

Stratégie préliminaire pour mesurer les impacts de la coupe forestière sur la physico-chimie des lacs marneux de la Réserve faunique des Chic-Chocs

Rapport de recherche No R-848

Mars 2006

STRATÉGIE PRÉLIMINAIRE POUR MESURER
LES IMPACTS DE LA COUPE FORESTIÈRE SUR
LA PHYSICO-CHIMIE DES LACS MARNEUX DE
LA RÉSERVE FAUNIQUE DES CHIC-CHOCS

Rapport rédigé pour

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune
Secteur Faune Québec
Direction de l'aménagement de la Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine
124, 1^{ère} avenue Ouest
Sainte-Anne-Des-Monts (Québec)
G4V 1C5

par

Claude Fortin

Sylvain Jutras

Alain N. Rousseau

Institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau, Terre et Environnement
490 de la Couronne, Québec (Québec) Canada G1K 9A9

Rapport de recherche No R848

Mars 2006

Table des matières

1. INTRODUCTION	1
1.1 PROBLÉMATIQUE	1
1.2 HYPOTHÈSE AVANCÉE PAR LE MRNF	1
1.3 MANDAT	2
1.4 LES LACS MARNEUX	2
2. CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES	5
2.1 CADRE BIOCLIMATIQUE DE LA RÉSERVE FAUNIQUE DES CHIC-CHOCS	5
2.2 HYDROLOGIE FORESTIÈRE	5
2.2.1 Influence de la récolte forestière sur l'hydrologie	8
2.2.1.1 Récolte forestière et quantité d'eau	10
2.2.1.2 Récolte forestière et qualité de l'eau	10
2.3 GÉOCHIMIE DES LACS MARNEUX	11
2.3.1 Rôle dominant de l'équilibre eau/carbonates dans la régulation du pH des lacs marneux	11
2.3.2 Influence de la marne sur la physico-chimie des lacs marneux	13
2.3.2.1 Phosphates	13
2.3.3 Autres facteurs pouvant influencer le pH des lacs marneux	14
3. STRATÉGIE RECOMMANDÉE POUR MESURER LES IMPACTS DE LA COUPE FORESTIÈRE SUR LES LACS MARNEUX	15
3.1 MÉTHODE DE COMPARAISON JUMELÉE	15
3.1.1 Paramètres d'identification des sites	15
3.1.2 Durée du suivi	15
3.1.3 Mesures sur le bassin versant	16
3.1.4 Mesures sur les lacs	16
3.2 MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE PONCTUEL	17
3.2.1 Paramètres d'identification des sites	18
3.2.2 Mesures sur le bassin versant	18
3.2.3 Mesures sur les lacs	18
3.2.4 Traitement des données	19
4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	21
4.1 CONCLUSIONS	21
4.2 AUTRES AVENUES À EXPLORER	21
4.2.1 Reconstitution des conditions passées	21
4.2.1.1 Relation succès de pêche et récolte forestière (données historiques)	21
4.2.1.2 Chronologie sédimentaire et outils isotopiques	22
4.2.2 Examen des données disponibles ailleurs dans le monde	22
4.2.3 Autres hypothèses à envisager	22
4.2.3.1 Effets indirects de la récolte forestière	22
4.2.3.2 Effets indirects de la formation de marne sur la reproduction de l'omble fontaine	22
5. BIBLIOGRAPHIE	23

1. Introduction

1.1 Problématique

La Réserve faunique des Chic-Chocs renferme des lacs dont le pH élevé 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), dépend directement des revenus générés par les activités de chasse et de pêche sportive. Des baisses de rendement de pêche sportive seraient, par conséquent, préjudiciables pour ce territoire faunique. Dans ce contexte, les gestionnaires de la Réserve 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. Cette appréhension est basée sur l'étude réalisée par Faune-Experts (Guitard et Fleury, 2002), où l'on suggère que la récolte forestière pourrait être responsable de la baisse récente du succès de pêche de l'omble de fontaine du lac Joffre.

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-bio-chimie de l'eau des lacs par :

- 1- 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 production élevée de marne (CaCO_3 colloïdal, maarl) accompagnée d'une hausse du pH.
- 2- 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 Hypothèse avancée par le MRNF

La récolte forestière diminue l'évapotranspiration et augmente les apports en eau souterraine vers les lacs marneux de la réserve faunique des Chic-Chocs par rapport aux écoulements de surface. Ces eaux étant riches en carbonates et sursaturé en CO_2 , elles contribuent à l'augmentation du pH du lac et de la turbidité par la formation de marne. Ces changements importants dans la physico-chimie pourraient avoir un impact négatif sur la productivité piscicole de ces lacs (C. Turcotte, communication personnelle, 6 mars 2006).

1.3 Mandat

Ce rapport propose une stratégie préliminaire de suivi limnologique qui assurera l'acquisition de données fiables pour déterminer les impacts de la coupe forestière sur la réponse géochimique des lacs marneux de la réserve faunique des Chic-Chocs.

Nous devons donc identifier les paramètres à mesurer pour ce suivi limnologique et qui, selon nos connaissances actuelles, permettraient de tester l'hypothèse avancée par le MRNF. Toutefois, cette stratégie préliminaire pourrait nécessiter une actualisation suite à un examen exhaustif :

- (i) de la littérature sur les effets des récoltes forestières sur la qualité des eaux de lacs marneux ;
- (ii) de la connaissance sur la productivité de l'omble de fontaine dans les lacs marneux ;
- (iii) des données d'exploitation de l'omble de fontaine de la région et du suivi approprié permettant de mesurer les impacts sur la productivité piscicole ;
- (iv) des données hydrométéorologiques, physiographiques et physico-chimiques des bassins versants et lacs d'intérêts et disponibles ; et
- (v) de l'historique des coupes de bois ainsi que des prévisions de récoltes pour les prochaines années.

Ces aspects essentiels n'ont pu être examinés en profondeur dans le cadre de ce travail préliminaire.

1.4 Les lacs marneux

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 causées 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, elle permet une plus grande dissolution de $\text{CaCO}_{3(s)}$. Au contact de l'eau du lac

(ayant une pression partielle de CO₂ 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 (voir section 2.3.3).

2. Considérations théoriques

2.1 Cadre bioclimatique de la réserve faunique des Chic-Chocs

La réserve faunique des Chic-Chocs fait partie de la sous-zone de la forêt boréale continue et plus précisément du sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc de l'est. Les peuplements forestiers qu'on y retrouve sont à dominance résineuse. La sapinière à bouleau blanc et érable à épis domine les sites mésiques, qui représentent le type de régime hydrique le plus fréquent sur le territoire (Robitaille et Saucier 1998). Les dépôts de surface sont majoritairement d'origine glaciaire et ils sont dominés par les tills indifférenciés profonds à minces. La géologie régionale est caractérisée par la présence de calcaire. Les précipitations y sont très abondantes (1300 mm/an) et la température annuelle moyenne y est de 0°C. La fraction nivale se situe entre 35 et 45%. L'évapotranspiration potentielle estimée par Wilson (1971) est de 475 mm, soit 36% des précipitations (OIFQ 1996). De façon générale, les précipitations sont acides, avoisinant un pH annuel moyen de 4,35 pour le Québec méridional.

2.2 Hydrologie forestière

Afin de bien comprendre les processus hydrologiques prévalant sur les bassins versants forestiers au moment de la coupe, il est de mise de décrire le bilan hydrologique des milieux naturels. Ce bilan stipule que la variation des réserves en eau (ΔV) d'un bassin versant sur une période de temps (Δt) correspond aux apports en eau au système par les précipitations (P) et l'écoulement souterrain (G_i) à la frontière du bassin et les sorties en eau représentées par l'écoulement d'eau souterraine (G_o), l'écoulement à l'exutoire (Q) et l'évapotranspiration (ET):

$$(1) \quad \frac{\Delta V}{\Delta t} = (P + G_i) - (G_o + Q + ET)$$

Les unités de ce bilan sont souvent exprimées en hauteur d'eau, c'est-à-dire au rapport des volumes en jeu sur la surface du bassin versant [L^3/L^2]. De plus, étant donné la définition topographique du bassin versant et l'écoulement gravitationnel de l'eau souterraine, on suppose généralement que les apports transfrontaliers souterrains sont négligeables (G_o & $G_i \cong 0$). Finalement, il est important de réaliser que sur de longues périodes la variation du volume d'eau stocké dans le bassin versant est négligeable annuellement si le début et la fin de la période d'analyse correspondent au moment de l'année où V atteint son maximum. Pour le Québec, cette période coïncide généralement avec la fin de la période

de la fonte de neige. Ainsi, sur une base annuelle on peut simplifier le bilan hydrologique comme suit :

$$(2) \quad Q = P - ET$$

Bien entendu, les bilans hydrologiques sont entachés d'erreurs. Ces dernières peuvent avoir leur origine même dans l'évaluation des termes G_0 et V et dans la précision des mesures des termes P , ET et Q de l'équation du bilan. En ce qui a trait aux termes G_0 et V , il s'agit plutôt d'erreurs associées à la prise de la mesure, c'est-à-dire à l'identification même des composantes de ces termes, tandis qu'au niveau des autres termes P , ET et Q , il s'agit plutôt d'une problématique liée à la précision des instruments de mesure ou encore, en ce qui concerne la précipitation et l'évapotranspiration, à la représentativité spatio-temporelle des mesures.

À l'échelle intra-annuelle, les écoulements dans les rivières et les lacs sont générés par une combinaison de l'écoulement souterrain et du ruissellement de surface. À noter que les précipitations directes sur le réseau hydrographique représentent une autre source d'écoulement de surface mais elle est en général négligeable. Au niveau du ruissellement de surface, les concepts les plus souvent utilisés pour en expliquer la genèse sont : (i) le ruissellement par dépassement de l'infiltrabilité, le ruissellement dit Hortonien, (ii) le ruissellement par saturation et (iii) le ruissellement par exfiltration. La Figure 2.1 illustre ces trois types de ruissellement.

Le ruissellement Hortonien se produit lorsque l'intensité de la pluie excède l'infiltrabilité du sol. Il y a alors saturation de la surface par le haut et après que les dépressions aient été remplies, l'eau en excès s'écoule par ruissellement sur les versants pour former l'écoulement rapide de crue en rivière. L'eau de la couche superficielle du sol qui est saturée s'écoulera par gravité et contribuera à la recharge de la nappe et au débit de base (écoulement en temps sec). À noter que le ruissellement Hortonien ne se manifeste pas à la grandeur d'un bassin versant et il est souvent confiné à une zone limitée. Selon la localisation de cette zone, l'excédent d'eau peut contribuer au débit de crue ou tout simplement s'infiltrer plus en aval sur le versant et ainsi contribuer à l'écoulement souterrain via un écoulement hypodermique ou une recharge rapide de la nappe phréatique.

Le ruissellement par saturation se manifeste lorsque la pluie tombe sur des surfaces saturées par le bas et ainsi, l'eau excédentaire ne peut que s'écouler en surface ou forcer qu'un volume d'eau équivalent s'écoule par écoulement hypodermique en conditions saturées par effet piston le long du versant. Dans ce dernier cas, il y aura un mouvement d'eaux d'âge, d'origine et de cheminement très différents. Ces surfaces sont généralement localisées dans le bas des versants et dans la plaine inondable des cours d'eau de même qu'à la tête des réseaux hydrographiques où les sols sont bien souvent peu profonds. Ces zones ou surfaces contribuent directement à l'écoulement de crue ou à l'écoulement de base (écoulement d'origine souterraine) s'il y a infiltration de la lame d'eau avant qu'elle se rende au cours d'eau.

À noter que l'écoulement hypodermique dans le sol peut aussi se produire en conditions non saturées. Sous ces conditions, l'eau infiltrée provoque, dans le cas des sols peu profonds, une recharge rapide de la nappe. Ce processus peut être accéléré par la présence d'un écoulement préférentiel vertical ou latéral causé par la présence de macropores non capillaires ou de fissures dans le sol causées par un système racinaire en décomposition, des galeries d'animaux ou des fentes de dessiccation. Au niveau de la roche, il peut également y avoir une présence de conduits karstiques pouvant transmettre de l'eau libre très rapidement.

Le ruissellement alimenté par l'exfiltration se produit lorsque la nappe affleure la surface du sol. Il est donc d'origine souterraine (voir Figure 2.1).

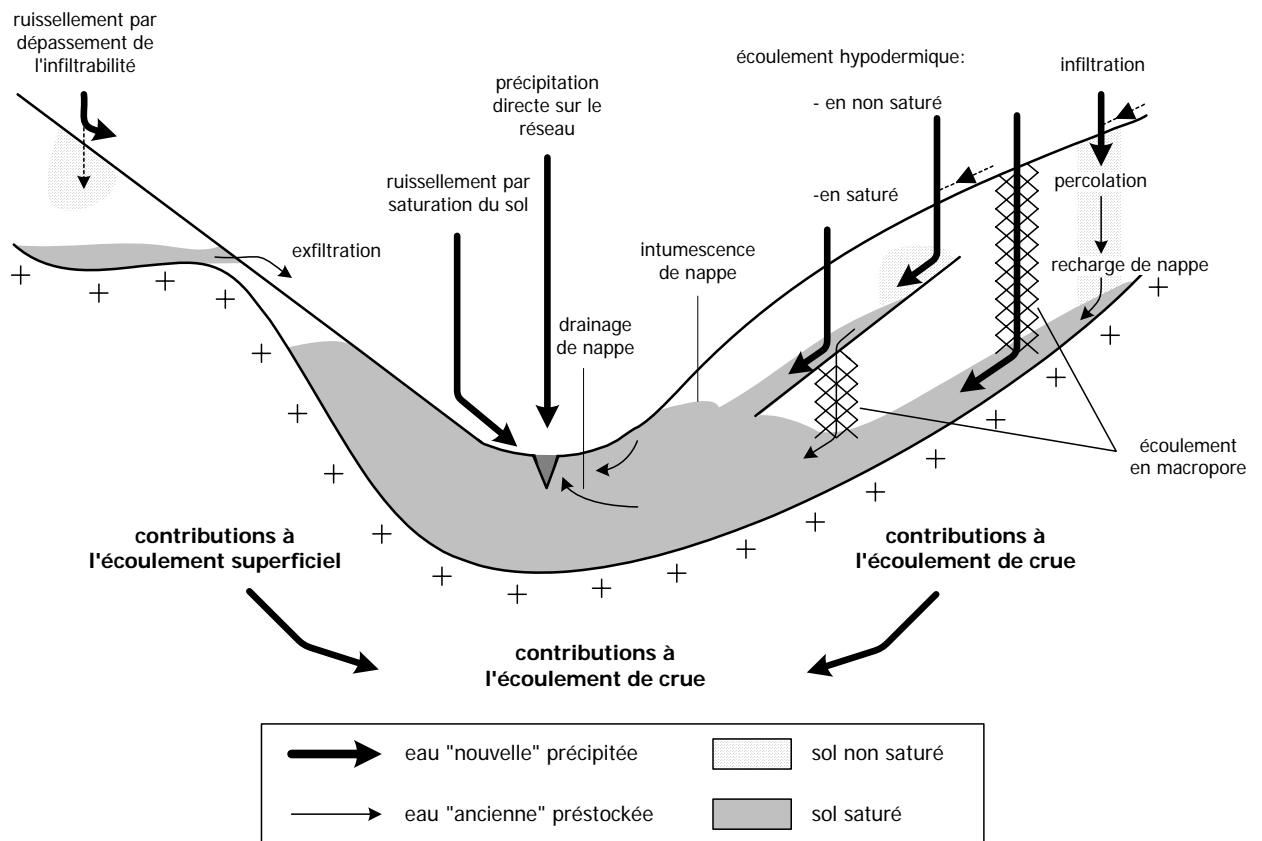


Figure 2.1 : Écoulement de crue : processus superficiels et souterrains (adaptée d'Ambroise [1998]).

La genèse de l'écoulement de crue, c'est-à-dire la réponse du bassin versant à un événement pluvieux donné, dépend de plusieurs facteurs. Ainsi, la forme et le volume de l'hydrogramme de crue variera selon les conditions aux limites (forçages atmosphériques) et initiales (état hydrique du bassin). Au niveau du forçage atmosphérique, on entend ici l'apport de précipitations liquides (immédiatement disponibles) ou solides (écoulement

retardé jusqu'à la fonte) et son intensité ainsi que l'apport d'énergie (radiative et advective). En ce qui a trait aux conditions initiales, elles incluent le profil hydrique des sols, la réserve en eau dans le bassin versant et la demande évaporatoire de l'atmosphère. La Figure 2.2 illustre comment les conditions initiales peuvent affecter le volume d'un hydrogramme pour un apport donné.

Pour les mêmes conditions limites et initiales, les propriétés physiques du bassin versant, et leurs variations spatio-temporelles, viendront influencer la genèse de l'écoulement de crue de manière importante. On entend ici par propriétés physiques : l'aménagement du bassin versant (diverses occupations du sol, couverts végétal et forestier, régions imperméables) et les sols et sous-sols. Au niveau du couvert végétal, on pense ici à sa densité et à son indice foliaire. Chaque couverture du bassin versant sera caractérisée par une rugosité de surface et une infiltrabilité. Quant aux sols, ils seront caractérisés par leur rétention hydrique, conductivité hydraulique et géométrie des macropores.

La topographie et la morphométrie auront aussi un impact sur l'écoulement de crue car le ruissellement sur un versant dépendra à la fois de la pente et de la forme de ce dernier (concave ou convexe par rapport au plan) de même que du réseau de drainage superficiel (rigoles, fossés, sillons). De plus, l'orientation des pentes par rapport au soleil (ex. : vitesse de la fonte) ainsi que l'altitude (ex. : effets orographiques) auront des impacts sur la genèse des écoulements.

2.2.1 Influence de la récolte forestière sur l'hydrologie

La récolte forestière, en éliminant le couvert arborescent, affecte le bilan hydrologique principalement en restreignant l'évapotranspiration (ET) sans toutefois le 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 les précipitations (P) ne sont pas affectées par la récolte forestière, une plus grande proportion de l'apport d'eau dans le bassin versant sera disponible pour l'écoulement (Q).

Les opérations de récolte forestière 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 et la dimension des macropores du 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, lorsque orientés parallèlement à la pente, accélérer la vitesse de ruissellement de l'eau. Toutefois, l'application des mesures de protection des milieux riverains, tels que la conservation de lisières boisées aux pourtours des lacs et cours d'eau, atténuent efficacement, 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 multiplicatives sur la qualité de l'eau du lac en question (Seto 2005).

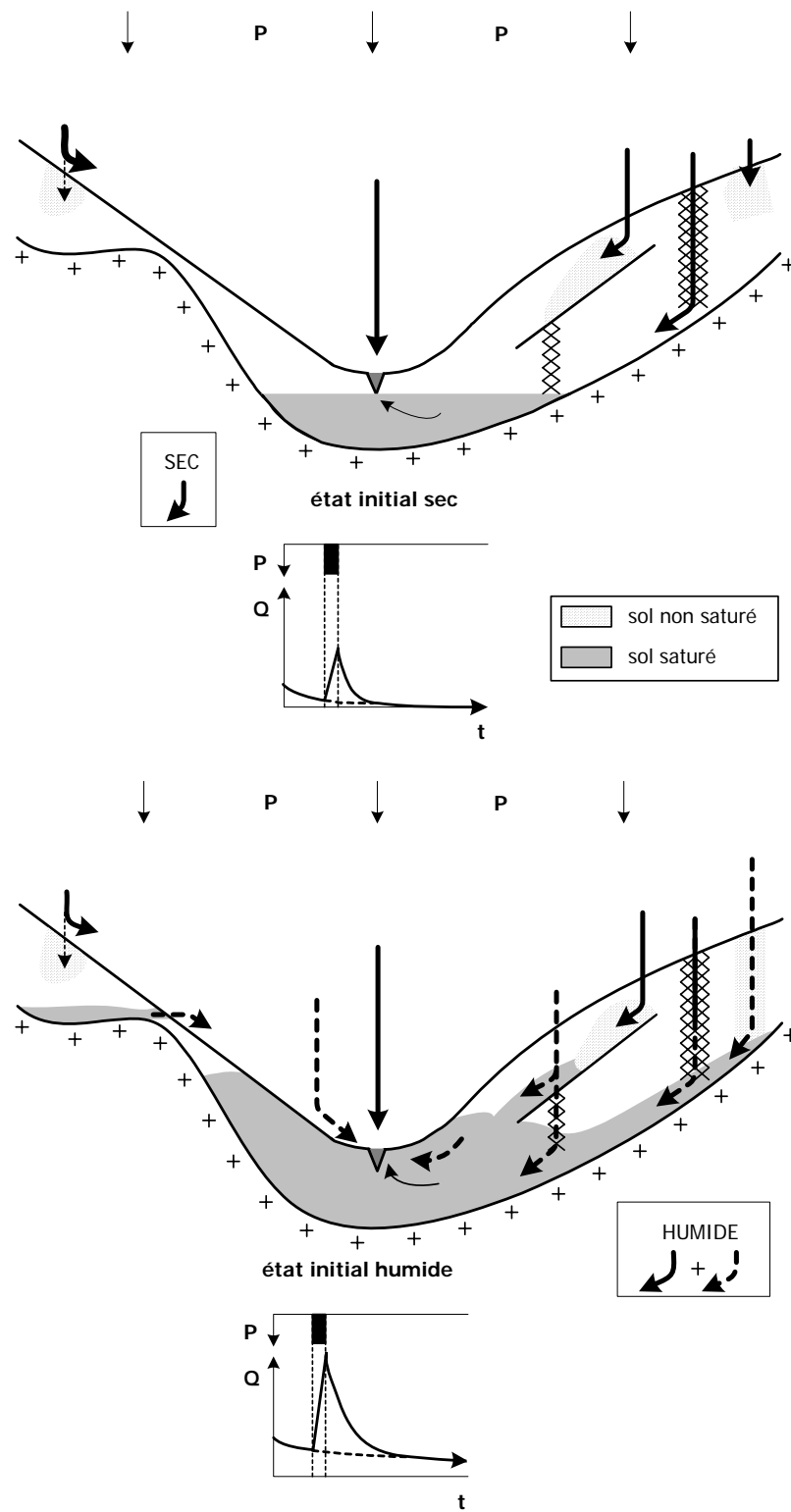


Figure 2.2 : Effets des conditions initiales sur le volume d'un hydrogramme (adaptée d'Ambroise [1998]).

La récolte forestière nécessite inévitablement la construction et l'utilisation d'un réseau routier d'accès. Cette voirie forestière est susceptible de causer des modifications importantes sur le régime d'écoulement des bassins versants. Le respect des règlements en vigueur sur les terres du domaine public quant à l'installation de ponceaux et à la traverse de cours d'eau est primordial.

2.2.1.1 Récolte forestière et quantité d'eau

Il est généralement reconnu que la récolte forestière a des impacts beaucoup plus importants sur les débits d'étiage que sur les débits de pointe (Storck *et al.* 1998; Beshta *et al.* 2000; Caissie *et al.* 2002; dans Lavigne *et al.* 2004). Les débits d'étiage sont ceux qui caractérisent les périodes estivales où les précipitations sont absentes ou faibles. Ils sont influencés par l'écoulement souterrain qui provient de la nappe phréatique, laquelle est grandement affectée par la réduction de l'évapotranspiration. Les débits d'étiage augmentent donc après la récolte forestière. Les débits de pointe caractérisent les événements de précipitations intenses et de fonte printanière. Puisque les capacités de stockage en eau du sol sont rapidement dépassées dans de telles occasions, toute nouvelle eau s'ajoutera à l'écoulement. L'influence de l'évapotranspiration est donc minime lors de précipitations intenses, ce qui explique le peu d'effet de la récolte forestière sur les débits de pointes. Il a d'ailleurs été démontré récemment que les débits de pointes ne sont pas significativement affectés par des récoltes couvrant 50 % de la superficie des bassins versants (Tremblay *et al.* 2006 *en préparation*). L'importance des changements causés par la récolte forestière dépendra donc grandement de la proportion du bassin versant soumis à une modification de son couvert végétal.

L'intégration temporelle de l'augmentation des débits causés par la coupe exprime un accroissement du volume d'eau total. Ce volume d'eau excédentaire provient principalement de l'écoulement souterrain qui caractérise les débits d'étiage.

2.2.1.2 Récolte forestière et qualité de l'eau

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, celle-ci 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 du débit 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 est fortement mise en doute (Prepas *et al.* 2003) à l'exception des

formes particulières. Ceci dit, nous savons que la récolte forestière affectera divers paramètres physico-chimiques de l'eau (Prepas et al. 2003) et pourrait mener à :

- une augmentation de la température moyenne de l'eau des rivières (Plamondon 1993) ;
- une augmentation de l'acidité ;
- une augmentation de s concentrations de sédiments en suspension ;
- une augmentation de la concentration de nutriments (N et P) ;
- une augmentation de la concentration de cations minéraux (Ca^{2+} , K^+ , Fe^{2+}) ;
- une augmentation de la concentration de carbone organique dissous ;
- une réduction de la concentration d'oxygène dissous.

Par contre, ces informations sont majoritairement issues d'études appliquées au bouclier canadien boréal. 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 ne correspond pas à celle des Chic-Chocs. Il semble toutefois évident que la coupe forestière affecte la qualité de l'eau, peu importe les conditions géophysiques des sites où on l'applique. De plus, elle pourrait avoir un effet différent sur la qualité de l'eau d'un lac si ce dernier est alimenté par des cours d'eau par rapport à des 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. C'est pourquoi il y a un besoin de conduire des travaux de recherche appliqués à la région des Chic-Chocs.

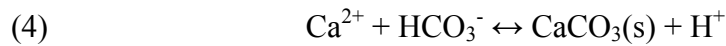
2.3 Géochimie des lacs marneux

2.3.1 Rôle dominant de l'équilibre eau/carbonates dans la régulation du pH des lacs marneux

Les lacs marneux sont en grande partie approvisionnés en eaux souterraines qui ont été en contact avec des roches calcaires. La pression partielle de CO_2 étant plus élevée dans les sols que dans l'atmosphère, l'eau souterraine devient sursaturée en CO_2 et une fois en contact avec l'eau du lac, qui tend à l'équilibre avec l'atmosphère. Il en résulte un dégazage important en $\text{CO}_2(\text{g})$:



La consommation de protons qui en résulte fera évidemment monter le pH. Cette augmentation de pH mènera à des conditions de sursaturation par rapport à la calcite et à la précipitation de cette phase minérale :



Notons que cette dernière réaction aura un effet inverse sur le pH.

On peut aisément calculer le pH d'équilibre pour un système ouvert à l'atmosphère et à l'équilibre avec la calcite. Il suffit de résoudre le système d'équations suivant :

$$(5) \quad [\text{H}^+] \cdot [\text{HCO}_3^-] / [\text{H}_2\text{CO}_3] = K_1$$

$$(6) \quad [\text{H}^+] \cdot [\text{CO}_3^{2-}] / [\text{HCO}_3^-] = K_2$$

$$(7) \quad [\text{H}_2\text{CO}_3] / p\text{CO}_2 = K_H$$

$$(8) \quad [\text{H}^+] \cdot [\text{OH}^-] = K_w$$

$$(9) \quad [\text{Ca}^{2+}] \cdot [\text{CO}_3^{2-}] = K_{so}$$

où K_1 est la constante de dissociation de l'acide carbonique ($10^{-6,35}$) ; K_2 la constante de dissociation du bicarbonate ($10^{-10,33}$) ; $p\text{CO}_2$ la pression partielle de CO_2 dans l'atmosphère ($10^{-3,5}$) ; K_H la constante de Henry de répartition entre la phase gazeuse et aqueuse du CO_2 ($0,0339 \text{ M} \cdot \text{atm}^{-1}$) ; K_w la constante d'autoprotolyse de l'eau (10^{-14}) ; et K_{so} la constante de solubilité de la calcite ($10^{-8,4}$).

Ce système peut être résolu à l'aide d'une équation de bilan des charges :

$$(10) \quad 2[\text{Ca}^{2+}] + [\text{H}^+] = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-]$$

Ainsi, dans un système ouvert à l'atmosphère et à l'équilibre avec la calcite, le pH sera de 8,3 (Stumm et Morgan, 1996). Toutefois, si le dégazage se produit plus rapidement que la précipitation de calcite, il en résulte un déséquilibre et un pH plus élevé, selon le degré de sursaturation du solide. Selon les données disponibles (Guitard et Fleury, 2002), la concentration de Ca dans le lac Joffre est de 0,68 mM. En présumant qu'il s'agisse de la concentration dissoute de Ca (échantillon filtré) et que $Ca_{\text{dissous}} = Ca^{2+}$, il est possible d'estimer le degré de sursaturation du système qui permettrait d'obtenir cette concentration de Ca^{2+} . En imposant cette concentration de Ca, l'eau serait sursaturé par rapport à la calcite par un facteur 3,2, c'est-à-dire que le produit des concentrations de Ca^{2+} et de CO_3^{2-} est 3,2 fois plus grand que le produit de solubilité ($[Ca^{2+}] \cdot [CO_3^{2-}]$) de la calcite. Le pH calculé pour ce système est de 8,5, ce qui est relativement proche des observations (8,6 – 9,0). Considérant que nos calculs sont sommaires (sans tenir compte de la force ionique, de la composition exacte de l'eau et de la température), ils semblent bien correspondre à la réalité du lac Joffre. Notons que la faible profondeur et l'absence de stratification au lac Joffre pourrait vraisemblablement favoriser un dégazage plus rapide de la colonne d'eau par rapport à un lac profond et stratifié.

Ces milieux riches en carbonates sont très bien tamponnés de sorte que toute source d'acidité sera rapidement neutralisée. De même, le pH ne peut pas augmenter indéfiniment, la précipitation de calcite agissant comme une soupape (voir éq (4)).

2.3.2 Influence de la marne sur la physico-chimie des lacs marneux

2.3.2.1 Phosphates

L'adsorption et / ou la co-précipitation des phosphates (PO_4) avec la calcite est très bien documentée (Otsuki et Wetzel, 1972 ; House et Donaldson, 1986 ; Wetzel, 2001). Ainsi, les phosphates véhiculés par le ruissellement sur le bassin versant seront séquestrés efficacement par adsorption à la surface de la marne ou encore, dans une moindre mesure, par co-précipitation. Le principal facteur qui influence l'adsorption des phosphates par la calcite est la surface de substrat disponible, mais la température et le pH peuvent également influencer l'adsorption. Les concentrations de phosphore sédimentaires devraient être appréciables suite à la sédimentation de marne sur laquelle le phosphore se sera adsorbé ou encore si il y a eu (co-)précipitation d'hydroxylapatite ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2(s)$), les phosphates étant généralement peu solubles à pH élevés (Stumm et Morgan, 1996 ; Wetzel, 2001).

Comme la surface de marne disponible est vraisemblablement en grand excès dans les lacs marneux par rapport aux PO_4 , il ne serait pas étonnant que les concentrations dissoutes de P soient infimes dans la colonne d'eau. À cet égard, les données obtenues par Guitard et Fleury (2002) indiquent que la concentration en orthophosphates ($< 10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) dans le lac Joffre est largement inférieure à la concentration de phosphore total ($150 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). Cette observation semble cohérente avec une importante adsorption des phosphates à la surface de la calcite.

En raison de la faible disponibilité des phosphates, les lacs marneux sont habituellement très peu productifs (Otsuki et Wetzel, 1972). Les lacs marneux des Chic-Chocs ne devraient pas faire exception.

Dans certains cas, la formation de marne peut être due à une éclosion massive d'algues ou de diatomées. Le gradient de pH (qui augmente par la consommation de CO_2 ou par échange $\text{HCO}_3^- / \text{OH}^-$) à l'intérieur de la couche limite de diffusion (quelques microns) est alors suffisant pour déclencher une précipitation de calcite. Ce mécanisme est peu probable ici, le pH étant déjà suffisamment élevé pour favoriser la précipitation de calcite.

2.3.3 Autres facteurs pouvant influencer le pH des lacs marneux

Les apports par ruissellement peuvent potentiellement jouer un rôle sur le pH des lacs marneux dans la mesure où l'eau de surface est plutôt acide étant donné la présence importante de matière organique. Il ne s'agira toutefois que d'un paramètre relativement peu sensible en raison de la grande capacité tampon de l'eau d'un lac marneux. Ce pouvoir tampon est quasi-infini si l'on considère le réservoir de marne présent dans la colonne d'eau et dans les sédiments.

Les fluctuations diurnes / nocturnes en pH peuvent être importantes dans le cas des lacs eutrophes. En effet, le passage de la photosynthèse le jour vers la respiration la nuit peut modifier le pH de façon significative sur une base quotidienne. Comme les concentrations de phosphates disponibles dans la colonne d'eau pour la croissance algale sont très faibles dans les lacs marneux, la communauté phytoplanctonique devrait être plutôt pauvre. En revanche, les macrophytes et le périphyton peuvent tirer profit d'une luminosité favorable et des concentrations plus élevées en phosphates dans les eaux interstitielles des sédiments pour croître. Une prolifération importante de macrophytes pourrait induire un cycle diurne / nocturne de variation du pH.

3. Stratégie recommandée pour mesurer les impacts de la coupe forestière sur les lacs marneux

Les impacts de la coupe forestière sur les lacs marneux peuvent être évalués de différentes façons, comportant chacune leurs avantages et inconvénients. Deux méthodes font ici l'objet de notre attention : (i) la méthode de la comparaison jumelée et (ii) la méthode d'échantillonnage ponctuel.

3.1 Méthode de comparaison jumelée

Cette méthode consiste à évaluer la physico-chimie de l'eau 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 (approche BACI – *Before-After Control-Impact* ; Duhaim et Pinel-Alloul 2005). Une telle étude doit s'échelonner sur une période d'au moins deux ans et nécessite une préparation logistique importante. Un minimum de six lacs comparables est requis. Le choix doit être fait rigoureusement pour ensuite être soumis, pour la moitié d'entre eux, à la récolte forestière sur une proportion importante de leur bassin versant ou à tout le moins représentative des activités et normes de récolte forestière en vigueur. Cette méthode permet l'acquisition de données très fiables et rigoureuses. Des réponses claires par rapport à l'hypothèse émise pourraient en être tirées.

3.1.1 Paramètres d'identification des sites

La sélection des lacs à échantillonner est d'une importance capitale. Leur superficie, leur profondeur, leurs caractéristiques physico-chimiques ainsi que l'étendue et les caractéristiques physiques (pente, dépôts meubles et socles rocheux, type forestier) de leur bassin versant sont toutes des caractéristiques primordiales à leur sélection. L'absence de coupes forestières récentes ainsi que l'accessibilité seront aussi des critères à prendre en considération. Les lacs les plus similaires seront jumelés entre eux afin de limiter au maximum les variations de réponse hydrologique. La sélection 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.

3.1.2 Durée du suivi

Les caractéristiques physico-chimiques des lacs sélectionnées devront être étudiées au cours d'une première année dite de « calibration ». Les données amassées à ce moment serviront à évaluer les différences naturelles survenant à l'intérieur de chaque paire de lacs. Ce type d'information ajoute une très grande précision aux comparaisons post-traitement qui suivront. Idéalement, les traitements de récolte forestière devraient avoir lieu au cours de l'automne ou de l'hiver suivant la saison de calibration.

Suite à la récolte, une seconde année d'échantillonnage devra avoir lieu. Les données amassées seront alors comparées entre les sites jumelés, tout en tenant compte de la variation naturelle déterminée par les données de pré-traitement. Cette méthode décrit la situation minimale d'échantillonnage puisqu'une seule année de calibration et une seule année d'évaluation post-traitement sont des minimums absolus. Afin de se prémunir des probables fluctuations climatiques annuelles (Jalal et al. 2005), deux années de calibration et trois années d'évaluation post-traitement seraient hautement souhaitables. La durée totale du suivi serait donc de cinq ans.

3.1.3 Mesures sur le bassin versant

Il sera nécessaire de décrire les caractéristiques physiques du bassin versant de chaque lac. L'information contenue sur les cartes écoforestières du MRNF devrait répondre aux besoins de l'étude.

La superficie du bassin versant à récolter devra être fixée d'après certains critères préalablement documentés pour des environnements similaires et d'après les connaissances, préoccupations et intérêts de divers intervenants du milieu. Il est néanmoins pertinent de favoriser des travaux d'une envergure comparable aux situations réelles qui prévalent dans la région. Il est aussi préférable d'effectuer des travaux suffisamment importants qui seront susceptibles de réellement affecter les conditions physico-chimiques des lacs à l'étude.

Afin de documenter les impacts de la coupe sur le bilan hydrologique, il serait nécessaire de mesurer en continu les précipitations, les débits des affluents, le niveau des nappes avoisinantes (la piézométrie), les niveaux des lacs, et les débits à l'exutoire des lacs à l'étude, et ce, dès le tout début de la période de calibration. L'ampleur de l'évapotranspiration avant et après le retrait du couvert forestier pourra ainsi être estimée. Des données climatiques régionales sont d'ailleurs facilement disponibles via les Archives climatiques (http://climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate_normals/) d'Environnement Canada.

3.1.4 Mesures sur les lacs

Plusieurs mesures pertinentes sont suggérées :

- (i) **pH** : le pH peut être mesuré en surface mais en s'abstenant de le prendre trop près de la rive. Arbitrairement, il pourrait être déterminé au centre approximatif de chaque lac ou en son point le plus profond si un profil vertical est établi.
- (ii) **Turbidité** : Ce paramètre permettrait d'estimer s'il y a un changement notable dans la formation de marne. Au minimum, la turbidité peut être qualitativement évaluée simplement par un disque de Secchi. Ce type de mesure est toutefois relatif à celui qui réalise la mesure et de nombreux paramètres peuvent introduire un biais (ex. : heure du jour, condition de luminosité, reflets à la surface, etc...). De façon plus quantitative elle peut être mesurée à l'aide d'un turbidimètre.

- (iii) **Oxygène dissous** : L'établissement de profils d'oxygène dissous seraient souhaitables afin d'identifier les différences entre l'épilimnion et l'hypolimnion.
- (iv) **Température** : Comme l'oxygène dissous, la température peut nous renseigner sur l'état de la stratification du lac, mais cette donnée pourrait aussi être utile au niveau biologique.
- (v) **Cations et anions majeurs dissous** : Les concentrations en ions, plus particulièrement en Ca dissous (donc après filtration sur membrane de porosité 0,45 µm), permettront de vérifier l'état de (sur)saturation de la colonne d'eau par rapport à la calcite. Trois échantillons en surface (épilimnion) et en profondeur (hypolimnion) seront suffisants mais devraient être filtrés sur-le-champ afin d'éviter que le calcium précipite entre le moment de la récolte et de la filtration. Un volume identique d'eau déminéralisée devra être filtré également sur le terrain afin d'estimer le niveau de base lié à la contamination par la manipulation.

Les paramètres (i) à (iv) s'obtiennent de façon efficace à l'aide d'une sonde multiparamétrique avec acquisition de données en temps réel. Une telle sonde a l'avantage de permettre 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).

Il serait nettement préférable de répéter ces mesures trois fois à chaque été pendant les cinq années (entre la mi-juillet et la mi-septembre, période pendant laquelle les lacs seront stratifiés) afin de documenter la variabilité ou la stabilité des données au cours d'une même saison et d'éviter de tirer des conclusions sur une anomalie ponctuelle.

3.2 Méthode d'échantillonnage ponctuel

Cette méthode vise à acquérir des données physico-chimiques sur un grand nombre de lacs au cours d'une courte période et à tenter d'établir des relations entre les résultats obtenus et les caractéristiques physiographiques ponctuelles de l'environnement d'où ils proviennent. L'échantillonnage des lacs devra être effectué de façon à obtenir la plus grande diversité possible de situations d'aires équivalentes de coupe ou de proportions du bassin versant récemment récoltées. Le cas échéant, il sera peut-être possible de déterminer si les propriétés physico-chimiques de l'eau sont affectées par la récolte forestière. Un échantillonnage complémentaire de l'eau souterraine, à l'aide de piézomètres, pourrait permettre d'étayer les résultats obtenus sur la physico-chimie des lacs.

Cette méthode a l'avantage d'être rapide d'exécution, mais comporte une plus grande incertitude quant à la possibilité d'obtenir des résultats concluants. Dans la situation où l'échantillonnage des lacs ne permet pas d'obtenir suffisamment d'information sur l'ensemble des situations possibles, les résultats pourraient ne pas démontrer de différence significative et tous les efforts déployés auraient été vains. Toutefois, une telle étude pourrait avoir beaucoup plus de poids si elle pouvait être appuyée par les résultats d'une

étude de bassins jumelés. De plus, cette approche pourrait être préalable à la sélection des sites pour la comparaison jumelée.

3.2.1 Paramètres d'identification des sites

L'échantillonnage physico-chimique d'un très grand nombre de lacs devrait être effectué sur un court laps de temps (si possible à l'intérieur d'un mois entre la mi-juillet et la mi-septembre, période pendant laquelle les lacs seront stratifiés). En général, un nombre de 30 échantillons s'avère un minimum souhaitable afin d'atteindre une certaine précision statistique lors de régressions linéaires mais il est possible que le nombre limité de lacs dans la réserve faunique des Chic-Chocs nous impose une contrainte importante à cette approche. Tel que formulé plus tôt, les lacs sélectionnés devront présenter des situations différentes au niveau de la distribution des aires de coupes dans leur bassin versant.

3.2.2 Mesures sur le bassin versant

L'information contenue sur les cartes écoforestières du MRNF devrait répondre aux besoins de l'étude. Elles permettront la détermination de différents critères géophysiques pouvant influencer la qualité de l'eau des lacs.

L'échantillonnage de l'eau souterraine devrait être effectué au même moment que l'échantillonnage des lacs. Un réseau de piézomètres pourrait être rapidement et facilement installé sur certains sites particuliers. Deux ou trois piézomètres pourraient être installés dans des sites dominés par la forêt mature et autant pourraient être installés dans des sites récemment récoltés. Les différents types de sols devraient aussi être échantillonnés (tills, alluvions).

En mesurant les concentrations de cations majeurs, principalement le calcium, dans les eaux souterraines, il sera possible de faire un bilan sommaire du calcium au niveau du bassin versant. De plus, en présumant que cette eau est à l'équilibre avec la calcite, il sera possible d'estimer la pression partielle de CO₂ de l'eau souterraine qui entre dans le lac par résurgence. Cette caractérisation de l'eau souterraine sera utile, entre autres, pour simuler les impacts d'une modification de la proportion des apports en eau de surface et en eau souterraine.

3.2.3 Mesures sur les lacs

Dans cette approche, chaque lac peut être échantillonné en une seule occasion, en prenant soin d'éviter les périodes de précipitations abondantes. Au minimum, celles-ci devraient être documentées. Des données climatiques régionales sont d'ailleurs facilement disponibles via les Archives climatiques nationales d'Environnement Canada (http://climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate_normals/).

Les principaux paramètres à mesurer sont identifiés à la section 3.1.1.4.

3.2.4 Traitement des données

Les observations réalisées sur le terrain pourraient également être appuyées par des simulations de mélange entre les eaux souterraines et celles de surface en fonction de scénarios établis selon l'ampleur de l'évapotranspiration déterminée pour chaque lac sélectionné. Une fois que les caractéristiques physico-chimiques des lacs et des eaux souterraines sont connues, il sera possible d'estimer le pH résultant de ces mélanges. De nombreux modèles d'équilibres chimiques peuvent être utilisés à cette fin (ex. : le modèle PHREEQC http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqc/index.html) du *U.S. Geological Survey*.

4. Conclusions et recommandations

4.1 Conclusions

Les principaux intervenants impliqués dans la gestion intégrée du territoire forestier du centre de la Gaspésie en sont venus à se questionner sur les possibles impacts de la récolte forestière sur la physico-chimie de l'eau des lacs s'y trouvant. La littérature scientifique disponible sur le sujet est peu abondante et provient de travaux réalisés sur le bassin expérimental de Hubbard Brook ou encore sur le bouclier Canadien où les connaissances sont plus avancées mais certes toujours en développement. Les conclusions tirées de ces travaux sont particulièrement difficiles à transposer au contexte géologique particulier des Chic-Chocs. Si la qualité de l'eau des lacs marneux (plutôt basiques à cause des caractéristiques physico-chimiques de l'eau souterraine les alimentant) est susceptible d'être affectée par la modification du bilan hydrologique résultant de la récolte forestière, ni la nature, ni l'envergure des changements pouvant s'y produire ne peuvent être estimées sans une étude limnologique approfondie.

Dans ce rapport, deux méthodes d'échantillonnage complémentaires ont été décrites. Elles ont pour objectif de déterminer les effets de la récolte forestière sur la physico-chimie des lacs marneux de la réserve faunique des Chic-Chocs. La première décrit une méthode de comparaison jumelée où l'eau provenant de trois paires de lacs judicieusement sélectionnés sera échantillonnée avant et après l'exécution d'une récolte forestière sur une partie de leur bassin versant. La deuxième décrit une méthode d'échantillonnage ponctuel où un plus grand nombre de lacs, illustrant diverses intensités d'aménagement forestier, seront soumis à une prise de données ponctuelle visant à les comparer entre eux. Ces deux méthodes devraient tirer avantage de leur réalisation conjointe et devraient répondre aux principales préoccupations des intervenants du milieu.

4.2 Autres avenues à explorer

4.2.1 Reconstitution des conditions passées

4.2.1.1 Relation succès de pêche et récolte forestière (données historiques)

Il serait opportun de coupler les données de succès de pêche avec celles des récoltes forestières pour chaque lac / bassin versant afin de vérifier si la coïncidence des événements (récolte forestière suivie d'une baisse du succès de pêche) s'est produite dans le passé pour une multitude de lacs ou si, au contraire, il s'agit d'un cas unique.

4.2.1.2 Chronologie sédimentaire et outils isotopiques

Les lacs marneux sont très prisés par les sédimentologues en raison de leurs hauts taux de sédimentation et du laminage des sédiments (sédiments varvés) que provoquent parfois le cycle annuel de ces lacs, permettant d'identifier facilement des changements interannuels (Francus, 2004). Les conditions favorisant le laminage des sédiments incluent : un faible apport en eau par ruissellement et écoulement de surface, un grand taux de sédimentation, une faible activité benthique (larves d'insectes pouvant « perturber » les sédiments), une grande profondeur et / ou une bonne protection contre le brassage éolien (ex. : lac entouré de collines). L'identification d'un lac dont les sédiments sont varvés représenterait un outil puissant pour évaluer les impacts des coupes forestières passées et futures.

Une autre avenue intéressante est celle utilisant les rapports isotopiques de l'oxygène et du carbone. Les différentes signatures isotopiques en oxygène ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ou $\delta^{18}\text{O}$) et en carbone ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ou $\delta^{13}\text{C}$) peuvent nous renseigner sur des modifications dans les apports par précipitations, ces dernières étant enrichies en ^{18}O (Drummond et al. 1995 ; Pentecost et al. 2000 ; Nuñez et al. 2002).

4.2.2 Examen des données disponibles ailleurs dans le monde

Il est fort possible que des données d'intérêt soient disponibles dans la littérature « grise » à travers le monde. Par exemple, l'Irlande du Nord est en voie de développer un programme de suivi de ses lacs marneux (http://www.ehsni.gov.uk/pubs/publications/marllakes_pdf.pdf). L'échange d'information avec les responsables de ce programme pourrait s'avérer fort utile pour le MRNF.

4.2.3 Autres hypothèses à envisager

4.2.3.1 Effets indirects de la récolte forestière

Les routes qui sillonnent le territoire peuvent également contribuer à diminuer les apports par ruissellement (cette hypothèse a notamment été évoquée pour le lac Joffre (Côté et Fortin 2003)). Un tel « détournement » contribuerait à augmenter l'apport relatif en eaux souterraines vers le lac mais ne devrait pas être attribué à la récolte forestière.

4.2.3.2 Effets indirects de la formation de marne sur la reproduction de l'omble fontaine

Il est possible qu'un apport relatif plus important en eaux souterraines génère une plus grande quantité de marne sans toutefois avoir un impact significatif sur le pH d'équilibre du lac. Néanmoins, l'impact de la sédimentation de marne sur les frayères devrait faire l'objet d'un examen préalable.

5. Bibliographie

- Ambroise, B. 1998. Genèse des débits dans les petits versants ruraux en milieu tempéré : processus et facteurs. *Revue des Sciences de l'Eau*, 11 : 471-495.
- Brown, B.E.; Fassbender, J.L., et Winkler, R. 1992. Carbonate production and sediment transport in a marl lake of southeastern Wisconsin. *Limnology and Oceanography*. 37 : 184-191.
- Côté, M. et 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., et Walker, J.C.G. 1995. Climatic forcing of carbon-oxygen isotopic covariance in temperate-region marl lakes. *Geology*. 23 : 1031-1034.
- Duhaime, L. et 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.
- Francus, P. 2004. *Image Analysis, Sediments and Paleoenvironments*. Springer, New York. 330p.
- Guitard, A. et 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.
- Jalal, W., Pinel-Alloul, B. et Méthot, G. 2005. Suivi à moyen terme des impacts écologiques des feux et des coupes forestières sur la communauté zooplanctonique des lacs de l'écozone boréale. *Revue des Sciences de l'Eau*. 18 (hors-série) : 221-248.
- Langevin, R. et 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. 5p.
- Lavigne, M.-P., A.N. Rousseau, R. Turcotte, A.-M. Laroche et J.-P. Villeneuve. 2004. Validation and use of a distributed hydrological modeling system to predict short term effects of clear cutting on the hydrological regime of a watershed. *Earth Interactions* 8:1-19
- Likens, G.E. et Bormann, F.H. 1995. *Biogeochemistry of a Forested Ecosystem*. 2e édition. Springer-Verlag, New York. 159p.

- House, W.A. et Donaldson, L. 1986. Adsorption and coprecipitation of phosphate on calcite. *Journal of Colloid and Interface Science* 112 : 309-324.
- Nuñez, R., Spiro, B., Pentecost, A., Kim, A. et Coletta, P. 2002. Organo-geochemical and stable isotope indicators of environmental change in a marl lake, Malham Tarn, North Yorkshire, UK. *Journal of Paleolimnology*. 28 : 403-417.
- OIFQ. 1996. Manuel de foresterie. Les presses de l'Université Laval. Québec. 1428 p.
- Otsuki, A., et 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. et 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. et 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. pp. 369-393.
- Robitaille A. et Saucier J.-P. 1998. Paysages régionaux du Québec méridional. Les publications du Québec. Gouvernement du Québec. 213p.
- 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. 76p.
- Stumm, W. et Morgan, J.J. 1996. *Aquatic Chemistry – Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*. 3^e édition. John Wiley and Sons. New York. 1022p.
- Tremblay, Y., Rousseau, A.N., Plamondon, A.P., Lévesque, D. and Jutras, S. Effects of clearcutting 50% of basin area on peakflows in boreal forest, Forêt Montmorency, Québec. *Journal of Hydrology*, en préparation.
- Wetzel, R.G. 2001. *Limnology – Lake and River Ecosystems*. 3^e édition. Academic Press. New York. 1006p.
- Wilson, C.V. 1971. *Le climat du Québec*. Atlas climatique, Service météorologique du Canada, Étude climatologique 11. Ottawa, Canada. 44p.