010	0,001	0,1162	0,0005	*	*	0,006	0,001	0,0013	0,0004	1,74	0,01	*	*
	Post-trait.	14/06/2009	surface	0,011	0,001	0,1032	0,0002	*	*	0,004	0,000	0,0011	0,0001	1,57	0,01	*	*
		17/07/2009	surface	0,010	0,000	0,1103	0,0002	*	*	0,004	0,000	0,0006	0,0001	1,54	0,02	*	*
		25/08/2009	surface	0,010	0,000	0,1129	0,0006	*	*	0,003	0,000	0,0010	0,0003	1,56	0,01	*	*
	Calibration	/07/2007	5,5	0,007	0,001	0,1200	0,0008	*	*	0,014	0,000	0,2077	0,0028	2,10	0,02	*	*
		/08/2007	5,5	0,007	0,001	0,1429	0,0027	*	*	0,053	0,008	0,8094	0,0337	1,96	0,02	*	*
		03/06/2009	5,5	0,009	0,001	0,1357	0,0016	*	*	0,007	0,003	0,1748	0,0158	2,40	0,03	*	*
		11/07/2008	5,5	0,013	0,007	0,1351	0,0011	0,0009	0,0001	0,015	0,008	0,1300	0,0049	2,31	0,01	*	*
		20/08/2008	5,5	0,014	0,001	0,1546	0,0029	0,0010	0,0001	0,026	0,001	0,4331	0,0082	2,32	0,01	*	*
	Post-trait.	14/06/2009	5,5	0,013	0,001	0,1292	0,0004	*	*	0,005	0,001	0,0101	0,0035	2,20	0,01	0,001	0,000
17/07/2009		5,5	0,012	0,001	0,1312	0,0005	*	*	0,008	0,000	0,0501	0,0050	2,16	0,02	0,001	0,001	
25/08/2009		5,5	0,012	0,000	0,1321	0,0003	*	*	0,009	0,001	0,1822	0,0010	2,01	0,01	*	*	

* Sous le seuil de détection

** Les concentrations en P sont toujours sous le seuil de détection

Tableau 17. Paramètres de base (Paire N° 3)

Lac	Période	Date (jour/mois/an)	Profondeur (m)	pH	Température (°C)	Oxygène dissous (mg/L)	Turbidité		Chl a		COD		CID	
								σ	($\mu\text{g/L}$)	σ	(mg/L)	σ	(mM)	σ
Lac 2ME	Calibration	/07/2007	surface	7,96	20,3	8,1	0,0011	0,0001	0,38	0,25	2,63	0,100	1,39	0,05
		/08/2007	surface	7,54	16,5	10,0	0,0009	0,0005	0,33	0,02	3,06	0,050	1,38	0,05
		05/06/2008	surface	7,43	10,0	11,3	0,0017	0,0003	0,06	0,01	2,84	0,020	1,05	0,16
		12/07/2008	surface	7,68	17,9	8,1	0,0017	0,0013	0,21	0,07	2,70	0,030	1,75	0,02
		22/08/2008	surface	7,75	16,9	9,0	0,0010	0,0005	0,15	0,01	3,20	0,090	1,24	0,04
	Post-trait.	12/06/2009	surface	7,27	10,1	11,3	0,0012	0,0004	0,04	0,00	2,46	0,070	1,65	0,02
		18/07/2009	surface	7,62	18,0	8,5	0,0006	0,0004	0,16	0,01	2,68	0,023	1,98	0,04
26/08/2009		surface	7,86	18,7	8,2	0,0010	0,0004	0,16	0,01	2,67	0,079	1,65	0,11	
Lac Foin	Calibration	/07/2007	surface	8,41	20,9	8,4	0,0027	0,0002	0,86	0,56	3,81	0,130	1,42	0,10
		/08/2007	surface	7,97	16,1	10,3	0,0017	0,0002	0,34	0,04	6,40	0,260	1,12	0,04
		05/06/2008	surface	7,72	10,1	10,5	0,0017	0,0008	0,12	0,01	3,48	0,020	0,94	0,07
		12/07/2008	surface	8,32	21,7	9,3	0,0010	0,0006	0,47	0,02	3,88	0,040	1,63	0,01
		22/08/2008	surface	7,52	17,7	9,0	0,0013	0,0003	0,24	0,05	5,03	0,190	1,17	0,01
	Post-trait.	12/06/2009	surface	7,84	13,3	10,8	0,0015	0,0004	0,51	0,02	2,99	0,019	0,41	0,05
		18/07/2009	surface	7,54	18,9	9,3	0,0022	0,0005	0,45	0,04	4,09	0,068	1,78	0,04
26/08/2009		surface	8,34	20,2	9,4	0,0020	0,0003	0,32	0,05	4,16	0,012	1,73	0,06	

Tableau 18. Anions (Paire N° 3)

Lac	Période	Date (jour/mois/an)	Profondeur (m)	F ⁻	Écart- type	Cl ⁻	Écart- type	SO ₄ ²⁻	Écart-type	NO ₃ ⁻	Écart-type
				(mg/L)	σ	(mg/L)	σ	(mg/L)	σ	(mg/L)	σ
Lac 2ME	Calibration	/07/2007	surface	0,018	0,001	4,66	0,03	8,53	0,05	*	
		/08/2007	surface	0,017	0,000	3,58	0,02	7,77	0,07	*	
		05/06/2008	surface	0,016	0,000	3,28	0,03	5,75	0,01	0,14**	0,05
		12/07/2008	surface	*		4,39	0,01	7,85	0,01	0,10**	0,05
		22/08/2008	surface	0,019	0,000	4,73	0,03	8,95	0,05	0,08**	0,03
	Post-trait.	12/06/2009	surface	0,01	0,01	3,14	3,14	6,44	6,44	0,18	0,18
		18/07/2009	surface	0,040	0,003	3,71	0,03	8,03	0,06	0,09	0,01
26/08/2009		surface	0,035	0,000	4,37	0,01	9,29	0,02	0,19	0,03	
Lac Foin	Calibration	/07/2007	surface	0,020	0,000	3,60	0,01	8,56	0,03	*	
		/08/2007	surface	0,016	0,003	2,94	0,04	7,25	0,04	*	
		05/06/2008	surface	*		3,24	0,04	5,46	0,01	0,21**	0,05
		12/07/2008	surface	0,020	0,000	3,40	0,02	7,71	0,02	0,06**	0,02
		22/08/2008	surface	0,021	0,000	3,59	0,04	8,27	0,07	0,07**	0,02
	Post-trait.	12/06/2009	surface	0,01	0,01	3,01	3,01	6,52	6,52	0,18	0,18
		18/07/2009	surface	0,036	0,000	2,84	0,03	7,66	0,08	0,07	0,00
26/08/2009		surface	0,035	0,000	3,23	0,01	8,71	0,01	0,15	0,03	

* Sous le seuil de détection

** Contamination en nitrates

Tableau 19. Cations majeurs (Paire N° 3)

Lac	Période	Date (jour/mois/an)	Profondeur	Ca	Écart- type	Mg	Écart- type	Na	Écart- type	K	Écart- type
				(mg/L)	σ	(mg/L)	σ	(mg/L)	σ	(mg/L)	σ
Lac 2ME	Calibration	/07/2007	surface	20,37	0,18	5,122	0,044	3,58	0,03	0,40	0,00
		/08/2007	surface	19,92	0,05	5,028	0,019	3,11	0,00	0,35	0,00
		05/06/2008	surface	14,36	0,13	3,572	0,043	2,20	0,01	0,32	0,00
		12/07/2008	surface	20,89	0,11	5,125	0,028	3,25	0,01	0,44	0,02
		22/08/2008	surface	21,99	0,22	5,620	0,053	3,60	0,03	0,44	0,01
	Post-trait.	12/06/2009	surface	16,09	0,07	3,986	0,024	2,40	0,01	0,33	0,01
		18/07/2009	surface	21,27	0,12	5,225	0,031	3,39	0,02	0,42	0,00
26/08/2009		surface	23,69	0,06	5,806	0,007	3,46	0,04	0,45	0,02	
Lac Foin	Calibration	/07/2007	surface	20,64	0,22	4,954	0,057	2,94	0,04	0,42	0,01
		/08/2007	surface	17,86	0,05	4,336	0,004	2,68	0,01	0,33	0,01
		05/06/2008	surface	12,85	0,08	3,131	0,019	2,07	0,01	0,30	0,00
		12/07/2008	surface	20,41	0,10	4,807	0,027	2,69	0,02	0,41	0,00
		22/08/2008	surface	22,33	0,22	5,525	0,044	3,05	0,02	0,44	0,01
	Post-trait.	12/06/2009	surface	15,23	0,05	3,685	0,013	2,26	0,02	0,32	0,00
		18/07/2009	surface	20,92	0,02	5,006	0,005	2,80	0,01	0,40	0,00
		26/08/2009	surface	24,26	0,31	5,771	0,084	2,98	0,04	0,40	0,02

Tableau 20. Éléments traces et S (Paire N° 3)

Lac	Date (jour/mois/an)	Profondeur	Al	Écart- type	Ba	Écart- type	Cu	Écart- type	Fe	Écart- type	Mn	Écart- type	S	Écart- type
			(mg/L)	σ										
Lac 2ME	/07/2007	surface	0,011	0,001	0,0305	0,0003	*	*	0,011	0,002	0,0011	0,0001	2,80	0,03
	/08/2007	surface	0,011	0,000	0,0250	0,0000	*	*	0,009	0,000	0,0009	0,0000	2,52	0,02
	05/06/2008	surface	0,015	0,000	0,0167	0,0001	*	*	0,010	0,001	0,0004	0,0001	1,93	0,01
	12/07/2008	surface	0,016	0,001	0,0334	0,0001	0,0010	0,0001	0,018	0,002	0,0015	0,0001	2,72	0,01
	22/08/2008	surface	0,014	0,002	0,0350	0,0002	*	*	0,016	0,002	0,0013	0,0002	3,32	0,04
	12/06/2009	surface	0,013	0,001	0,0198	0,0001	*	*	0,007	0,000	*	*	2,21	0,03
	18/07/2009	surface	0,014	0,001	0,0333	0,0002	*	*	0,010	0,000	0,0012	0,0001	2,86	0,00
	26/08/2009	surface	0,011	0,000	0,0367	0,0001	*	*	0,013	0,000	0,0015	0,0001	3,18	0,01
Lac Foin	/07/2007	surface	0,018	0,001	0,0195	0,0002	*	*	0,024	0,001	0,0027	0,0002	2,83	0,03
	/08/2007	surface	0,029	0,002	0,0162	0,0000	*	*	0,027	0,001	0,0022	0,0000	2,37	0,01
	05/06/2008	surface	0,023	0,000	0,0120	0,0001	*	*	0,013	0,000	0,0007	0,0001	1,85	0,01
	12/07/2008	surface	0,025	0,001	0,0203	0,0001	0,0019	0,0003	0,028	0,002	0,0024	0,0005	2,69	0,01
	22/08/2008	surface	0,022	0,003	0,0235	0,0003	0,0010	0,0003	0,025	0,005	0,0018	0,0009	3,04	0,03
	12/06/2009	surface	0,020	0,000	0,0144	0,0001	*	*	0,010	0,001	0,0006	0,0001	2,32	0,16
	18/07/2009	surface	0,023	0,002	0,0209	0,0001	*	*	0,017	0,002	0,0015	0,0006	2,75	0,02
	26/08/2009	surface	0,021	0,004	0,0238	0,0001	*	*	0,019	0,003	0,0010	0,0003	3,01	0,03

* Sous le seuil de détection

** Les concentrations en P et Zn sont toujours sous le seuil de détection

ANNEXE 3 : Exemple de distribution entre les phases dissoute et particulaire (août 2008)

Tableau 21. Fraction particulaire (%) pour l'échantillonnage d'août 2008

Lac	Al	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	S	Zn
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Ébron	8	0	0	1	6	1	0	7	0	*	0	*
Pics	4	0	0	7	8	0	0	19	0	*	0	*
X	0	0	0	10	11	0	0	22	0	*	0	*
Z	2	0	0	*	7	0	0	37	0	*	0	*
2ME	17	2	1	*	17	0	1	16	1	*	2	*
Foin	4	0	0	16	12	4	0	21	0	*	0	*