



ÉTUDE DIAGNOSTIQUE DU LAC DES RAPIDES

SYNTHÈSE

Mars 2015

Par :

Mathieu Morin
Aurélie Le Hénaff

Sommaire

SOMMAIRE.....	I
LISTE DES FIGURES.....	III
LISTE DES TABLEAUX.....	III
INTRODUCTION	4
1 DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE.....	6
2 MÉTHODOLOGIE.....	8
2.1 Localisation des stations	8
2.2 Échantillonnage.....	11
3 RÉSULTATS.....	14
3.1 Caractérisation du lac.....	14
3.1.1 Fonctionnement du lac	14
3.1.1.1 Température.....	14
3.1.1.2 Oxygène dissous	16
3.1.1.3 pH	17
3.1.1.4 Conductivité	18
3.1.2 Évaluation de l'état trophique du lac.....	19
3.1.2.1 Nutriments	20
3.1.2.1.1 Phosphore.....	21
3.1.2.1.2 Azote.....	23
3.1.2.2 Carbone organique dissous	24
3.1.2.3 Productivité primaire (chlorophylle a)	24
3.1.2.4 Détermination de l'état trophique du lac des Rapides	25
3.1.3 Teneurs en métaux et hydrocarbures.....	26
3.1.3.1 Définitions et sources.....	26
3.1.3.1.1 Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	26

3.1.3.1.2	Hydrocarbures pétroliers.....	27
3.1.3.1.3	Éléments métalliques	27
3.1.3.2	Dans les sédiments	28
3.1.3.2.1	Critères de qualité	28
3.1.3.2.2	Teneurs en HAP	29
3.1.3.2.3	Teneurs en hydrocarbures pétroliers	30
3.1.3.2.4	Teneurs en éléments métalliques.....	30
3.1.3.2.5	Classement des sédiments	32
3.1.3.3	Dans l'eau	33
3.1.3.3.1	Critères de qualité	33
3.1.3.3.2	Teneurs en HAP	33
3.1.3.3.3	Teneurs en hydrocarbures pétroliers	34
3.1.3.3.4	Teneurs en éléments métalliques.....	34
3.1.3.3.5	Contaminations dans l'eau du lac des Rapides.....	35
3.2	Caractérisation des tributaires	36
3.2.1	Physico-chimie	36
3.2.2	Nutriments et COD.....	36
3.3	Caractérisation des sols.....	37
3.3.1	Types de sols	37
3.3.2	Critères de qualité.....	38
3.3.3	Teneurs en HAP.....	38
3.3.4	Teneurs en hydrocarbures pétroliers.....	38
3.3.5	Teneurs en éléments métalliques	38
4	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	40
	RÉFÉRENCES	44
	BIBLIOGRAPHIE DE L'ÉTUDE COMPLÈTE.....	47

Liste des figures

Figure 1 : Schéma d'un bassin versant	6
Figure 2 : Localisation des stations d'échantillonnage	10
Figure 3 : Cycle thermique d'un lac tempéré profond (Bourbonnais, 2010).....	15
Figure 4 : Principales sources naturelles et humaines d'azote et de phosphore en lac	21
Figure 5 : Classement du lac des Rapides selon les classes de niveaux trophiques associées au phosphore et à la chlorophylle <i>a</i>	25
Figure 6 : Représentation d'un HAP (à deux cycles)	26

Liste des tableaux

Tableau 1 Description des paramètres mesurés sur le site et analysés en laboratoire	11
Tableau 2 : Nombre de campagnes d'échantillonnage réalisées par compartiment d'étude et paramètres considérés	13
Tableau 3 : Concentrations de phosphore correspondant aux différentes classes trophiques (MDDELCC, 2002a).....	22
Tableau 4 : Concentrations de chlorophylle <i>a</i> correspondant aux différentes classes trophiques (MDDELCC, 2002a).....	25

Introduction

Le site principal de prélèvement pour la production d'eau potable de la Ville de Sept-Îles est situé dans le lac des Rapides, localisé à une dizaine de kilomètres au nord-ouest de la ville. Le réseau d'alimentation en eau potable dessert presque toute la population.

Le lac des Rapides est soumis à une pression grandissante en raison de l'essor économique de la région et du développement urbain, industriel et récréotouristique à proximité du lac. À quelques kilomètres du site, des carrières sont exploitées et un important projet minier est à l'étude. Un port privé d'hydravions est également présent sur le lac. Les usages du lac sont multiples et en augmentation, tels que des usages récréatifs (activités d'un centre de plein air et la navigation de bateaux à moteur).

Soucieuse de maintenir la qualité de son approvisionnement en eau potable, la ville de Sept-Îles souhaite acquérir plus de données sur le lac afin de mieux comprendre son fonctionnement et son état global. La ville souhaite aussi se conformer aux exigences environnementales du ministère de l'environnement (MDDEP, 2012; MDDELCC, 2014).

Dans ce cadre, l'OBV Duplessis et la Ville de Sept-Îles ont conclu une entente pour la réalisation d'une étude diagnostique du lac des Rapides. L'offre de service vise la récolte de données sur une année complète, avec une campagne d'échantillonnage par saison. Ce plan de suivi permettra d'observer l'évolution des différents paramètres du lac au cours d'une année entière, en plus d'établir une base de données des paramètres de qualité de l'eau du lac des Rapides.

Dans le cadre de cette étude, le lac des Rapides (eau et sédiments au fond du lac) ont été suivis ainsi que trois des principaux cours d'eau qui l'alimentent. Les sols à proximité ont également été analysés. Plusieurs paramètres de l'eau du lac et des cours d'eau ont été mesurés pour déterminer leur qualité et leur acidité. Le niveau de contamination en métaux et hydrocarbures de l'eau du lac, des sédiments et des sols a aussi été vérifié.

Le rapport présenté ici est structuré en quatre parties. Après un bref résumé des caractéristiques du lac des Rapides et de son bassin versant, la deuxième partie présente la méthodologie d'échantillonnage suivie et les paramètres analysés. Les résultats et leur interprétation constituent la troisième partie, tandis que la dernière concerne les conclusions générales de l'étude et les recommandations quant au suivi du lac des Rapides.

1 Description du site d'étude

Le lac des Rapides est situé à une dizaine de kilomètres au nord-ouest de la ville de Sept-Îles. Sa forme est irrégulière et il compte plusieurs baies : la baie des Crans, où se trouve le site de prélèvement d'eau potable, la baie Duclos, la baie Cachée et la baie Ross. Le lac couvre une surface de 7,8 kilomètres carrés, soit l'équivalent de plus de 1 540 terrains de football.

L'eau qui alimente un lac provient de son **bassin versant** et parvient au lac *via* les cours d'eau qui se déversent dans celui-ci, qui sont appelés les **tributaires** du lac. L'eau des précipitations qui n'est pas absorbée par le sol ou captée par la végétation parvient également au lac par **ruissellement**. Les cours d'eau par lesquels un lac se vide sont pour leur part appelés **émissaires**.

Le bassin versant est un territoire à l'intérieur duquel toute l'eau tombée au sol converge vers le même cours d'eau (Figure 1). Ainsi, la dynamique d'un cours d'eau est influencée non seulement par les événements et activités qui le touchent directement, mais également par tous ceux qui se produisent à l'intérieur de son bassin versant.

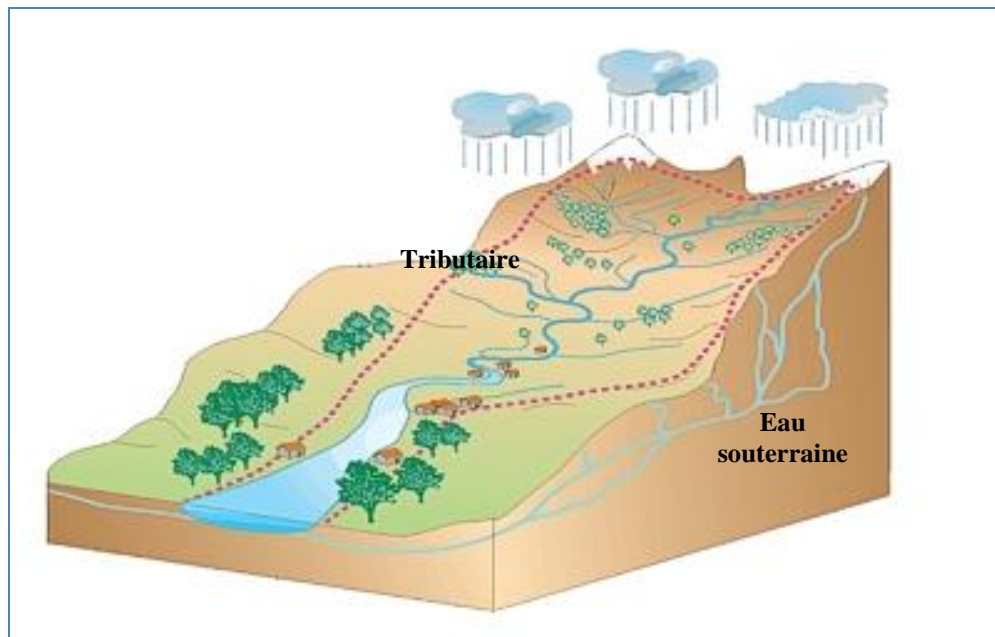


Figure 1 : Schéma d'un bassin versant

Le bassin versant du lac des Rapides s'étend sur 550 km², soit plus de 2 fois la superficie de l'Île d'Orléans. La rivière des Rapides est le principal tributaire du lac. Elle le rejoint dans son secteur nord-est. Le lac se déverse dans la continuité de la rivière des Rapides (son émissaire), qui se poursuit jusqu'au fleuve Saint-Laurent vers le sud.

Le lac des Rapides contient plus de 175 000 000 m³ d'eau, assez pour remplir plus de 46 000 piscines olympiques. Le lac des Rapides est profond, avec quelques fosses de plus de 60 m et une profondeur maximale de 100 m. Sa profondeur moyenne se situe entre 20 et 40 m et il présente une zone peu profonde vers son centre.

Les roches du bassin versant sont principalement d'origine magmatique, c'est-à-dire qu'elles ont été formées par le durcissement du magma à la surface de la terre. Ce bassin versant appartient à une région reconnue pour ses importantes ressources minérales. Le fer, l'ilménite, de même que l'apatite dans certaines couches de roche, figurent parmi les minerais les plus abondants de la région.

La forêt dans le bassin versant du lac des Rapides est dominée par l'épinette noire. Le sapin baumier est une autre espèce présente en abondance. Certaines espèces de feuillus, comme le bouleau blanc, le peuplier faux-tremble et le peuplier baumier sont également présentes. Au sol, c'est la mousse qui domine la végétation.

Le lac des Rapides et son bassin versant remplissent plusieurs fonctions pour la population. L'eau potable de la grande majorité des habitants de la ville de Sept-Îles (environ 25 000 citoyens) est prélevée dans le lac des Rapides. Le territoire du bassin versant est aussi très utilisé, notamment pour une variété d'activités récréatives. Un centre de plein air est aménagé en bordure du lac et propose des activités comme la baignade ou le nautisme. Des sentiers de randonnée pédestre sont aménagés autour du lac. L'hiver, il est aussi possible d'y pratiquer le ski de fond ou la raquette. On retrouve également des résidences secondaires, majoritairement présentes sur les rives du lac dans la baie Duclos. Sur le plan économique, le lac des Rapides accueille 2 entreprises offrant le transport en hydravions vers d'autres lacs et des pourvoiries des territoires avoisinants. Des carrières et sablières sont aussi exploitées au sud du bassin versant. Enfin, un important projet minier est envisagé à proximité du bassin versant du lac des Rapides.

2 Méthodologie

2.1 Localisation des stations

Des campagnes d'échantillonnage ont été réalisées sur une année complète, avec une campagne par saison : été 2013, automne 2013, hiver 2014, printemps 2014. Les échantillons ont été prélevés dans le lac (dans l'eau et les sédiments au fond du lac), dans l'eau des principaux tributaires du lac et dans les sols autour du lac, aux stations suivantes :

- 6 stations de qualité de l'eau du lac, E1 à E6. Trois stations ont été rajoutés pour les deux dernières campagnes (hiver et printemps 2014), E1 à E9¹ ;
- 6 stations de qualité des sédiments au fond du lac, Sed1 à Sed6, qui correspondent aux stations E1 à E6 ;
- 3 stations de qualité de l'eau des tributaires, T1 à T3 ; et
- 6 stations de qualité du sol autour du lac, Sol1 à Sol6.

La Figure 2 présente la localisation des stations. Les stations d'échantillonnage de qualité de l'eau et des sédiments du lac ont été réparties sur l'ensemble du lac de façon à voir s'il y a des variations entre les différentes parties du lac. Sur les 9 stations, 4 sont localisées dans les baies : E1 dans la baie Duclos (où l'on retrouve la base d'hydravions), E2 dans la baie de la plage publique, E3 dans la baie Ross et E6 dans la baie des Crans (où se situe le site de prélèvement de l'eau potable de la Ville de Sept-Îles). La station E4 se trouve dans la partie nord du lac, à proximité de l'arrivée de la rivière des Rapides et la station E5 a été placée au centre du lac. Les trois stations supplémentaires ajoutées pour les deux dernières campagnes de mesures, E7, E8 et E9 sont localisées respectivement entre les stations E5 et E4, E5 et E6 et E5 et E2.

¹ Lors de la première campagne d'échantillonnage (été 2013), les concentrations de certains contaminants (éléments métalliques et hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)) dépassaient certains critères de qualité des sédiments. Nous avons alors décidé de procéder à l'analyse de ces mêmes paramètres dans l'eau du lac lors des deux dernières campagnes en ajoutant 3 stations de qualité de l'eau et de renouveler l'analyse des sédiments lors de la dernière campagne.

Les stations de qualité de l'eau des tributaires sont localisées sur les trois tributaires les plus importants du lac. La station T1 se situe à l'est du lac et correspond à la déverse du lac Sans Nom. La station T2 est localisée au nord-est, sur la rivière des Rapides. La station T3 correspond à la rivière Championne qui se jette dans le lac *via* la baie cachée et est située dans la partie ouest du lac.

Les stations de sol sont localisées tout autour du lac, sur des sommets, des versants et des zones à pente faible, de façon à obtenir une bonne représentativité du relief et des types de sols en présence.

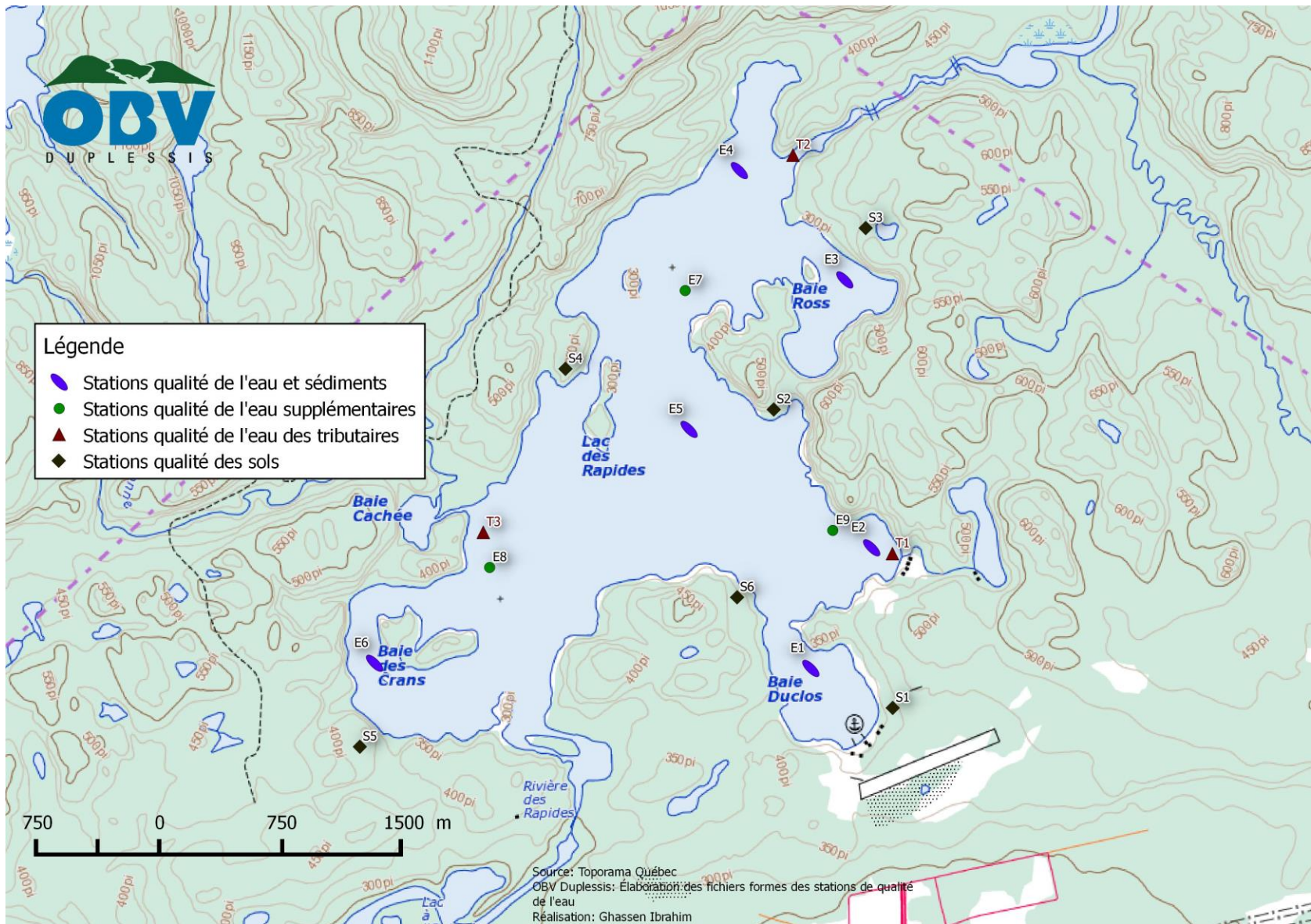


Figure 2 : Localisation des stations d'échantillonnage

2.2 Échantillonnage

Certains paramètres ont été mesurés directement sur place. Pour d'autres, des prélèvements ont été effectués, puis envoyés en laboratoire pour être analysés. Le Tableau 1 établit une liste des paramètres qui ont été pris en compte dans l'étude.

Tableau 1 : Description des paramètres mesurés sur le site et analysés en laboratoire

Paramètres	Description	Où ?
Mesures sur site		
Oxygène dissous	Nécessaire à la respiration des organismes aquatiques, il nous renseigne sur l'état de santé du lac.	Eau du lac Eau des tributaires
Température	La température a une influence sur les autres paramètres (oxygène dissous, conductivité, etc.). Mesurer la température sur toute la profondeur du lac indique si des couches de températures différentes se superposent.	Eau du lac Eau des tributaires
pH	La mesure du pH nous informe sur l'acidité des eaux.	Eau du lac Eau des tributaires
Conductivité	La conductivité représente un indicateur des substances dissoutes présentes dans l'eau.	Eau du lac Eau des tributaires
Analyses en laboratoire		
Phosphore total	Élément nutritif naturellement présent dans le sol et la matière organique du sol. Il peut également provenir des rejets des stations d'épuration, des rejets industriels, des activités de foresterie, etc.	Eau du lac Eau des tributaires Sédiments du lac Sols
Azote total	Autre éléments nutritif naturellement présent dans le sol et dans les précipitations. Tout comme le phosphore, on le retrouve également dans les rejets des stations d'épuration, les rejets industriels, suite à des activités de foresterie, etc.	Eau du lac Eau des tributaires
Carbone organique dissous (COD)	Il provient de la décomposition des molécules organiques végétales et animales. Il peut aussi provenir de	Eau du lac Eau des tributaires

	substances organiques émises par les effluents municipaux et industriels. C'est le COD qui donne une coloration brune ou ambrée à l'eau.	
Chlorophylle a	Pigment vert que l'on retrouve dans les plantes et les algues et qui leur permet d'effectuer la photosynthèse ² . Il représente une mesure de la quantité des algues dans l'eau.	Eau du lac
Hydrocarbures C₁₀-C₅₀	Contaminants présents dans des matières géologiques telles que le pétrole, le charbon, le bitume ou dérivés de ces matières.	Eau du lac Sédiments du lac Sols
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	Contaminants organiques provenant de sources naturelles (comme les feux de forêts) et également humaines : combustion de carburant automobile, combustion domestique (charbon, bois), production industrielle (aciérie, aluminerie), etc.	Eau du lac Sédiments du lac Sols
Éléments métalliques	Naturellement présents dans l'environnement, ils proviennent également de diverses sources humaines : procédés industriels, combustibles fossiles, transport, incinération de déchets, etc.	Eau du lac Sédiments du lac Sols
Matière organique	Matière fabriquée par des êtres vivants.	Sédiments du lac Sols

² La photosynthèse est un processus par lequel le végétal, en présence de lumière, fabrique de la matière organique. Ce phénomène absorbe du dioxyde de carbone (CO₂) et dégage de l'oxygène (O₂).

Le Tableau 2 récapitule le nombre de campagnes d'échantillonnage réalisées selon le compartiment (lac, tribulaire, sédiments et sol) ainsi que les paramètres pris en compte.

Tableau 2 : Nombre de campagnes d'échantillonnage réalisées par compartiment d'étude et paramètres considérés

Paramètres	Eau du lac		Tribulaires 3 stations (T1-T3)	Sédiments du lac 6 stations (Sed1-Sed6)	Sols 6 stations (Sol1-Sol6)
	6 stations (E1-E6)	3 stations (E7-E9)			
Mesures <i>in situ</i>					
Température	4	2	4		
Oxygène dissous	4	2	4		
pH	4	2	4		
Conductivité	4	2	4		
Analyses en laboratoire					
Granulométrie				1	1
Matière organique				1	1
Phosphore total	4	1	4	1	1
Azote total	4		4		
Carbone organique dissous	4		4		
Chlorophylle <i>a</i>	4				
HAP	2	2		2	1
Hydrocarbures C ₁₀ -C ₅₀	2	2		2	1
Éléments métalliques	2	2		2	1

3 Résultats

3.1 Caractérisation du lac

3.1.1 Fonctionnement du lac

La température, l'oxygène dissous, le pH et la conductivité (cf. Tableau 1) ont été mesurés à des intervalles réguliers de profondeur (tous les 3 m) dans les stations du lac E1 à E6, pendant les 4 saisons.

3.1.1.1 Température

Globalement, les 6 stations de qualité de l'eau suivent le même profil de température.

En été, on constate que la température se situe entre 20 et 25°C en surface et diminue depuis la surface vers le fond avec une diminution rapide entre les couches de 5 et 10 m. Il y a donc 3 couches d'eau distinctes superposées les unes aux autres, on parle de **stratification** :

- La couche superficielle du lac, entre 0 et 3-4 m : on l'appelle l'**épilimnion**, c'est la couche la plus chaude et qui reçoit le plus de lumière. En brassant cette couche, le vent fait en sorte que toute l'eau qu'elle contient est à la même température.
- la couche intermédiaire, le **métalimnion**, se caractérise par une transition de température rapide sur quelques mètres (appelé thermocline) et s'étend environ de 3-4 m à 8 m de profondeur.
- La couche inférieure, l'**hypolimnion**, est faiblement éclairée et sa température varie peu. Dans le lac des Rapides, elle débute à environ 8 m et se poursuit jusqu'au fond du lac.

À l'automne, la température est stable quelle que soit la profondeur et avoisine les 6°C. Il n'y a donc plus de couches distinctes. La baisse de la température de l'air refroidit l'eau du lac, jusqu'à atteindre 4°C. À cette température, la densité de l'eau est maximale. Les eaux plus denses vont donc descendre et laisser les eaux plus chaudes remonter vers la surface pour qu'elles y soient aussi refroidies au contact de l'air et ce, jusqu'à ce que l'ensemble de l'eau soit mélangé. On appelle cela le brassage automnal.

En hiver, la surface de l'eau du lac est gelée et donc proche de 0°C. La température de l'eau augmente légèrement en descendant vers le fond du lac, on distingue alors 2 couches : il y a ainsi une stratification thermique.

Au printemps, l'eau du lac se réchauffe. Lorsqu'elle atteint une température d'environ 4°C, sa densité est alors à son maximum. Tout comme à l'automne, les eaux plus denses vont descendre au fond du lac et se mélanger avec l'ensemble de l'eau : c'est le brassage printanier.

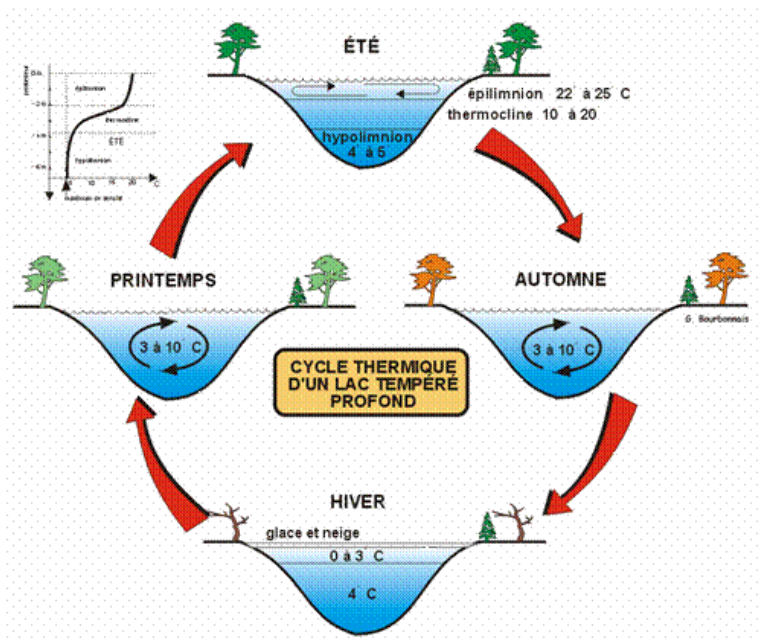


Figure 3 : Cycle thermique d'un lac tempéré profond (Bourbonnais, 2010)

Le lac des Rapides présente donc deux brassages, un à l'automne et l'autre au printemps, et deux périodes de stratification, une en saison chaude et l'autre en saison

froide. Les lacs présentant ces caractéristiques sont appelés lacs **dimictiques**, et sont typiques des régions tempérées à saisons contrastées, avec des hivers relativement froids (Hade, 2003), comme c'est le cas sur la Côte-Nord.

3.1.1.2 Oxygène dissous

L'oxygène dissous provient d'une part, de l'oxygène de l'air et d'autre part, de la photosynthèse des algues et des plantes aquatiques.

L'été, on retrouve des teneurs plus élevées proche de la surface (dans l'épilimnion). Cela s'explique par le fait que durant la journée, en été, la luminosité est plus élevée et donc le processus de photosynthèse, qui rejette de l'oxygène dans l'eau, est plus grand. Puis, dans le métalimnion, les concentrations en oxygène dissous diminuent légèrement. Cette diminution peut s'expliquer par une consommation d'oxygène par les bactéries lorsqu'elles décomposent la matière organique (fabriquée par les végétaux aquatiques par la photosynthèse). Enfin, dans la couche profonde (hypolimnion), les concentrations augmentent à nouveau.

En automne et au printemps, les concentrations sont stables dans l'ensemble de la colonne d'eau.

Durant l'hiver, les concentrations d'oxygène dissous baissent légèrement de la surface vers le fond sur l'ensemble de la colonne d'eau dans toutes les stations.

Le suivi de l'oxygène confirme que le lac des Rapides est dimictique. En effet, le fait que les teneurs en oxygène dissous soient relativement stables sur toute la colonne d'eau à l'automne et au printemps est dû aux brassages qui surviennent à ces moments dans le lac. Les brassages permettent de faire descendre les eaux de surface, riches en oxygène, au fond du lac et de faire remonter à la surface les eaux désoxygénées et riches en matières nutritives de l'hypolimnion, afin qu'elles soient réoxygénées en surface. Grâce à ces brassages, l'ensemble des eaux du lac bénéficie d'un renouvellement d'oxygène favorable à la vie des organismes.

Le ministère de l'environnement a établi des critères de qualité pour plusieurs paramètres de l'eau. Ces critères visent à préserver les lacs et à assurer le maintien des différents usages de l'eau (MDDEFP, 2013). Les valeurs d'oxygène dissous relevées dans le lac des Rapides respectent le critère de qualité pour l'usage *Protection de la vie aquatique*³ du Ministère de l'environnement, à l'exception de deux mesures qui ont été prises au fond du lac (station E1 en hiver et station E4 en été). Or, dans les eaux de l'hypolimnion (fond du lac), la concentration naturelle en oxygène dissous est parfois plus faible que les concentrations mentionnées en tant que critère de qualité de l'eau de surface (MDDEFP, 2013).

3.1.1.3 pH

Le pH mesure l'acidité d'un liquide : un liquide dont le pH est entre 0 et 7 est considéré comme acide ; un pH égal à 7 correspond à une solution neutre ; et un liquide dont le pH est entre 7 et 14 est considéré comme basique.



Figure 4 : Échelle de pH

À l'été, le pH du lac des Rapides se situe entre 4,7 et 5,4. Durant l'automne, les valeurs de pH sont stables sur toute la profondeur et les valeurs moyennes se situent entre 4,8 et 5,1. En hiver, les valeurs de pH montrent de légères variations selon la profondeur et varient entre 4,6 et 5,4. Enfin, au printemps, on observe des valeurs plus faibles de pH vers le fond du lac à chaque station et les valeurs de pH varient entre 3,9 et 5,0. Il est important de souligner que la valeur de pH de 3,9, observée au printemps, est anormalement basse.

³ La vie aquatique englobe ici les poissons, les invertébrés et les plantes aquatiques que l'on rencontre dans les eaux douces de surface.

En général, le pH des eaux naturelles se situe entre 6 et 9 (Hade, 2003), un lac étant considéré acide quand son pH est inférieur ou égal à 5,5. Entre 5,5 et 6, les lacs sont désignés comme de transition (Dupont, 2004). Ainsi, l'ensemble des résultats obtenus nous montre que les eaux du lac des Rapides sont acides, à l'échelle annuelle et sur toute la colonne d'eau.

Cette acidité des eaux du lac est liée à la nature du socle géologique et des sols de la région. En effet, des réactions chimiques peuvent survenir entre le sol et l'eau et neutraliser l'acidité de cette dernière. Cette propriété est appelée **capacité tampon**, et dépend de la composition du sol et du socle géologique. Dans la région, la capacité tampon des sols est faible.

Les valeurs de pH mesurées dans le lac des Rapides ne satisfont pas certains critères de qualité de l'eau de surface. En effet, les critères liés aux usages *Prévention de la contamination (eau et organismes aquatiques⁴)*, *Protection de la vie aquatique (effet aigu)* et *Protection de la vie aquatique (effet chronique⁵)* ne sont pas respectés.

De plus, des analyses statistiques sur des données recueillies de 1995 à 2013 indiquent que le pH du lac des Rapides a subi une légère diminution sur cette période. Les tests démontrent également que le pH du lac a diminué de manière plus prononcée de mars 2003 à avril 2003. Ceci est probablement dû à un apport acide massif *via* les eaux de la fonte des neiges.

3.1.1.4 Conductivité

Globalement, les valeurs de conductivité de l'eau du lac des Rapides sont faibles et liées à la géologie locale, à savoir des eaux à faibles teneurs en minéraux en raison des

⁴ Pour les eaux de surface où une prise d'eau potable est présente (comme c'est le cas du lac des Rapides), ce critère de prévention de la contamination est calculé de façon à protéger un individu qui consommerait pendant toute sa vie une eau contaminée à cette concentration et des organismes aquatiques qui ont bioaccumulé la substance à partir de cette même eau.

⁵ Le critère de vie aquatique effet chronique est la concentration la plus élevée d'une substance qui ne produira aucun effet néfaste sur les organismes aquatiques (et leur progéniture) lorsqu'ils y sont exposés quotidiennement pendant toute leur vie. Le critère de vie aquatique effet aigu est la concentration maximale d'une substance à laquelle les organismes aquatiques peuvent être exposés pour une courte période de temps sans être gravement touchés.

caractéristiques de la roche qui compose la grande région physiographique du Bouclier canadien.

3.1.2 Évaluation de l'état trophique du lac

L'**eutrophisation** est le processus de vieillissement naturel d'un lac. Le terme vient du grec « *eu* » (= bien) et « *trophê* » (= nourriture), et signifie bien nourri (Hade, 2003). Comme le mot l'indique, l'eutrophisation est caractérisée par un enrichissement progressif du lac en nutriments, essentiels à la croissance des algues et des plantes aquatiques (MDDELCC, 2002a). Il existe plusieurs nutriments, mais certains ne sont disponibles qu'en quantités limitées dans l'environnement. En eau douce, le phosphore est généralement le nutriment limitant qui freine la croissance végétale dans les lacs (Lévêque, 1996). Un apport accru de nutriments permet une croissance en surabondance des végétaux. Ceux-ci constituent une source de nourriture pour les poissons et autres organismes du lac, qui verront leurs populations s'accroître à leur tour. Cette production massive du lac a pour effet de faire diminuer grandement les concentrations d'oxygène dissous dans l'eau. Lorsque tous ces organismes meurent, ils sont décomposés par les microorganismes, qui consomment beaucoup d'oxygène au cours de ce processus. Cette situation peut provoquer la disparition de certaines espèces, notamment des poissons de la famille des salmonidés comme le touladi et l'omble de fontaine, et leur remplacement par d'autres espèces ayant une plus grande tolérance au manque d'oxygène. En plus de dégrader l'écosystème, l'eutrophisation entraîne une baisse de la qualité de l'eau (réduction de la transparence et mauvais goût en raison de la présence d'algues) (Hade, 2003). L'eutrophisation se produit naturellement, sur une très longue période de temps (des milliers d'années) mais elle peut également survenir de manière accélérée si diverses activités humaines dans le lac et son bassin versant entraînent l'apport de matières nutritives (MDDELCC, 2002a).

Lors du processus d'eutrophisation, un lac passe par différents stades, appelés **états trophiques**, ou **classes trophiques** :

- Au départ, le lac est pauvre en éléments nutritifs, la croissance des algues et des plantes aquatiques y est faible et l'eau contient de fortes teneurs en oxygène ; le lac est alors **oligotrophe**.
- Avec un enrichissement en nutriments, le lac passe ensuite à un état de transition, où l'abondance des végétaux augmente, la productivité du lac est moyenne et un certain déficit en oxygène commence à s'installer ; il s'agit de l'état **mésotrophe**.
- À la fin du processus, le lac est riche en matières nutritives, présente des déficits en oxygène et une productivité élevée, et contient une forte abondance d'algues et de plantes aquatiques ; il a alors atteint la classe **eutrophe**.

Il existe des sous-classes entre ces trois classes principales.

Afin de déterminer l'état trophique du lac des Rapides, certains paramètres ont été suivis. Il s'agit des teneurs en nutriments (phosphore et azote), de la concentration en carbone organique dissous ainsi que de la quantité de chlorophylle *a*, qui est un indice de la productivité végétale du lac.

3.1.2.1 Nutriments

Le phosphore et l'azote que l'on retrouve dans un lac peuvent provenir de plusieurs sources naturelles ou d'origine humaine. La Figure 5 présente les diverses sources.

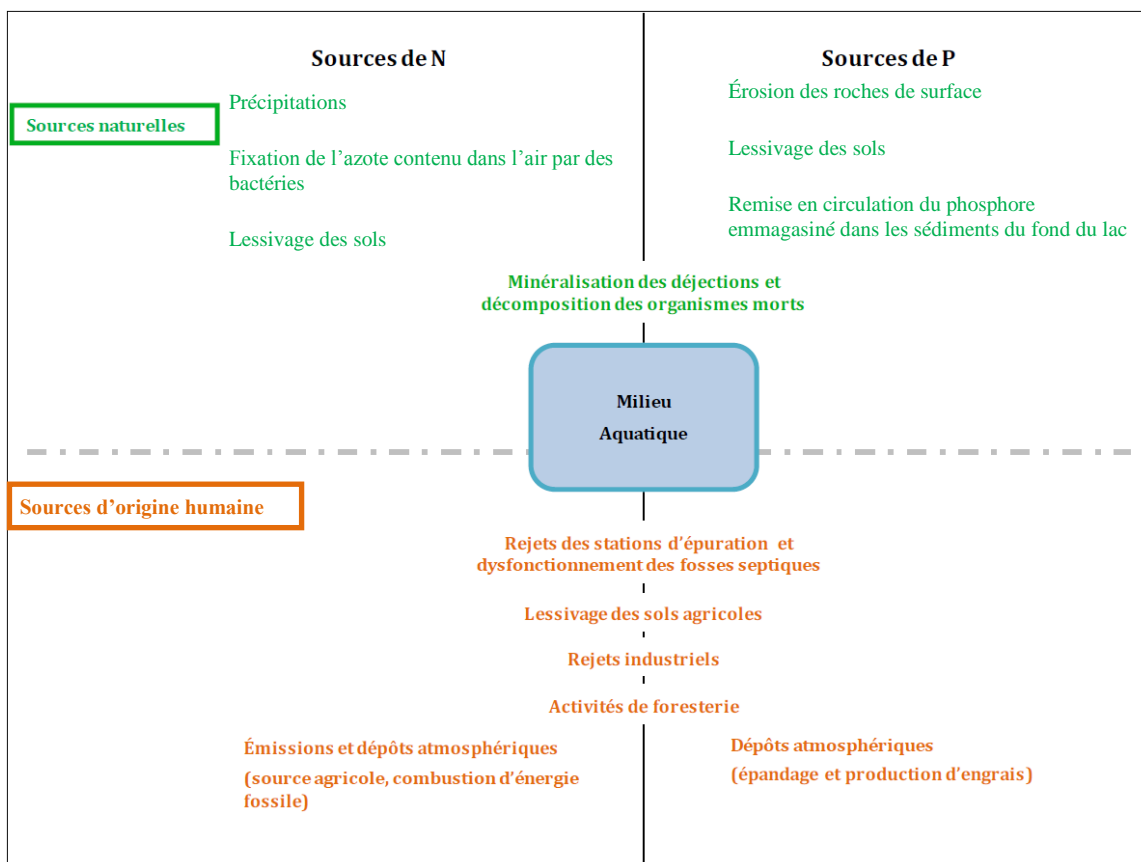


Figure 5 : Principales sources naturelles et humaines d'azote et de phosphore en lac

3.1.2.1.1 Phosphore

La concentration de phosphore dans l'eau est un des indicateurs utilisés par le ministère de l'environnement pour déterminer l'état de santé des lacs (MDDELCC, 2002a). Des intervalles de concentrations, déterminés par le ministère, correspondent aux diverses classes trophiques des lacs (Tableau 3).

Dans le lac des Rapides, les teneurs en phosphore les plus basses sont observées en été (entre 4,2 et 5,8 µg/l). À cette saison, les températures sont plus chaudes et les durées d'ensoleillement plus longues, ce qui stimule la croissance des végétaux aquatiques, et ainsi la consommation de phosphore par ces derniers.

Au printemps et à l'automne, les concentrations en phosphore sont plus élevées (entre 7,6 et 9,7 µg/l au printemps ; entre 6,0 et 7,2 µg/l à l'automne). En effet, les

brassages saisonniers du lac font remonter à la surface les nutriments du fond, d'où ces teneurs plus élevées.

Les concentrations de phosphore mesurées dans le lac des Rapides sont toutes comprises entre 4 et 10 µg/l, et le placent donc dans la classe **oligotrophe** (Tableau 3).

Tableau 3 : Concentrations de phosphore correspondant aux différentes classes trophiques (MDDELCC, 2002a)

Classes trophiques		Phosphore total (µg/l)
Classe principale	Classe secondaire (transition)	Moyenne
Ultra-oligotrophe		< 4
Oligotrophe		4 - 10
	Oligo-mésotrophe	7 - 13
Mésotrophe		10 - 30
	Méso-eutrophe	20 - 35
Eutrophe		30 - 100
Hyper-eutrophe		> 100

En plus d'être utilisé pour évaluer la classe trophique des lacs, le phosphore est un paramètre qui peut influencer les usages possibles de l'eau selon le ministère de l'environnement. Le taux de phosphore est en effet à considérer dans le cadre des usages *protection des activités récréatives et de l'esthétique*, de même que *protection de la vie aquatique* (Berryman, 2006; MDDEFP, 2013). Le ministère mentionne que, dans le but d'éviter l'eutrophisation, la concentration de phosphore d'un lac oligotrophe comme le lac des Rapides ne devrait pas augmenter de plus de 50 % par rapport à sa concentration naturelle (la concentration avant que des activités humaines ne soient réalisées sur le lac ou dans le bassin versant) sans dépasser les 10 µg/l.

Dans le cas du lac des Rapides, on ne connaît pas la concentration naturelle. Nous avons donc essayé de la définir à partir des données disponibles dans la Banque de

données sur la qualité du milieu aquatique (BQMA⁶). Pour cela, nous avons recherché dans cette banque de données, un lac ayant globalement les mêmes caractéristiques que le lac des Rapides et ne subissant pas (ou peu) l'influence d'activités humaines. Dans la zone côtière de la MRC de Sept-Rivières, on retrouve peu de lacs pour lesquels le paramètre phosphore a été analysé. C'est pourquoi nous avons sélectionné un lac situé dans la MRC de Minganie, localisé à plus de 80 km à l'est du lac des Rapides, sur la bande littorale. C'est le lac des Eudistes, isolé des activités anthropiques et situé sur la bande côtière comme le lac des Rapides. Il a été échantillonné trois fois, entre 1980 et 1983. La valeur moyenne de la concentration en phosphore total est de 6,05 µg/l.

Nous supposons, avec précaution, que la valeur moyenne du phosphore total dans le lac des Rapides, à la même époque, était similaire à celle du lac des Eudistes, où la géologie, les écosystèmes et le climat sont comparables.

Ainsi, selon le critère du ministère et en utilisant comme valeur de concentration naturelle 6,05 µg/l, les concentrations en phosphore au lac des Rapides ne devraient pas dépasser **9,07 µg/l⁷** afin de prévenir toute prolifération de végétaux aquatiques et tout symptôme d'eutrophisation du lac.

Les concentrations de phosphore mesurées dans le lac des rapides en 2013-2014 sont toutes en-dessous de la valeur référence de 9,07 µg/l. Le lac ne présente donc aucun signe d'eutrophisation en 2014 ; ceci a été validé visuellement, aucune prolifération de végétation aquatique n'ayant été observée dans le lac en 2014.

3.1.2.1.2 Azote

Les teneurs en azote total varient entre 0,20 et 0,28 mg/l sur l'ensemble des stations de qualité de l'eau du lac des Rapides. Les valeurs les plus faibles sont observées en été. Le ministère de l'environnement ne fixe pas de critère pour l'azote en lien avec le maintien des usages de l'eau (MDDEFP, 2013), mais mentionne qu'une concentration plus élevée que 1,0 mg/l dans les eaux de surface indique une **surfertilisation** (apport

⁶ Cette banque de données réunit toutes les données que le Ministère a recueillies sur les milieux aquatiques du Québec depuis 1979.

⁷ $6,05 + (50 \% \times 6,05) = 9,07 \mu\text{g/l}$

excessif de nutriments) dans le milieu (MDDELCC, 2002b). Les valeurs retrouvées dans le lac des Rapides sont bien inférieures à ce seuil d'indication.

3.1.2.2 Carbone organique dissous

Le carbone organique dissous (COD) provient de la décomposition par les bactéries des végétaux et des animaux morts. C'est le COD qui donne une coloration brune ou ambrée à l'eau. Puisque les bactéries consomment d'importantes quantités d'oxygène pour la décomposition, une forte concentration de COD peut entraîner une réduction de la concentration en oxygène dans les milieux aquatiques et affecter leur équilibre.

La valeur moyenne la plus faible en COD a été mesurée en été avec 8,4 mg/l et les valeurs plus élevées sont retrouvées en automne et en hiver, avec respectivement 12 et 12,6 mg/l. Cette évolution de la concentration en COD reflète la productivité du lac. En effet, à la suite de la croissance importante des végétaux et animaux aquatiques au cours de l'été, les processus de décomposition sont plus intenses en automne puis en hiver.

3.1.2.3 Productivité primaire (chlorophylle a)

La chlorophylle *a* est un pigment présent dans tous les organismes capables d'effectuer la photosynthèse. Les pigments photosynthétiques transforment l'énergie lumineuse du soleil en énergie chimique. La concentration de chlorophylle *a* nous renseigne sur la quantité d'algues présentes dans l'eau. Elle permet d'estimer la production végétale du lac (production primaire), et est l'un des facteurs utilisés par le ministère de l'environnement pour la détermination de la classe trophique d'un lac (MDDELCC, 2002a) (Tableau 4).

La concentration de chlorophylle *a* moyenne mesurée à l'été est de 0,83 µg/l. Elle est de 0,44 µg/l sur la période libre de glace (c'est-à-dire printemps, été et automne). Selon la classification du ministère, cela indique que le lac des Rapides correspond aux caractéristiques d'un lac **ultra-oligotrophe** (MDDELCC, 2002a) (Tableau 4).

Tableau 4 : Concentrations de chlorophylle a correspondant aux différentes classes trophiques (MDDELCC, 2002a)

Classes trophiques		Chlorophylle a (µg/l)
Classe principale	Classe secondaire (transition)	Moyenne
Ultra-oligotrophe		< 1
Oligotrophe		1 - 3
	Oligo-mésotrophe	2,5 - 3,5
Mésotrophe		3 - 8
	Méso-eutrophe	6,5 - 10
Eutrophe		8 - 25
Hyper-eutrophe		> 25

3.1.2.4 Détermination de l'état trophique du lac des Rapides

Tel que mentionné précédemment, le phosphore et la chlorophylle *a* sont utilisés par le ministère de l'environnement pour déterminer la classe trophique d'un lac. Les valeurs moyennes pour la période libre de glace, ou encore les valeurs estivales seules, peuvent être utilisées pour procéder à la classification (MDDELCC, 2002a). Dans les deux cas, ces valeurs placent le lac des Rapides parmi les lacs ultra-oligotrophes à oligotrophes selon les classes de niveau trophique des lacs établies par le ministère (Figure 6).

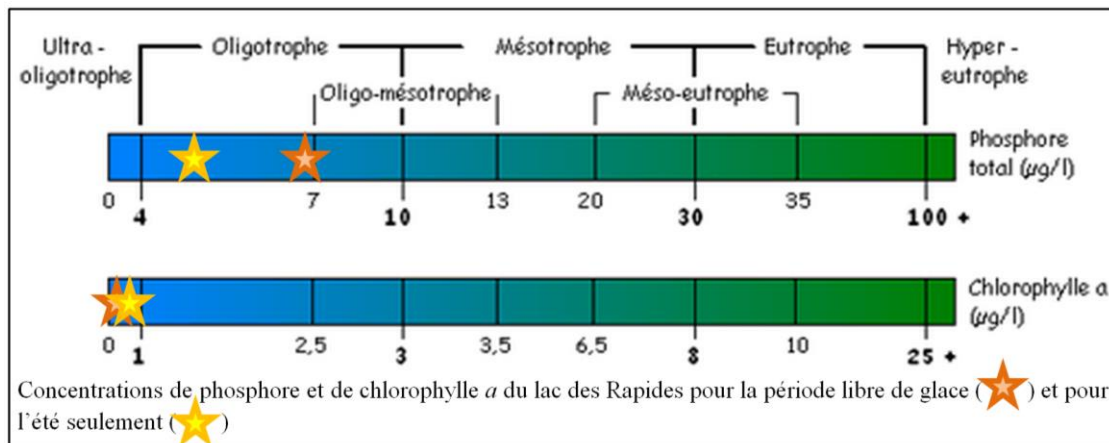


Figure 6 : Classement du lac des Rapides selon les classes de niveaux trophiques associées au phosphore et à la chlorophylle *a*

3.1.3 Teneurs en métaux et hydrocarbures

3.1.3.1 Définitions et sources

3.1.3.1.1 Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont des hydrocarbures⁸ dont les atomes de carbone sont disposés en anneaux fermés (Figure 7).

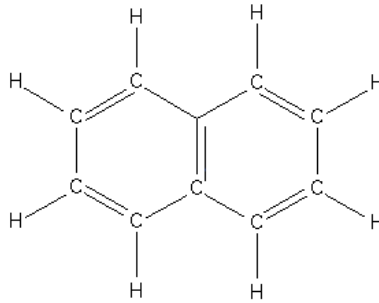


Figure 7 : Représentation d'une molécule de HAP (à deux cycles)

Les feux de forêt ainsi que les éruptions volcaniques sont des sources naturelles d'émission de HAP. Concernant les sources dues aux activités humaines, elles sont nombreuses et libèrent des HAP dans tous les milieux. Dans l'air, les plus importantes sources sont le chauffage au bois résidentiel et les alumineries. Il y a également les centrales thermiques, l'incinération des déchets, les moteurs à combustion interne et l'industrie pétrochimique. Les principales sources de rejets de HAP dans l'eau et le sol sont les produits traités à la créosote (traverses de chemin de fer, poteaux des lignes électriques, etc.), les déversements de produits pétroliers, les usines métallurgiques et les cokeries, ainsi que les retombées de HAP présents dans l'atmosphère (Environnement Canada, 2013).

Certains HAP sont reconnus comme cancérigènes chez l'humain (CEAEQ, 2011). Également, les organismes aquatiques peuvent subir des effets toxiques s'ils sont exposés

⁸ Un hydrocarbure est un composé organique, constitué exclusivement d'atomes de carbone (C) et d'hydrogène (H).

à des concentrations élevées de HAP dans les sédiments, l'eau douce ou le milieu marin (Environnement Canada, 2014).

3.1.3.1.2 Hydrocarbures pétroliers

Les hydrocarbures pétroliers sont les hydrocarbures provenant de la distillation du pétrole. Les produits pétroliers sont des mélanges complexes qui peuvent contenir des centaines d'hydrocarbures différents, tous dans des concentrations variables et dont plusieurs sont non identifiés (CEAEQ, 2013a, 2013b).

Les hydrocarbures pétroliers analysés dans notre étude sont les C₁₀-C₅₀, c'est-à-dire ceux composés de 10 à 50 atomes de carbone (huiles et graisses), les composés légers se rapprochant du kérosène et les composés lourds se rapprochant du bitume.

3.1.3.1.3 Éléments métalliques

Naturellement présents dans les sols et les eaux, à des concentrations faibles, les éléments métalliques proviennent de l'altération des roches. Les activités humaines à l'origine de leur rejet dans l'environnement sont principalement les procédés industriels de métallurgie, l'industrie minière, l'utilisation de combustibles fossiles, les émissions automobiles ainsi que l'incinération de déchets (Environnement Canada, 2012; Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2014).

En faible quantité, certains éléments métalliques sont indispensables pour les organismes vivants, comme par exemple le fer, le cuivre, le zinc ou le nickel, alors que d'autres éléments sont uniquement toxiques, comme c'est le cas du mercure, du plomb et du cadmium, entre autres (Hade, 2003).

3.1.3.2 Dans les sédiments

Les sédiments au fond du lac peuvent accumuler des contaminants. Il peut s'agir de particules déjà contaminées, ou encore de particules issues de la précipitation⁹ de contaminants solubles présents dans l'eau (MDDELCC, 2002b).

Les sédiments ont été échantillonnées à la campagne d'été 2013 (Sed1 à Sed6) et à celle de printemps 2014 (à l'exception de Sed2 et de Sed5, en raison de contraintes logistiques).

3.1.3.2.1 Critères de qualité

Il existe un guide intitulé « Critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments au Québec et cadres d'application : prévention, dragage et restauration » (Environnement Canada et MDDEP, 2007). Ce guide définit cinq valeurs de référence, selon les effets que peuvent avoir des contaminants dans les sédiments sur la vie aquatique :

- **CER** : Concentration d'effets rares,
- **CSE** : Concentration seuil produisant un effet,
- **CEO** : Concentration d'effets occasionnels,
- **CEP** : Concentration produisant un effet probable,
- **CEF** : Concentration d'effets fréquents.

Ces valeurs de référence sont utilisées en fonction du contexte. Dans le cadre de notre étude, le contexte est la « prévention de la contamination des sédiments ».

Le guide indique que « pour la prévention de la contamination des sédiments [...], la Concentration d'effets rares (CER) et la Concentration seuil produisant un effet (CSE) constituent les valeurs seuils qui permettent de définir le cadre de gestion ».

⁹ Phénomène par lequel un élément se sépare du liquide dans lequel il était dissout.

Ainsi, nous allons évaluer les résultats des analyses en fonction de ces deux valeurs de référence, CER et CSE.

3.1.3.2.2 Teneurs en HAP

Les HAP ont été dosés lors de la première et de la dernière campagne (été 2013 et printemps 2014).

Avant de présenter les résultats, il est nécessaire d'apporter des précisions sur les **limites de détection** employées pour les analyses. La limite de détection est la plus petite concentration ou teneur pouvant être détectée, avec une incertitude acceptable.

Dans le cadre des deux campagnes de mesure (été 2013 et printemps 2014), les limites de détections initiales ont dû être augmentées par le laboratoire, car les échantillons de sédiments prélevés contenaient trop d'eau.

Pour pouvoir évaluer correctement les concentrations obtenues, les limites de détection des méthodes d'analyse doivent être inférieures aux critères de qualité (Environnement Canada et MDDEP, 2007). Or, dans le présent cas, certaines des limites de détection augmentées sont plus élevées que certaines valeurs des critères de qualité (CER et CSE), ce qui fait en sorte que d'éventuelles contaminations des sédiments sont susceptibles de passer inaperçues.

Lors de la première campagne, les résultats des analyses des HAP dans les sédiments du lac des Rapides montrent de la contamination sur certains sites (dépassement de la CER) : aux stations Sed2, Sed3 et Sed6, soit la plage publique, la baie Ross au nord-est du lac et la baie des Crans, au sud-ouest. Lors de la dernière campagne, les stations de la baie Ross et de la baie des Crans (Sed3 et Sed6) ont également montré de la contamination par des HAP (dépassement de la CER et de la CSE). Les autres stations du lac ne peuvent pas être caractérisées, en raison des limites de détection trop élevées.

Ce risque de pollution avait été évoqué par une étude qualitative du bassin hydrographique du lac des Rapides (GDG Environnement Mauricie inc., 1984). En effet,

cette étude indiquait que les activités liées aux bases d'hydravions (fuite des réservoirs d'essence des hydravions, déversement de carburant lors des remplissages) constituaient une source de pollution des eaux du lac.

Dans le cas de dépassement des CSE, le guide de référence indique que « les sources de contamination doivent être recherchées, et au besoin, des démarches doivent être entreprises auprès des responsables, afin de mettre en place les mesures nécessaires pour limiter la contamination ». Il apparaît alors nécessaire de réaliser un suivi des différents HAP au sein des sédiments du lac des Rapides, en faisant particulièrement attention lors de la prise des échantillons, de manière à ce que la limite de détection applicable soit la plus faible possible et permette de détecter les différentes concentrations seuils définies dans le guide de référence (Environnement Canada et MDDEP, 2007).

3.1.3.2.3 Teneurs en hydrocarbures pétroliers

Dans le guide de référence sur les sédiments (Environnement Canada et MDDEP, 2007), il n'existe pas de critère de qualité défini pour le paramètre des hydrocarbures pétroliers.

Tout comme pour les HAP, les limites de détection pour les analyses des hydrocarbures pétroliers ont été augmentées et varient entre les deux campagnes et selon la station échantillonnée. Une seule valeur, mesurée à la station Sed4 à la campagne d'été 2013, est supérieure aux limites de détection. Toutefois, sans critère de qualité et avec des limites de détection variables, il n'est pas possible de tirer de conclusions à partir de ces résultats.

3.1.3.2.4 Teneurs en éléments métalliques

Les éléments métalliques peuvent se retrouver sous plusieurs formes, sous l'action de nombreux processus physiques, chimiques et biologiques. La toxicité d'un métal dépend de la forme dans laquelle il se trouve. Ainsi, la concentration totale d'un métal peut être élevée alors que la part pouvant affecter le milieu aquatique est faible.

Les 12 éléments métalliques suivants ont été mesurés : aluminium, argent, cadmium, chrome, cuivre, fer, mercure, nickel, plomb, titane, uranium et zinc.

Sur ces 12 éléments mesurés, 6 possèdent des critères de qualité définis : aluminium, cadmium, cuivre, fer, mercure et plomb (Environnement Canada et MDDEP, 2007).

Lors de la campagne de juillet 2013, 11 éléments métalliques ont été détectés sur les 12 mesurés, l'argent présentant des valeurs inférieures aux limites de détection pour toutes les stations. Les concentrations en cuivre respectent les critères de qualité. Les teneurs en cadmium, mercure et plomb dépassent la CSE à presque toutes les stations d'échantillonnage. Les stations Sed3 et Sed6 (baie Ross et baie des Crans) sont les stations où les plus fortes concentrations sont mesurées. Alors que les stations Sed4 et Sed5, en face de la rivière des Rapides et au centre du lac, apparaissent comme les moins contaminées.

De plus, on observe des concentrations élevées en aluminium et en fer au sein des sédiments du lac des Rapides, pour toutes les stations, à l'été 2013 et au printemps 2014. Les teneurs moyennes en aluminium sont de 20 g/kg et de 32 g/kg pour le fer, avec tout de même des valeurs plus faibles à la station Sed4 (en face de la rivière des Rapides). Dans des conditions où l'oxygène est bien présent à la surface des sédiments, ce qui est le cas dans le lac des Rapides, l'aluminium et le fer se lient avec le phosphore, le rendant indisponible pour la colonne d'eau. En conditions anoxiques (c'est-à-dire en manque d'oxygène), le fer et l'aluminium se dissocient du phosphore, qui redevient disponible. Rappelons que la disponibilité du phosphore influence directement les risques d'eutrophisation (section 3.1.2). C'est pour cela que des conditions anoxiques seraient dommageables pour le lac.

Au printemps 2014, les 11 mêmes éléments métalliques ont été détectés. Cependant, les teneurs en métaux dans les stations qui ont été ré-échantillonnées (Sed1, Sed3, Sed4 et Sed6) semblent avoir diminué. Par exemple, à la station Sed4, plus aucune concentration ne dépasse le premier seuil (CER). Globalement, on dénombre moins de cas de dépassement de la CSE. On peut supposer que cela est lié à la modification des

teneurs en oxygène et du pH au fond du lac. En effet, la baisse de ces teneurs constitue un contexte favorable à la libération des métaux qui étaient emprisonnés dans les sédiments, liés à d'autres particules par des liens chimiques. Une partie des métaux qui se trouvait emprisonnée dans les sédiments peut alors être libérée dans l'eau, ce qui explique pourquoi les concentrations de métaux mesurées dans les sédiments sont moins importantes au printemps.

Concernant le mercure, il est important de spécifier que cet élément est **bioaccumulable**, c'est-à-dire qu'il ne peut pas être éliminé par les organismes et qu'il reste donc emmagasiné dans leurs tissus. Les substances bioaccumulables peuvent ne pas affecter les organismes qui y sont exposés à très petites doses. Par contre ces organismes les accumulent en eux et deviennent eux-mêmes une source plus concentrée pour leurs prédateurs ; on parle alors de **bioamplification**. Les substances bioaccumulables sont ainsi susceptibles de devenir de plus en plus problématiques à mesure que l'on monte dans la chaîne alimentaire, en raison de la bioamplification.

Les critères de qualité définis ne tiennent compte ni de la bioaccumulation, ni de la bioamplification dans la chaîne alimentaire. Néanmoins, le guide de référence mentionne que « des mesures permettant d'éliminer tout nouvel apport de ces substances dans l'environnement et de limiter leur expansion devraient être adoptées, même si aucun critère de qualité n'est dépassé ». Ainsi, il est toujours nécessaire de veiller à ce que le mercure et toute autre substance bioaccumulable ne parviennent pas au milieu aquatique.

3.1.3.2.5 Classement des sédiments

Dans le cadre du contexte de gestion de la « Prévention de la contamination des sédiments », les résultats des teneurs en HAP et éléments métalliques obtenus classent les sédiments du lac des Rapides dans la classe n°3, *Effets biologiques fréquemment observés, pour laquelle la probabilité de mesurer des effets néfastes sur la vie aquatique augmente avec les concentrations mesurées.*

Le guide de référence mentionne qu'il est nécessaire de poursuivre les investigations afin d'identifier la, ou les, source(s) de contamination et d'intervenir au

besoin sur ces sources afin d'éviter une augmentation de la contamination ou un nouvel apport de contaminants.

3.1.3.3 Dans l'eau

Les résultats de la première campagne (été 2013) ont montré une contamination en HAP et éléments métalliques dans les sédiments. C'est pourquoi nous avons décidé de doser ces mêmes contaminants dans l'eau du lac, lors des deux dernières campagnes, soit à l'hiver et au printemps 2014. Trois stations de qualité de l'eau (E7, E8, E9) ont été ajoutées aux six stations initiales.

3.1.3.3.1 Critères de qualité

Le ministère de l'environnement définit, dans son guide de référence, des critères de qualité de l'eau de surface pour les HAP, les hydrocarbures pétroliers et les éléments métalliques (MDDEFP, 2013). Ces critères sont déterminés en fonction des usages de l'eau.

Dans le cas du lac des Rapides, les critères à examiner sont ceux liés aux 4 usages de l'eau suivants :

- *Prévention de la contamination (eau et organismes aquatiques),*
- *Protection de la vie aquatique (effet aigu et effet chronique),*
- *Protection de la faune terrestre piscivore,*
- *Protection des activités récréatives et aspects esthétiques.*

Néanmoins, il n'existe aucun critère relatif à l'usage de *Protection des activités récréatives et aspects esthétiques* pour les éléments que nous avons dosés.

3.1.3.3.2 Teneurs en HAP

Lors des deux dernières campagnes d'échantillonnage (hiver et printemps 2014), 25 composés de HAP ont été dosés dans les stations de qualité de l'eau. Sur ces 25 HAP,

14 sont concernés par des critères de qualité de l'eau de surface (MDDEFP, 2013). Parmi eux, 7 sont classés en tant que HAP cancérigènes totaux.

Il n'y a pas de critère de qualité lié à l'usage *Protection de la faune terrestre piscivore* pour les HAP.

L'ensemble des HAP dosés dans l'eau pour les deux campagnes présente des concentrations inférieures aux limites de détection.

Les limites de détection (et donc les concentrations mesurées en HAP) respectent les critères pour la *Protection de la vie aquatique* et pour la *Prévention de la contamination des organismes aquatiques* à l'exception des HAP cancérigènes totaux. En effet, concernant les critères de qualité pour les HAP cancérigènes totaux, la limite de détection est supérieure aux critères de qualité de *Prévention de la contamination (eau et organismes aquatiques)*, il n'est donc pas possible d'évaluer correctement les teneurs en HAP.

3.1.3.3.3 Teneurs en hydrocarbures pétroliers

Pour le paramètre des hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀, il existe des critères de qualité uniquement pour l'usage *Protection de la vie aquatique (effet aigu et effet chronique)*. Ils sont de 130 µg/l pour l'effet aigu et 63 µg/l pour l'effet chronique.

La limite de détection initiale du laboratoire pour ce paramètre est de 100 µg/l. Cependant, en raison d'une quantité insuffisante d'échantillon fournie, elle a dû être augmentée pour certains échantillons.

Une seule valeur est supérieure à la limite de détection. Elle a été relevée à la station E7 (entre E5 et E4, au nord du lac) à la campagne d'hiver. La valeur est élevée (625 µg/l), et dépasse les deux limites établies dans le critère sur les effets (aigu et chronique) sur la vie aquatique.

3.1.3.3.4 Teneurs en éléments métalliques

Là encore, on rencontre des problèmes avec les limites de détection.

Néanmoins, les résultats obtenus nous permettent de conclure que l'eau du lac des Rapides ne présente pas de contamination par le chrome, le plomb, le nickel, l'uranium et le cadmium. Pour les éléments argent et mercure, on ne peut pas conclure car leurs limites de détection doivent être inférieures aux critères de qualité en vue d'évaluer correctement leurs teneurs.

Les teneurs en aluminium et en fer, dans l'ensemble des stations et pour les deux campagnes, ne respectent pas le critère de qualité de l'eau lié à la *Prévention de la contamination (eau et organismes aquatiques)*. Ces observations coïncident avec les fortes concentrations que l'on retrouve dans les sédiments du lac mais également dans le sol aux environs du lac.

Enfin, les teneurs en cuivre et en zinc détectées sont conformes au critère de qualité de l'eau lié à la *Prévention de la contamination (eau et organismes aquatiques)*.

3.1.3.3.5 Contaminations dans l'eau du lac des Rapides

Certaines limites de détection ne sont pas adaptées à notre étude et ne nous permettent pas de conclure sur la contamination par certains composés. C'est le cas notamment des limites de détection des HAP cancérigènes totaux, des hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀, du mercure et de l'argent (éléments métalliques).

Pour les hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀, la seule valeur qui est plus élevée que les limites de détection n'est pas conforme au seul critère disponible pour ce contaminant, lié à la *Protection de la vie aquatique*. Les teneurs en aluminium et en fer dépassent les critères de qualité pour l'usage *Prévention de la contamination (eau et organismes aquatiques)* à chacune des stations et pour chaque campagne. Ces observations coïncident avec les fortes concentrations que l'on retrouve dans les sédiments du lac. En outre, le ministère du développement durable de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) indique que certaines eaux de surface de bonne qualité peuvent avoir des concentrations naturelles plus élevées en fer (MDDEFP, 2013).

3.2 Caractérisation des tributaires

Sur les trois tributaires étudiés, seul le tributaire T2 présente des résultats pour chaque campagne. Nous disposons de très peu de données sur le tributaire T1 car celui-ci était généralement à sec. Aucune donnée n'est disponible sur le tributaire T3 pour la saison hivernale, car les prélèvements n'ont pu être effectués (la glace n'ayant pas pu être brisée). Il est ainsi difficile de dégager des tendances pour les tributaires.

3.2.1 Physico-chimie

La température de l'eau des tributaires suit la température extérieure avec des températures chaudes en été, autour de 25°C, puis faibles en automne, entre 3 et 5°C, pour descendre à 0°C durant la saison hivernale. Les températures remontent ensuite graduellement au printemps, autour de 4°C.

Pour les trois tributaires, on observe des teneurs en oxygène dissous stables, quelle que soit la saison, autour de 10 à 12 mg/l.

Les valeurs de pH oscillent entre 4,5 et 6. Ce sont des valeurs de pH acide, en lien avec la nature géologique du substrat de la région (OBV Duplessis, 2011).

Globalement, les valeurs obtenues pour les tributaires sont proches de celles relevées dans les eaux du lac.

3.2.2 Nutriments et COD

C'est la rivière des Rapides (T2) qui présente les valeurs les plus élevées de phosphore total à l'automne et au printemps. Ceci peut s'expliquer par le fait que c'est le plus important des trois tributaires étudiés, la rivière se chargeant en éléments dissous tout au long de son parcours.

Les valeurs de phosphore mesurées dans les tributaires se situent entre 5,2 et 9,3 µg/l. Ces concentrations sont toutes en-dessous de la valeur limite établie par le

ministère de l'environnement visant à limiter la croissance excessive d'algues et de plantes aquatiques dans les ruisseaux et les rivières qui est de 30 µg/l (MDDEFP, 2013).

Les teneurs en azote varient entre 0,19 et 0,29 µg/l, et sont ainsi bien inférieures à la concentration de 1,0 mg/l, considérée comme indicatrice d'une problématique de surfertilisation dans le milieu.

Les concentrations en carbone organique dissous sont comprises entre 8,2 et 14,1 mg/l. Pour chacun des tributaires, les concentrations sont plus élevées à l'automne, tout comme c'est le cas dans le lac. Cela pourrait être lié à de forts vents et précipitations, classiques en automne, brassant le fond du lac dans les endroits peu profonds et entraînant dans l'eau des particules du sol.

3.3 Caractérisation des sols

La caractérisation des sols à proximité du lac des Rapides a été effectuée lors de la première campagne de mesure, à l'été 2013.

3.3.1 Types de sols

La matière organique (MO) du sol est composée d'organismes vivants, de résidus de végétaux et d'animaux et de produits en décomposition. Les résultats des teneurs en MO des sols présentent des résultats très variables selon les stations. Les teneurs sont faibles dans les stations Sol5 et Sol6 (8,8 et 5,1 %), moyennes aux stations Sol1, Sol2 et Sol4 (de 26,2 à 50,7 %) alors que la station Sol3 présente une très forte concentration en MO, avec un taux supérieur à 90 %.

La matière organique du sol joue un rôle fondamental dans le maintien de la qualité de l'eau en raison de sa forte capacité de rétention des polluants organiques (par exemple les pesticides) et minéraux (métaux).

Les sols autour du lac des Rapides présentent une concentration moyenne de phosphore de 507 mg/kg. Cependant, comme pour le taux de matières organiques, il y a de fortes différences entre les stations avec des concentrations en phosphore de

1 790 mg/kg à la station Sol3, située dans la partie nord-est du lac, et de 133 mg/kg à la station Sol6 située dans la partie sud du lac. La concentration élevée de phosphore de Sol3 semble être liée à la très forte teneur en matières organiques qui y est mesurée (> 90 %).

3.3.2 Critères de qualité

Il n'existe pas de critère permettant d'évaluer la qualité des sols. Toutefois, la « Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés » définit trois niveaux de critères génériques pour les sols pour plusieurs substances. Dans le cadre de notre étude, nous utiliserons les deux niveaux de critères suivants :

- Niveau A : limite de quantification. C'est la concentration minimale qui peut être quantifiée à l'aide d'une méthode d'analyse avec une fiabilité définie.
- Niveau B : limite maximale acceptable pour des terrains à vocation résidentielle, récréative et institutionnelle. Sont également inclus les terrains à vocation commerciale situés dans un secteur résidentiel.

3.3.3 Teneurs en HAP

Les sols autour du lac des Rapides ne sont pas contaminés par des HAP. Ce constat est justifié, car il n'y a pas d'activité industrielle importante ni de grandes routes à proximité du lac des Rapides.

3.3.4 Teneurs en hydrocarbures pétroliers

Les sols aux environs du lac des Rapides ne semblent pas être contaminés par des hydrocarbures pétroliers (résultats obtenus inférieurs aux seuils A et B).

3.3.5 Teneurs en éléments métalliques

Toutes les concentrations mesurées en éléments métalliques sont en dessous des valeurs des critères du seuil A et du seuil B.

Ainsi, les sols autour du lac des Rapides ne semblent pas présenter de contamination par les HAP, les hydrocarbures pétroliers et les éléments métalliques.

4 Conclusions et recommandations

L'étude diagnostique du lac des Rapides, abritant la source d'eau potable principale de la Ville de Sept-Îles, avait pour objectif de caractériser l'état trophique du lac et de vérifier la présence d'éventuels contaminants et la tendance à l'acidification du lac. Un suivi d'une année complète (juillet 2013 à juin 2014), comprenant une campagne d'échantillonnage par saison, a été effectué sur le lac (eau et sédiments), les 3 principaux tributaires et les sols à proximité.

Les paramètres mesurés sur place (température, pH, oxygène dissous et conductivité), selon des profils de profondeur dans la colonne d'eau, permettent d'évaluer le fonctionnement du lac. Les profils d'oxygène et de température du lac des Rapides démontrent qu'il s'agit d'un lac dimictique, c'est-à-dire qu'il subit deux brassages annuels. En été, le lac présente une stratification thermique (la couche en surface étant plus chaude que les couches en profondeur) et en hiver, une stratification thermique inverse (la couche en surface est plus froide). Les températures de l'eau couplées aux fortes concentrations d'oxygène dissous sur toute la colonne d'eau indiquent que les eaux du lac sont de bonne qualité. La bonne oxygénation des eaux empêche notamment le phosphore et certains métaux contenus dans les sédiments d'être remis en suspension dans l'eau.

Le lac des Rapides est un lac acide (pH inférieur ou égal à 5,5) tout comme la majorité des lacs de la Côte-Nord. Cette acidité est, en grande partie, liée à la nature du socle géologique de la région. Toutefois, les analyses effectuées sur les données de pH sur la période de 1995 à 2013 indiquent une faible baisse du pH sur cette période, et permettent de déceler un changement abrupt, qui débute en mars 2003 et s'achève en avril 2003, et qui est probablement causé par un fort choc printanier.

Les concentrations en phosphore dans le lac semblent avoir augmenté depuis les années 80, mais elles respectent tout de même le critère de qualité visant à prévenir l'eutrophisation des lacs, établi par le ministère de l'environnement. Les concentrations

en azote sont pour leur part bien en-dessous de la valeur de 1,0 mg/l, qui indiquerait une surfertilisation.

En considérant les classes de niveau trophique établies par le ministère de l'environnement, les teneurs en phosphore total et chlorophylle *a* relevées permettent de classer le lac des Rapides comme étant oligotrophe. Il est possible que le lac se soit fragilisé depuis les 30 dernières années (période de référence pour les teneurs en phosphore total) ; la concentration en phosphore semble notamment avoir augmenté légèrement. Un suivi plus fréquent pendant l'été serait nécessaire pour s'en assurer.

Concernant les tributaires du lac, il est difficile de dégager des tendances au vu des données disponibles. Néanmoins, les teneurs en phosphore total et en azote sont bien en-dessous des critères de qualité visant à limiter la croissance excessive d'algues et de plantes aquatiques dans les ruisseaux et rivières. Les valeurs de pH relevées dans les eaux des tributaires se situent dans les mêmes échelles que celles des eaux du lac, ce qui renforce l'hypothèse que l'acidité est en partie liée à la nature du socle géologique et à la nature des sols du bassin versant.

Les nombreuses pressions pesant sur le lac des Rapides et les usages variés de ses eaux sont la raison du suivi des paramètres de teneurs en HAP, hydrocarbures pétroliers et éléments métalliques dans l'eau et les sédiments du lac, ainsi que dans les sols. Il est important de souligner que certaines limites de détection des laboratoires pour les contaminants ne sont pas adaptées à cette étude et n'ont pas permis de conclure sur la contamination par certains éléments. Pour un suivi ultérieur, il sera nécessaire que les limites de détection des méthodes employées par les laboratoires d'analyse soient adaptées pour la comparaison aux critères de qualité des éléments dosés.

L'analyse des sédiments du lac a permis de déceler des contaminations par les HAP et des concentrations en cadmium, mercure et plomb dépassant les critères de qualité. Des teneurs élevées en fer et en aluminium ont été observées. Pour certaines stations de mesure, aucune conclusion n'a pu être tirée en raison des limites de détection. Les résultats des analyses placent les sédiments du lac des rapides dans la classe « effets

biologiques fréquemment observés », pour laquelle la probabilité de mesurer des effets néfastes sur les organismes aquatiques augmente avec les concentrations mesurées.

L'eau du lac ne semble pas être affectée par une contamination par les HAP. Concernant les hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀, une seule valeur est plus élevée que les seuils de détection employés. Cette valeur est élevée et dépasse les limites établies dans le critère lié à la *Protection de la vie aquatique*. Les teneurs en aluminium et en fer dépassent les critères de qualité pour l'usage *Prévention de la contamination (eau et organismes aquatiques)* et coïncident avec les fortes concentrations retrouvées dans les sédiments du lac, mais également dans le sol aux environs du lac. Toutefois, le ministère de l'environnement indique que certaines eaux de surface de bonne qualité peuvent avoir des concentrations naturelles plus élevées en fer (MDDEFP, 2013).

Enfin, les sols ne semblent pas être contaminés, puisque les concentrations des différents contaminants mesurés respectent les critères fixés.

Les fortes teneurs en éléments métalliques observées dans les trois compartiments étudiés (sédiments, eau et sol) sont principalement liées à la nature des sols et du socle géologique. Il s'agit donc d'une contamination naturelle. Les HAP, les hydrocarbures pétroliers et les éléments métalliques tels que le plomb pourraient provenir quant à eux de bateaux de plaisance présents surtout pendant l'été, mais plus particulièrement de la base d'hydravions.

La réalisation de l'étude diagnostique suivie de l'interprétation des données permettent de faire ressortir plusieurs recommandations à considérer pour la poursuite des investigations.

Lors de prochains suivis du lac des Rapides, des ajustements seraient à apporter au niveau de la logistique et des conditions de terrain. Par exemple, en ce qui a trait à la récupération d'échantillons à évaluer en laboratoire, il faudrait développer une méthode qui puisse assurer que les niveaux de détection n'aient pas à être augmentés pour pouvoir procéder aux analyses. La nature des paramètres à suivre, ainsi que la fréquence des suivis seraient également à revoir. Enfin, l'approfondissement des connaissances à propos

du lac et de ses tributaires ainsi que sur les divers usages de l'eau dans le bassin versant seraient à poursuivre.

Références

- Berryman, D. (2006). Établir des critères de qualité de l'eau et des valeurs de référence pour le phosphore, selon les éco-régions : opportunité, faisabilité et premier exercice exploratoire. Gouvernement du Québec. Rapport remis à Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs.
http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/phosphore/phosphore-eco-regions.pdf
- Bourbonnais, G. (2010). Cycle thermique d'un lac tempéré profond.
http://www.cegep-ste-foy.qc.ca/profs/gbourbonnais/pascal/nya/botanique/not_esnutrition/cycle_lac.htm
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (2011). Détermination des hydrocarbures aromatiques polycycliques : dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse.
<http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/MA400HAP11.pdf>
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (2013a). Détermination des hydrocarbures pétroliers (C₁₀ à C₅₀) : dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un détecteur à ionisation de flamme.
<http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/MA400HYD11.pdf>
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (2013b). Dosage des hydrocarbures pétroliers C₁₀ à C₅₀ dans les eaux.
<http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/bs35160>
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (2014). Détermination des métaux : méthode par spectrométrie de masse à source ionisante au plasma d'argon.

- <http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/MA200Met12.pdf>
- Dupont, J. (2004). La problématique des lacs acides au Québec. Direction du suivi de l'état de l'environnement. Ministère de l'Environnement du Québec. http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/lacs_acides/2004/lacs-acides-Qc.pdf
- Environnement Canada (2012). "Air - Métaux lourds - Principales sources d'émission." Consulté le 2014-10-01, au <http://www.ec.gc.ca/Air/default.asp?lang=Fr&n=445F1FB1-1>.
- Environnement Canada (2013). "Hydrocarbures aromatiques polycycliques " Consulté le 2014-09-22, au <http://www.ec.gc.ca/toxiques-toxics/Default.asp?lang=Fr&n=98E80CC6-1&xml=9C252383-7DB8-4FDB-B811-50FA3C9CE42D>.
- Environnement Canada (2014). "Préservation du bois. Chapitre D - Installations de préservation du bois à la créosote." Consulté le 2014-09-30, au <http://ec.gc.ca/pollution/default.asp?lang=Fr&n=6D7E1CC9-1&offset=3&toc=show>.
- Environnement Canada et Ministère du Développement durable de l'Environnement et des Parcs (2007). Critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments au Québec et cadres d'application : prévention, dragage et restauration. http://planstlaurent.qc.ca/fileadmin/publications/diverses/Qualite_criteres_sediments_f.pdf
- GDG Environnement Mauricie inc. (1984). Impact des activités humaines sur la qualité de l'eau du lac des Rapides.
- Hade, A. (2003). Nos lacs. Les connaître pour mieux les protéger, Fides.
- Lévêque C. (1996). Écosystèmes aquatiques, Hachette. Paris.

- MDDEFP (2013). Critères de qualité de l'eau de surface. Québec, Direction du suivi de l'état de l'environnement: 510.
- Ministère du Développement durable de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (2002a). "Le réseau de surveillance volontaire des lacs - Les méthodes." Consulté le 2014-09-17, au <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/rsvl/methodes.htm>.
- Ministère du Développement durable de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (2002b). "Suivi de la qualité des rivières et petits cours d'eau - Signification environnementale et méthode d'analyse des principaux paramètres de la qualité de l'eau." Consulté le 2014-09-30, au http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/rivieres/annexes.htm#a-total.
- Ministère du Développement durable de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (2014). "Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection." Consulté le 2014-09-16, au <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/prelevements/reglement-prelevement-protection/index.htm>.
- Ministère du Développement durable de l'Environnement et des Parcs (2012). Stratégie de protection et de conservation des sources destinées à l'alimentation en eau potable. <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/potable/strategie/strategie.pdf>
- OBV Duplessis (2011). Apports biogéochimiques aux eaux dans la région de Duplessis. <http://obvd.files.wordpress.com/2011/04/apports-biogc3a9ochimiques-aux-eaux-obv-duplessis.pdf>

Bibliographie de l'étude complète

- Agir pour la Diable (2011). "Qu'est-ce que la qualité de l'eau ?" Consulté le 2014-09-18, au http://www.agirpouurladiable.org/html/do_qualite.html.
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (2012). Modes de conservation pour l'échantillonnage des eaux de surface. Disponible au http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/documents/publications/echantillonnage/dr09_10eauxsurf.pdf.
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (2013c). Modes de conservation pour l'échantillonnage des sols. Disponible au http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/documents/publications/echantillonnage/dr09_02sols.pdf.
- Ciutat, A. (2003). Impact de la bioturbation des sédiments sur les transferts et la biodisponibilité des métaux. Doctorat, École doctorale Sciences du vivant, Géosciences, Sciences de l'Environnement, Bordeaux I.
- Conseil canadien des ministres de l'environnement (2001). "Recommandations canadiennes pour la qualité des sédiments : protection de la vie aquatique." Consulté le 2014-09-30, au <http://documents.ccme.ca/?lang=fr>.
- Conseil régional de l'environnement des Laurentides (2009). Trousse des lacs - Des outils pour la santé des lacs. Disponible au <http://www.troussedeslacs.org/pdf/trousse.pdf>.
- Côté, D., J.-M. Dubois, B. Héту et Q. H. J. Gwyn (2006). Les lacs karstiques de l'île d'Anticosti : analyse hydrogéomorphologique. Bulletin de recherche no 181 Disponible au https://www.usherbrooke.ca/geomatique/fileadmin/sites/flsh/geomatique/bulletin_181.pdf.
- Décamps, H. (1971). La vie dans les cours d'eau, Vendôme, Presses Universitaires de France.
- Environnement Canada (2001). Menaces pour les sources d'eau potable et les écosystèmes aquatiques au Canada. Institut national de recherche sur les eaux, Burlington, Ontario. Rapport n°1, Série de rapports d'évaluation scientifique de l'INRE. Disponible au <http://www.ec.gc.ca/inre-nwri/235D11EB-1442-4531-871F-A7BA6EC8C541/threats-fprint.pdf>
- Environnement Canada (2002). Guide d'échantillonnage des sédiments du Saint-Laurent pour les projets de dragage et de génie maritime. Volume I : Directives de planification. Disponible au <http://publications.gc.ca/collections/Collection/En154-1-2002-1F.pdf>.
- Environnement Canada (2011). "État du lac Winnipeg : de 1999 à 2007 - Faits saillants." Consulté le 2014-10-01, au http://www.ec.gc.ca/doc/publications/eau-water/COM1167/quality-qualite_f.htm.

- Groleau, A., L. Harrault, E. Viollier, A. Gaillard, M. Pepe et M. Benedetti (2008). Variabilité temporelle du pH et du système CO₂ carbonate dans la Seine à Paris: 17.
- Les Services Exp (2013). Plan intégré de protection et de conservation (PIPC) de la source d'eau potable du lac des Rapides. Disponible au http://ville.sept-iles.qc.ca/CLIENTS/1-villesi/docs/upload/sys_docs/Rapport_PIPC.pdf.
- Lombard, F. (1987). "Rank tests for changepoint problems." *Biometrika* 74(3): 615-624.
- Lower, S. K. (1996). Carbonate equilibria in natural waters. Disponible au <http://www.chem1.com/acad/webtext/pdf/c3carb.pdf>.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (2002c). "Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés - Annexe 2 - Tableau 2 : Teneurs de fond (critère A) pour les métaux et métalloïdes" Consulté le 2014-10-01, au http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/annexe_2_tableau_2.htm.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (2002d). "Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés - Annexe 2 : les critères génériques pour les sols et pour les eaux souterraines." Consulté le 2014-10-02, au http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/annexe_2.htm.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (2002e). "Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés - Annexe 2 : les critères génériques pour les sols et pour les eaux souterraines. Tableau 1: Grille des critères génériques pour les sols." Consulté le 2014-10-02, au http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/annexe_2_tableau_1.htm.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (2002f). "Sédiments." Consulté le 2014-09-23, au http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/criteres_sediments/index.htm.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (2002g). "Atlas interactif de la qualité des eaux de surface et des écosystèmes aquatiques." Consulté le 2014-10-13, au http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/Atlas_interactif/stations/stations_rivieres.asp
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (2009). Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : Cahier 5 - Échantillonnage des sols. Disponible au <http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/documents/publications/echantillonnage/solsC5.pdf>.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs et Conseil régional de l'environnement des Laurentides (2012). Protocole d'échantillonnage de la qualité de l'eau. Disponible au <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/rsvl/protocole-echantill-qualite.pdf>.

- Moatar, F., A. Poirel et C. Obled (1999). Analyse de séries temporelles de mesures de l'oxygène dissous et du pH sur la Loire au niveau du site nucléaire de Dampierre (Loiret). *Hydroécologie appliquée*. **11**: 127-151.
- Moukhsil, A., T. Clark , C. Hébert et J.-Y. Labbé (2009). Géologie de la région de Baie-Comeau - Labrieville (feuillet SNRC 22F01, 22F02, 22F03, 22F04, 22F05 et 22F06), Ressources Naturelles et Faune - Québec: 15.
- Moukhsil, A., P. Lacoste, M. Simard et S. Perreault (2007). Géologie de la région septentrionale de Baie-Comeau (22F07, 22F08, 22F09, 22F15 et 22F16), Ressources Naturelles et Faune - Québec: 16.
- OBV Duplessis (2014). Portrait du bassin versant des Rapides.
- Painchaud, J. (1997). La qualité de l'eau des rivières du Québec : état et tendances. Disponible au <http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/archives/eau/docdeposes/lesdocumdeposes/surf13.pdf>.
- Palou, S.-K. (2009). Caractérisation physico-chimique des sédiments de dragage du lac est de la laguna de Lomé. Disponible au <http://www.memoireonline.com/10/12/6334/Caracterisation-physico-chimique-des-sediments-de-dragage-du-Lac-Est-de-la-lagune-de-Lome-au-Togo.html>.
- Saint-Louis, P.-Y. (2014). Données des stations météo sur la Côte-Nord pour l'OBV Duplessis. reçu par courriel par G. Ibrahim le 2014-10-17.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems*.
- Zhou, Y. (2009). Évaluation de la biodisponibilité des métaux dans les sédiments. Disponible au http://www.eau-artoispicardie.fr/IMG/pdf/evaluation_de_la_biodisponibilite_des_métaux_dans_les_sédiments.pdf.