



**ÉTUDE ENVIRONNEMENTALE SUR LA QUALITÉ DES SÉDIMENTS DU
LAC NOIR ET LES IMPACTS DE LA NAVIGATION DE BATEAUX À
MOTEURS**

Pour

L'association du Lac Noir

Par

Sébastien Raymond, Ph.D, et

Rosa Galvez, Ph.D, Ing.

Québec, Janvier 2017

Table des matières

Table des matières	2
Liste des figures	3
Liste des tableaux	3
Résumé exécutif	5
1. Contexte et problématique	7
2. Objectifs du projet.....	9
3. Site d'étude	9
4. Méthodologie	12
4.1. Caractérisation de la qualité des sédiments	12
4.1.1. Plan d'échantillonnage	12
4.1.2. Analyse des paramètres	14
4.2. Évaluation de l'impact des bateaux à moteur.....	16
4.2.1 Principes de l'ADCP.....	16
4.2.2 Inventaire des embarcations.....	17
4.2.3 Plan expérimental.....	17
5. Résultats	18
5.1. Qualité des sédiments de fond.....	18
5.1.1 Caractéristiques physico-chimiques.....	19
5.2. Impacts de la Navigation	27
5.2.1. L'ensemble du parc nautique du Lac Noir	28
5.2.2. Le Cas particulier du <i>wake-boat</i>	30
6. Discussion	32
6.1. La qualité de l'eau	32
6.2. Les conséquences potentielles d'une remise en suspension des sédiments et du phosphore..	35
6.3. Vers une gestion intégrée basée sur la minimisation des impacts	39
7. Conclusions et perspectives	43
Remerciements:	44
8. Références.....	45
Annexe 1 : Échantillons de sédiments au laboratoire.....	48
Annexe 2 : Bateaux testés pendant l'étude	50

Liste des figures

Figure 1: Pratique du <i>wake-surf</i>	8
Figure 2: Localisation du Lac Noir dans la région de Lanaudière	10
Figure 3: Carte bathymétrique du Lac Noir	11
Figure 4: Localisation et numérotation des carottes de sédiments	13
Figure 5: Illustration du découpage des échantillons et les profondeurs associées.....	14
Figure 6: Concentration en phosphore biodisponible en fonction de la profondeur	24
Figure 7: Granulométrie des sédiments de fond du Lac Noir	26
Figure 8: Impacts de l'ensemble du parc nautique sur la conne d'eau du Lac Noir.....	27
Figure 9: Zoom sur l'impact des embarcations motorisées selon différents mode de fonctionnement...	28
Figure 10: Zoom sur l'impact des embarcations motorisées selon différents mode de fonctionnement.	29
Figure 11 : Zoom sur l'impact d'un bateau nautique à moteur central selon différents mode de fonctionnement.....	29
Figure 12: Zoom sur l'impact d'un <i>wake-boat</i> selon différents mode de fonctionnement	31
Figure 13: Puissance des embarcations en fonction de la profondeur impactée en accélération	32
Figure 14: Diagramme adimensionnel de Shields (VAN RIJN L.C., 1989)	37
Figure 15: Délimitations des zones permettant la pratique de certaines activités nautiques sur le Lac Noir	42

Liste des tableaux

Tableau 1: Coordonnées des prélèvements des sédiments de fond du Lac Noir	13
Tableau 2 : Paramètres analysés et la méthodologie associée	15
Tableau 3 : Conditions d'utilisation des embarcations motorisées évaluées dans cette étude	18
Tableau 4: Caractéristiques physico-chimiques des sédiments de fond pour les 10 premiers centimètres de profondeurs.....	19
Tableau 5: Critères de qualité des sédiments d'eau douce	22
Tableau 6: Concentrations des éléments traces métalliques dans les sédiments du lac Noir	21
Tableau 7: Concentrations en métaux lourds et cation majeurs pour trois lacs québécois	23
Tableau 8: Définition des diamètres en fonction de la granulométrie	25
Tableau 9 : Utilisation et sources potentielles des éléments traces métalliques	34

TERMES DE RÉFÉRENCES ET LIMITATIONS LÉGALES

L'université et son personnel ont pris toutes les mesures raisonnables afin d'effectuer les travaux de recherche selon les règles de l'art normalement reconnues en matière de recherche universitaire, mais n'offre aucune garantie de résultats et ne garantit aucunement aux demandeurs de l'étude que ces travaux mèneront à des résultats commercialisables ou utilisables légalement.

L'université ne prend pas responsabilité des conséquences liées à l'utilisation de données ni par les demandeurs de l'étude ni par des tiers.

Référence à citer:

Raymond, S. et Galvez, R., ÉTUDE ENVIRONNEMENTALE SUR LA QUALITÉ DES SÉDIMENTS DU LAC NOIR ET LES IMPACTS DE LA NAVIGATION DE BATEAUX À MOTEURS – année 2016. Université Laval. 50p.

Résumé exécutif

Le Lac Noir dans la région de Lanaudière est un lieu de villégiatures où la population doit savoir concilier les activités récréatives, la protection de l'environnement et la réglementation en vigueur. Au Canada, la Loi sur la Marine marchande du Canada (2001) règlemente l'utilisation des embarcations de plaisance et est appliquée par la sureté du Québec (entente avec le gouvernement fédéral). Il est cependant possible pour les municipalités d'établir une réglementation de l'usage des bateaux sur permission du gouvernement fédéral.

Plusieurs études ont montré l'impact des embarcations à moteur sur les écosystèmes lacustres. Cependant aucune étude comparative d'un panel exhaustif de bateaux n'a encore été réalisée pour un même lac permettant d'évaluer l'impact environnemental de ceux-ci. La présente étude se veut spécifique aux usages nautiques et aux caractéristiques en termes de qualité d'eau et de sédiments du Lac Noir.

Les objectifs de l'étude sont doubles :

- 1- Caractérisation de la qualité des sédiments de fond du Lac Noir. Il apparait essentiel de connaître la composition et la taille des sédiments du Lac Noir pour comprendre les mécanismes et les risques de leurs remises en suspension. Cette première étape de caractérisation permettra de déterminer des zones où les risques de pollution sont les plus importants.
- 2- Détermination de l'impact des pratiques nautiques sur la remise en suspension des sédiments de fond lors d'un usage traditionnel sur le Lac Noir.

Les résultats de qualité des sédiments montrent que les sédiments de fond du Lac Noir sont peu cohésifs et très fins donc facilement mobilisables. De plus ces sédiments sont un véritable réservoir à phosphore et à certains métaux lourds (dont l'origine est inconnue). Le phosphore pourrait entraîner le développement de cyanobactéries (qui est un fléau de plus en plus présent sur les lacs québécois). Un autre problème sanitaire pourrait être lié aux métaux lourds. Si le Lac Noir est pour l'instant considéré comme un lac méso-trophe par le MDDELCC, sa qualité pourrait se dégrader rapidement si un contrôle des activités nautiques ne s'exerce pas.

L'impact de la navigation motorisée sur la perturbation de la colonne d'eau nous indique des profondeurs variables en fonction des pratiques. La plus impactante est sans aucun doute le *wake-surf* avec une perturbation de la colonne d'eau jusqu'à 6 mètres. La vitesse générée à cette profondeur est capable de remobiliser les sédiments de fond très fins et peu cohésifs du Lac Noir.

Compte tenu de l'impact potentiel de la navigation motorisée sur les écosystèmes aquatiques, les activités de navigation devraient être limitées, restreintes et gérées adéquatement. Cependant dans un souci de compromis entre la préservation de l'environnement et les activités récréatives, il est nécessaire d'établir des stratégies de gestion et réglementation définies sur la base des données et des faits scientifiques. Les règlements existants (limitation de vitesse, distance par rapport aux berges) sont devenus insuffisants par rapport à l'évolution de la puissance des bateaux et des pratiques nautiques. La réglementation et donc la législation se doivent d'évoluer et se renforcer pour s'arrimer à la réalité actuelle. Sur la base de la présente étude et en tenant compte des études antérieures il est possible de proposer plusieurs types de recommandations :

- o Lors d'évènement venteux, il serait préférable de limiter les activités nautiques voir de les annuler pour éviter un effet cumulatif des perturbations.

- o Après un évènement venteux, il serait préférable de laisser un temps de repos au lac d'au moins 24h pour favoriser la sédimentation et limiter le relargage du phosphore

- o Toute activité avec des wake-boat ne peut se faire si les caractéristiques suivantes ne sont pas respectées : Profondeur minimum de 7 mètres et largeur minimale de 600 mètres.

- o Toute activité avec des bateaux nautiques à moteur centrale et arrière ne peut se faire si les caractéristiques suivantes ne sont pas respectées : Profondeur minimum de 5 mètres.

- o Toutes activité avec des bateaux de type ponton, motomarine ne peut se faire si les caractéristiques suivantes ne sont pas respectées : Profondeur minimum de 2 mètres.

- o Pour toutes profondeurs inférieures à 2 mètres, la vitesse doit se limiter au plus faible avec une accélération lente et modérée.

Si l'on applique ces principes de saine gestion environnementale au Lac Noir, il apparait qu'**aucune zone du lac ne permet la pratique du *wake-surf* et *wake-board***. Une zone restreinte permettrait les activités avec bateau nautique à moteur central et une zone plus élargie permettrait la pratique des diverses activités nautique telles que la motomarine et le ponton. Les zones à proximité des berges ainsi que la baie des bounadère ne permettraient aucune pratique nautique cependant une navigation à faible allure sans accélération brusque pourrait être acceptée. On peut également étendre ces limites à la Rivière Noire où une navigation à faible vitesse et sans accélération pourrait être recommandée. La diversité et multitudes de lacs au Québec fait que la pratique du « *Wake-board* » peut se faire sur d'autres lacs avec des caractéristiques de largeur et de profondeur adaptées.

1. Contexte et problématique

Le vieillissement des lacs est un phénomène naturel se déroulant normalement sur une échelle de temps de plusieurs centaines à milliers d'années. Ce phénomène, que l'on nomme eutrophisation, est le processus d'enrichissement graduel d'un lac en matières nutritives, faisant passer son état d'oligotrophe (qui signifie peu nourri) à eutrophe (qui signifie bien nourri). Cet enrichissement provoque une augmentation de la production biologique qui s'accompagne d'une transformation des caractéristiques du lac. Ceci se traduit notamment par une plus grande accumulation de sédiments et de matière organique au fond des lacs, une réduction de l'oxygène dissous dans l'eau et le remplacement d'organismes par des espèces mieux adaptées aux nouvelles conditions. L'eutrophisation est un phénomène qui peut être accéléré par les activités humaines qui prennent place sur les rives, dans le bassin versant et dans le lac lui-même. Ces activités peuvent avoir pour effet d'augmenter les apports en matières nutritives au lac mais également de remobiliser les éléments nutritifs déjà présents dans le lac et plus particulièrement dans les sédiments.

Le vieillissement prématuré par les activités humaines est un des principaux problèmes qui affectent les lacs de villégiature et les lacs situés en milieu agricole et urbanisé. Le Lac Noir dans la région de Lanaudière n'échappe pas à la règle. Il est un lieu de villégiature où la population doit concilier les activités nautiques récréatives, la protection de l'environnement et la réglementation en vigueur. Selon les observations citoyennes depuis les 10 dernières années, la fréquentation nautique a augmenté sur le lac Noir et les activités récréatives ont changé. Des nouvelles pratiques nautiques sont apparues tel que le « *wake-surf* » et le « *wake-board* » (Figure 1).



Figure 1: Pratique du *wake-surf*

(Source : http://www.skimboard.com/edenv3/index.php?option=com_content&view=article&id=114&Itemid=810)

La pratique de ces activités nécessite des embarcations, « *wake-boat* », particulièrement puissantes (supérieure à 350hp) dont les impacts sur l'environnement commencent à être étudiés au niveau lacustre (Mercier-Blais et Prairie, 2014; Raymond et Galvez, 2015). Cependant aucune étude comparative pour un large éventail de bateaux n'a pas encore été réalisée pour un même lac permettant d'évaluer l'impact environnemental de ceux-ci. L'étude se veut donc ici spécifique aux usages nautiques et aux caractéristiques en termes de qualité d'eau et de sédiments du Lac Noir.

*« L'enjeu principal de la majorité de nos lacs est le maintien de leur état trophique naturel. Ceux-ci reçoivent une pression variable selon les endroits, mais parfois très forte en ce qui concerne l'occupation de leurs rives et de leur bassin versant. La principale conséquence de cette pression, celle qui préoccupe actuellement le plus les riverains comme les décideurs, est l'enrichissement des plans d'eau qui a souvent pour conséquence un changement de l'état trophique. Ces changements, toujours à la hausse, sont la plupart du temps difficilement récupérables. »*¹

L'association de protection de l'environnement du lac Noir a mandaté le Dr. Sébastien RAYMOND (Ph.D.) et le Pr. Rosa GALVEZ (Ph.D., ing.) pour réaliser une étude sur la caractérisation des sédiments et l'impact de la navigation sur la colonne d'eau et la remise en suspension des sédiments de fonds. La présente étude doit permettre à l'association de protection de l'environnement du Lac Noir de proposer

¹ Source : « Interprétations reliées à la problématique des apports en nutriments pour les lacs, Bassin versant de la rivière L'Assomption », Daniel Blais, Adeline Bazoge, Novembre 2005, MDDELCC

une réglementation des usages nautiques basés sur des résultats scientifiques et essais in situ. A partir d'un plan d'échantillonnage des sédiments de fond du Lac Noir, un diagnostic de la qualité de ces sédiments sera réalisé. En parallèle, une étude comparative mesurera l'impact environnemental des activités nautiques sur la colonne d'eau et la possible remise en suspension des sédiments de fonds.

2. Objectifs du projet

Le projet comporte deux volets dont les objectifs sont complémentaires. Tout d'abord il s'agit d'établir l'état des lieux des sédiments de fond du Lac Noir. Il apparaît essentiel de connaître la composition et la taille de ces sédiments. La composition permettra de définir des zones de pollution en phosphore et métaux lourds alors que la taille permettra d'estimer les risques de la remise en suspension. Cette première étape de caractérisation permettra de déterminer les zones où les risques de pollution sont les plus importants.

En complément à cette phase de caractérisation le deuxième objectif est de mesurer la profondeur à laquelle les différents types d'embarcations motorisées ont un impact. De plus il faut déterminer si la perturbation générée est suffisante pour remettre en suspension les sédiments du fond.

Les résultats obtenus ont pour but d'aider l'association du Lac Noir à supporter, sur des bases techniques et scientifiques, une réglementation permettant la préservation de la qualité des eaux du Lac Noir.

3. Site d'étude

La rivière Noire se situe sur le réseau hydrographique du bassin versant de la rivière L'Assomption (Figure 2). Entièrement situé dans la région physiographique des Laurentides méridionales, le sous bassin de la rivière Noire prend sa source au nord-est du bassin versant dans les hauteurs de la municipalité de Saint-Zénon. Le lac Noir n'est pas situé à la tête de la rivière Noire, mais il constitue le plus gros plan d'eau d'un territoire de 414 km². La rivière Noire s'écoule sur 63 km avec une pente moyenne de 5.2 et un débit moyen de 1.2 m³/s.

Le Lac Noir possède une profondeur maximale de 7 mètres pour une profondeur moyenne de 4.5 mètres. Sa superficie est de 243 hectares et son élévation de 202 mètres. La carte bathymétrique du Lac Noir est disponible à la Figure 3. Le Lac Noir mesure 3.2 km (dans le sens Nord-Sud) et 1.4 km de large en moyenne. Ses coordonnées géographiques sont : 46° 16' 47" nord, 73° 32' 36" ouest.

Le taux de renouvellement des eaux est de 22 fois par années soit environ soit 1.8 fois par mois. Ce qui permet un renouvellement important et régulier des eaux du lac par la rivière Noire qui le traverse et qui influence en grande partie la qualité de ces eaux de surface.



Figure 2: Localisation du Lac Noir dans la région de Lanaudière

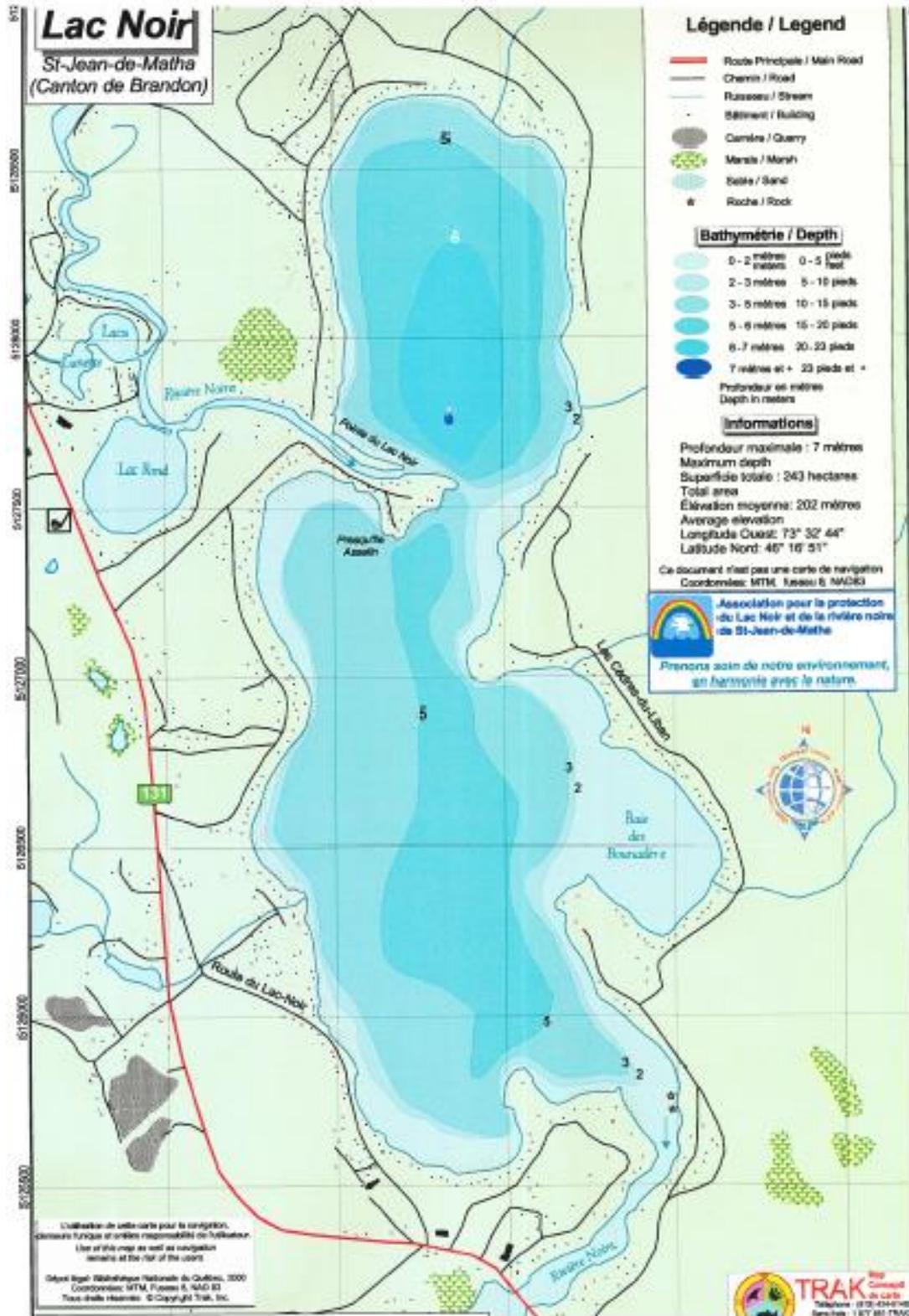


Figure 3: Carte bathymétrique du Lac Noir

4. Méthodologie

La méthodologie se base sur la proposition d'étude environnementale sur la qualité des sédiments du Lac Noir et l'impact associé des bateaux à moteur soumise à l'Association de protection de l'environnement du Lac Noir, en juillet 2016.

Le projet se divise en quatre phases couvrant l'ensemble des objectifs déterminés précédemment à savoir la caractérisation de la qualité des sédiments et l'impact de la navigation motorisée sur la remise en suspension des sédiments de fond. Ces quatre phases se composent de 2 phases distinctes de travaux sur le lac, une phase d'analyse en laboratoire et une phase rédactionnelle et de communication.

4.1. Caractérisation de la qualité des sédiments

La caractérisation des sédiments est réalisée à partir de carottes prélevés au fond du lac et sont ensuite découpés et analysés au Laboratoire d'environnement de l'Université Laval. Le plan d'échantillonnage et les analyses réalisées sont décrits ci-après.

4.1.1. Plan d'échantillonnage

Une campagne d'échantillonnage a été effectuée en période estivale le 24 Août 2016 pour le prélèvement de carottes de sédiments de fond du Lac Noir. Cinq (5) prélèvements ont été effectués à divers points stratégiques du Lac permettant une évaluation complète de celui-ci (Figure 4).

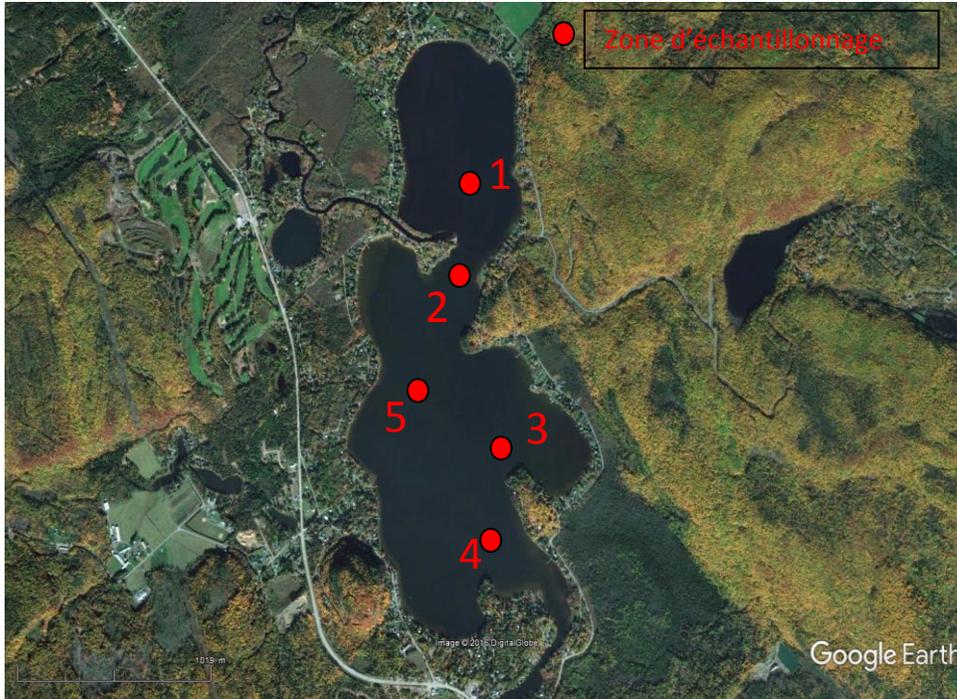


Figure 4: Localisation et numérotation des carottes de sédiments

L'échantillonnage a suivi les recommandations émises par Environnement Canada (1999) concernant le protocole d'échantillonnage des sédiments pour les éléments nutritifs, les métaux et les caractéristiques physiques. La stratégie a pour but d'échantillonner dans toutes les zones afin de définir les secteurs de pollutions contrastés dont les coordonnées sont présentées au Tableau 1.

Tableau 1: Coordonnées des prélèvements des sédiments de fond du Lac Noir

Numéro du prélèvement	Coordonnées (XY)		Longueur de la carotte (en mètre)
	Abscisses (X)	Ordonnées (Y)	
1	612143.75° E	5127338.44° N	0.60
2	612109.48° E	5126860.05° N	0.40
3	612303.52° E	5125987.25° N	0.50
4	612298.30° E	5125470.83° N	0.50
5	611841.38° E	5126244.35° N	0.50

4.1.2. Analyse des paramètres

Protocole d'analyse :

Les analyses sont réalisées sur les carottes de sédiments au laboratoire d'environnement du Département de Génie civil et Génie des eaux de l'Université Laval selon les standards et les normes pour les éléments recherchés.

Le découpage des carottes se déroule manuellement comme illustré à la figure 5 : 0 à 5 cm; 5 à 10 cm; 10 à 20 cm, 20 à 30 cm, 30 à 40 cm.... Ainsi la couche superficielle est coupée tous les 5 cm et à partir de 10 cm de profond, on découpe au 10 cm (voir Annexe 1).

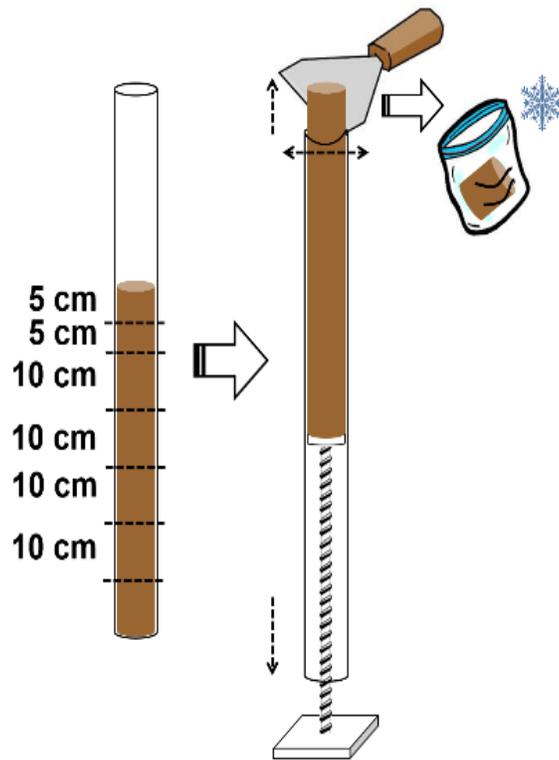


Figure 5: Illustration du découpage des échantillons et les profondeurs associées

Chaque analyse sera réalisée en triplicatas pour s’assurer de la validité des résultats. Les éléments recherchés et la méthodologie associée sont présentés dans le tableau 2 :

Tableau 2 : Paramètres analysés et la méthodologie associée

Paramètres	Méthodologie
Teneur en eau (TE)	Perte de poids à 105°C
Matière organique (MO) - C organique total (COT)	Perte de poids par ignition à 550°C (loss-on-ignition - LOI)
Extraction de l'eau interstitielle	Extraction de l'eau para centrifugation
pH dans l'eau interstitielle	pH-mètre (S 940, Multi 3430 SET G, WTW)
Conductivité électrique (CE) dans l'eau interstitielle	Conductimètre (TC 925, Multi 3430 SET G, WTW)
Phosphore soluble dans l'eau interstitielle	Méthode de l'acide ascorbique par spectrophotométrie à UV (Hach©)
Phosphore disponible	Méthode Olsen: extraction au NaHCO ₃ et mesure par la méthode de l'acide ascorbique par spectrophotométrie à UV (Hach©)
Granulométrie	Digestion au H ₂ O ₂ au bain-marie et mesure avec un granulomètre laser (Horiba©)
Éléments trace métalliques (ETMs) pseudototaux	Digestion à l’aqua regia (HNO ₃ /HCl) et mesure au spectromètre d’absorption atomique à flamme (AA240FS, Varian Inc.)

Concernant les sédiments, les paramètres mesurés sont ensuite comparés aux critères de qualité définis par Environnement Canada et le Ministère du Développement durable, de l’Environnement, de la lutte contre les changements climatiques (Environnement Canada et ministère du Développement durable, de l’Environnement et des Parcs du Québec, 2007), si ceux-ci sont établis.

La réalisation complète de ces analyses a permis de caractériser les teneurs en phosphore disponible (principal facteur de l’eutrophisation), les teneurs en métaux lourds ainsi que les caractéristiques physico-chimiques des sédiments du lac Noir.

4.2. Évaluation de l'impact des bateaux à moteur

Afin d'évaluer les impacts de la navigation sur la colonne d'eau, un plan expérimental a été élaboré pour l'évaluation de plusieurs types d'embarcations et en se servant d'un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler).

4.2.1 Principes de l'ADCP

L'ADCP est un instrument qui présente les caractéristiques suivantes :

- Acoustic – Utilisation d'une onde sonore ;
- Doppler – Effet Doppler (décalage de fréquence d'une onde observé entre les mesures à l'émission et à la réception) appliqué à la mesure de vitesse ;
- Current - Mesure de la vitesse de l'eau ;
- Profiler - Mesure d'un profil de vitesse, pas d'une vitesse ponctuelle.

Suite à l'enregistrement des données, un travail d'extraction et d'exploitation des données stockées dans les ADCP est réalisé pour la détermination de la direction et de l'intensité de courant.

L'ADCP est un instrument qui calcule les composantes de la vitesse de l'eau à différentes profondeurs dans la colonne d'eau et cela dans les 3 directions. L'appareil permet de calculer la vitesse et de déterminer la direction du courant pour toute la colonne d'eau. Les vitesses sont déterminées selon des cellules (la colonne d'eau est découpée en éléments verticaux) dont la taille et le nombre peuvent être ajustés. Une verticale composée de plusieurs cellules est appelée ensemble. L'effet Doppler permet de transmettre des sons à des fréquences fixes et en réceptionnant les échos retournés par les réflecteurs dans l'eau. Ces réflecteurs sont de petites particules microscopiques de sédiments ou de plancton naturellement présents dans l'eau, qui se déplacent à une vitesse égale à l'eau et qui reflètent le son vers l'ADCP. Les ADCP choisis pour les essais possèdent 4 transducteurs qui émettent des pulsations acoustiques à des fréquences de l'ordre de 1,2 MHz. Ces pulsations sont renvoyées et plus ou moins déformées par les particules (réflecteurs) en suspension dans l'eau selon leurs vitesses. La distance entre la particule (réflecteur) et l'ADCP est calculée en fonction du temps passé entre l'émission et la réception de la pulsation (Lane et al., 1999 ; RD Instruments, 1989). Bien que la vitesse du son varie avec la densité du milieu le long des trajets acoustiques, la conservation de la composante horizontale du nombre d'ondes permet de déterminer les vitesses horizontales à partir de la connaissance de la vitesse du son au niveau du transducteur seulement. Grâce à l'effet Doppler le système calcule la vitesse de l'eau en trois dimensions (2 horizontales et 1 verticale) au droit de chaque faisceau (3 ou 4 faisceaux) par l'utilisation de règles trigonométriques.

4.2.2 Inventaire des embarcations

Comme l'étude se veut spécifique au Lac Noir, il fut suggéré d'avoir un éventail des embarcations le plus représentatif de ceux utilisés sur le lac. Le nombre et le type d'embarcations utilisés ont été proposés par l'association et sont définis ci-après et illustrés à l'Annexe 2 :

- ✓ Bateau à vagues " MOOMBA "(*wake-boat*) pour *wake-board* & surf : moteur arrière \pm 400 hp
- ✓ Bateau turbine " BOMBARDIER " : moto marine haute performance \pm 90 hp
- ✓ Bateau turbine " ARTIC CAT " : moto marine conventionnelle 70 hp
- ✓ Bateau nautique " MASTER CRAF " : moteur central 305 hp
- ✓ Bateau nautique " GLASTRON " : moteur arrière 190 hp
- ✓ Ponton 18 pieds 25 hp.
- ✓ Ponton 22 pieds 90 hp.

4.2.3 Plan expérimental

Dans la présente étude le plan expérimental permet de déterminer quel type d'embarcation selon un usage courant, est susceptible de remettre en suspension les sédiments au fond du Lac Noir. Pour cela, il est proposé de mesurer l'intensité de la perturbation dans la colonne d'eau après le passage des embarcations en utilisant l'ADCP.

Ces données permettent d'évaluer une profondeur critique de remise en suspension des sédiments en fonction du type d'embarcation.

Le travail comprend une journée de travail sur le lac réalisé le 15 septembre 2016. L'installation d'un ADCP a été nécessaire. Chaque embarcation a exécuté trois passages au-dessus de l'ADCP en mode de fonctionnement usuel, en accélération et en effectuant un virage si cela est d'usage dans la pratique de navigation. L'ensemble des passages est résumé dans le tableau 3.

Tableau 3 : Conditions d'utilisation des embarcations motorisées évaluées dans cette étude

Type d'embarcation	Puissance	Vitesse	Accélération	Virage	Particularités
Ponton (18 pieds)	25 HP	15 km/h (± 5km/h)	Non	Non	5 personnes dans l'embarcation
Ponton (22 pieds)	90 HP	15 à 20 km/h (± 5km/h)	Non	Non	2 personnes dans l'embarcation
Bateau nautique (moteur central)	305 HP	49 km/h (± 5km/h)	Oui	Oui	2 personnes dans l'embarcation
Bateau nautique (moteur arrière)	190 HP	42 km/h (± 5km/h)	Oui	Oui	1 personne dans l'embarcation
Bateau turbine (haute performance)	90 HP	42 km/h (± 5km/h)	Oui	Oui	1 personne dans l'embarcation
Bateau turbine (conventionnelle)	70 HP	40 km/h (± 5km/h)	Oui	Oui	1 personne dans l'embarcation
Bateau à vague (<i>wake-surf</i>)	400 HP	24 km/h (± 5km/h)	Oui	Non	5 personnes dans l'embarcation, plate levée, ballast arrière plein.
Bateau à vague (<i>wake-board</i>)	400 HP	24 km/h (± 5km/h)	Oui	Non	5 personnes dans l'embarcation

5. Résultats

Les résultats des différentes campagnes de travaux sur le lac sont présentés ci-après en mettant l'accent tout d'abord sur le diagnostic environnemental de la qualité des sédiments du Lac Noir, puis dans un deuxième temps, sur l'impact des embarcations sur la colonne d'eau.

5.1. Qualité des sédiments de fond

Les caractéristiques physico-chimiques dont les métaux lourds, le phosphore bio-disponible et la granulométrie des sédiments de fond sont présentées dans ce paragraphe pour définir des zones potentielles de pollution.

5.1.1 Caractéristiques physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques et les métaux lourds ont principalement été mesurés pour les 10 premiers cm de chaque carotte et présentés dans le tableau 4. L'étude focalise principalement sur cette épaisseur de sédiments car elle est potentiellement mobilisable par les perturbations nautiques. Ces sédiments de fond superficiels sont moins cohésifs que ceux compactés en profondeur.

La teneur en eau (en %) est le ratio volumétrique d'eau présent dans les sédiments. Elle est déterminée selon le rapport entre la masse humide et la masse sèche d'un échantillon donné, et correspond à l'eau interstitielle. La teneur en eau est un paramètre qui est directement lié à la granulométrie. La mesure de la teneur en eau est un paramètre qui est utilisé notamment dans le cadre de la revalorisation des sédiments dragués. La saturation en eau mesurée dans les sédiments superficiels des carottes est un phénomène classique lié à leur faible compaction dans les premiers centimètres. Ceci les rend plus facilement mobilisables lors de perturbations. On constate une teneur beaucoup plus faible dans la 2^{ème} carotte correspondant à la zone de faible profondeur et moins large. Les vitesses d'écoulements des eaux sont ici plus importantes ce qui tend à supposer une érosion plus forte des sédiments de fond, d'où des sédiments avec moins d'eau et plus cohésifs.

Tableau 4: Caractéristiques physico-chimiques des sédiments de fond pour les 10 premiers centimètres de profondeurs

Carotte	Profondeur dans la carotte (cm)	TE	Fraction organique		Eau interstitielle		
		% TE	MO (%)	COT (%)	pH	CE (µS/cm)	P sol. (µg/L)
1	5	555.3	16.2	9.4	4.6	108.1	17.2
1	10	432.3	14.4	8.3	5.8	50.0	35.3
2	5	67.5	3.4	1.9	6.1	95.1	7.2
2	10	56.8	3.0	1.8	5.8	-	73.6
3	5	399.7	13.5	7.9	5.3	149.1	3.1
3	10	372.2	13.9	8.1	5.6	63.7	20.1
4	5	308.8	13.7	8.0	5.3	71.0	37.1
4	10	371.1	13.8	8.0	5.4	44.2	60.9
5	5	397.1	13.8	8.0	5.6	54.3	13.8
5	10	394.5	13.5	7.8	5.6	47.1	35.4

La matière organique (en %) est constituée par des cellules de micro-organismes, restes de flore et faune à différents stades de décomposition, humus stable, et des composés tels que le charbon et le graphite. La matière organique est donc un indicateur de l'activité biologique et du statut nutritionnel des sédiments. Les pourcentages de fraction organique sont similaires pour les carottes 3, 4 et 5 et quelles que soient les profondeurs avec des valeurs de 13.5% à 13.9% pour la matière organique (MO) et de 7.8% à 8.1% pour le carbone organique total (COT). La carotte 1 révèle des pourcentages sensiblement supérieurs (de 14.4% à 16.2% pour la MO et 8.3% à 9.4% pour le COT). Ces variations peuvent s'expliquer par les vitesses d'écoulement et les profondeurs qui modifient le processus de sédimentation. Ainsi au point 1, la zone la plus profonde du Lac est située en amont de la rivière Noire traversant le lac. Le point 2 à l'inverse correspond à une zone de rétrécissement juste à l'aval de la rivière Noire. Ainsi les vitesses d'écoulement sont plus importantes avec une profondeur plus faible, il n'y a par conséquent peu de sédimentation de MO et COT.

Au niveau de l'eau interstitielle dans les sédiments, le pH varie peu quelles que soient les profondeurs d'une carotte à l'autre. Il est cependant à noter dans les 5 premiers centimètres des carottes 1 et 2 des pH sensiblement différents, à savoir 4.6 et 6.3 respectivement. Ces variations de pH sont à corrélérer avec les teneurs en matière organique.

La conductivité électrique (en $\mu\text{S}/\text{cm}$) est la mesure de la capacité d'une eau à transporter un courant électrique, par le biais de l'ensemble des espèces ioniques chargées contenues dans cette eau. Ainsi, elle est directement proportionnelle à la concentration des ions contenus dans l'eau. La conductivité électrique varie de 44.2 à 149.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Si les valeurs sont généralement comprises entre 44.2 et 71 $\mu\text{S}/\text{cm}$, trois valeurs soulèvent des interrogations, à savoir les cinq premiers centimètres pour les carottes 1, 2 et 3. Dans ces cas particuliers les valeurs sont du double au triple de celles mesurées pour les autres carottes. Ceci suppose la présence d'éléments traces métalliques ou ions majeurs en concentrations non négligeables. Un des facteurs de la présence de ces éléments dans l'eau peut être l'épandage de sels de déglacage.

Le phosphore soluble dans l'eau interstitielle est à des concentrations variant de 3.1 à 73.6 $\mu\text{g}/\text{l}$. Les concentrations sont généralement plus importantes dans les couches de profondeur 5-10cm. Il n'existe pas de critère de qualité pour les concentrations en phosphore soluble dans l'eau interstitielle des sédiments lacustres. La présence du phosphore soluble dans l'eau interstitielle est liée au pH, à l'activité biologique et à la libération de l'ion par la phase solide. Cette forme dissoute dans l'eau interstitielle ne

représente qu'une fraction infime du phosphore total contenu dans les sédiments, soit environ 1 % (Sondergaard et al., 2003).

Les métaux sont mesurés afin d'identifier : i) des sources potentielles de pollution externes au lac, et ii) la disponibilité métallique immédiate qui a un étroit rapport avec la toxicité.

Il n'existe pas de critère de qualité défini pour le Fer (Fe), le Manganèse (Mn) et le Sodium (Na) dans les sédiments lacustres. D'autres critères existent en fonction de seuil de toxicité qui sont définis au tableau 5 (Environnement Canada et MDDELCC, 2007).

Tableau 5 : Critères de qualité des sédiments d'eau douce

Substances	Concentrations (mg/kg)				
	CER	CSE	CEO	CEP	CEF
Cadmium	0.33	0.6	1.7	3.5	12
Chrome	25	37	57	90	120
Cuivre	22	36	63	200	700
Nickel	ND	ND	47	ND	ND
Plomb	25	35	52	91	150
Zinc	80	120	170	310	770

- 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

Pour la prévention de la contamination des sédiments due à un nouvel apport de contaminants dans un plan d'eau (exemple : rejets industriels ou urbains), 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. Lorsque la concentration de toutes les substances analysées est inférieure ou égale à la CER, aucune mesure n'est envisagée, car les sédiments sont jugés sans effet sur le milieu. Lorsque la concentration d'une ou de plusieurs substances dépasse la CER, mais est inférieure ou égale à la CSE (classe 2), la probabilité que les sédiments aient un impact sur le milieu est considérée comme faible. Des mesures de suivi peuvent toutefois être adoptées afin de vérifier l'évolution de la situation. S'il y a augmentation des teneurs, il faudra envisager de poursuivre les investigations pour identifier la source de contamination et évaluer l'impact sur le milieu. Lorsque la concentration d'une ou de plusieurs substances est supérieure à la CSE (classe 3), la probabilité d'observer des effets néfastes sur les organismes benthiques augmente avec les concentrations mesurées. Si la concentration mesurée dépasse également les teneurs naturelles

ou les teneurs ambiantes, 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. Pour éviter un nouvel apport de contaminants, des restrictions supplémentaires peuvent être imposées à toute nouvelle installation dont les rejets risquent d'entraîner une augmentation des concentrations au-delà de la CSE ou au-delà des teneurs naturelles dans les zones d'accumulation en aval, et parfois même en amont, des rejets.

Tableau 6 : Concentrations des éléments traces métalliques dans les sédiments du lac Noir

Carotte	Profondeur dans la carotte (cm)	Éléments trace métalliques/Cations majeurs										Na (mg/kg)
		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Fe (mg/kg sec)	Mn	Na		
1	5	1.8	12.0	20.7	16.7	19.9	208.1	51480.3	394.7	502.5		
1	10	2.0	11.3	13.9	19.3	30.9	210.8	44817.6	144.9	614.5		
2	5	0.8	2.5	1.7	2.6	<LQ	40.8	10725.7	70.3	219.5		
2	10	0.8	2.7	1.1	2.7	<LQ	39.9	10256.0	57.8	249.5		
3	5	2.0	10.3	11.6	16.9	32.9	245.5	57715.7	1070.5	541.5		
3	10	2.1	10.5	11.2	17.5	30.9	247.4	64524.1	1301.6	563.8		
4	5	2.0	9.7	10.0	15.2	26.9	218.2	49220.0	1081.4	535.7		
4	10	2.0	10.0	9.0	15.3	19.9	191.2	45618.3	958.2	625.3		
5	5	1.9	10.4	10.3	17.0	24.9	226.9	60357.8	1269.6	556.0		
5	10	2.0	10.4	10.4	18.1	29.8	221.0	52884.3	935.1	570.6		

<LQ = inférieur à la limite de quantification

L'ensemble des résultats pour les métaux lourds mesurés dans les sédiments de fond du Lac Noir sont présentés dans le tableau 6. Pour le cadmium (Cd) Les valeurs mesurées se situe entre la CEO et la CEP pour l'ensemble des carottes à l'exception de la carotte 2 (concentration comprise entre la CSE et la CEO). Pour le chrome (Cr), toutes les concentrations sont inférieures à la CER. Il en est de même pour le cuivre (Cu). Le nickel (Ni) n'a pas de critère de défini comme les autres métaux. Cependant une valeur de CEO à 47 mg/kg est considérée comme une valeur seuil. Dans la présente étude toutes les concentrations en Ni sont inférieures à cette valeur. Pour le plomb (Pb), à l'exception de la 2^{ème} carotte, toutes les valeurs sont comprises entre 19.9 et 32.9 mg/kg, c'est-à-dire des concentrations comprises entre le CER et La CSE. Pour le zinc (Zn) les concentrations varient de 191.2 à 247.4 mg/kg, à l'exception de la carotte 2 dont les concentrations sont inférieures à la CER. Pour les carottes 1, 3, 4 et 5, les concentrations sont donc comprises entre la CEO et la CEP.

Tableau 7 : Concentrations en métaux lourds et cation majeurs pour trois lacs québécois (adaptée de Environnement Canada et MDDELCC, 2007)

Substances	Concentrations (mg/kg)		
	Lac St-François	Lac St-Louis	Lac St-Pierre
Cadmium	0.8	1	0.4
Chrome	52	93	66
Cuivre	27	41	24
Nickel	28	20	26
Plomb	25	38	19
Zinc	120	220	100
Fer	26 000	47 000	34 000
Manganèse	560	1100	720
Sodium	18 000	17 000	24 000

Comme il n'existe pas de critères de définis pour le Fer, le Manganèse et le Sodium, les concentrations mesurées sont comparées à celles établies pour le Lac St-François, Lac St-Louis et le Lac St-Pierre sur le Fleuve St Laurent (Environnement Canada et MDDELCC, 2007). On s'aperçoit dans le tableau 7 que les concentrations en Fer et Manganèse sont beaucoup plus importantes pour le Lac Noir que pour les autres lacs. Pour le Manganèse on remarque même des concentrations 2 à 3 fois supérieures dans la partie Sud du Lac (carottes 3, 4 et 5) que dans la partie Nord (Carotte 1). Il existe donc pour ce polluant une variation spatiale de la pollution. A l'inverse pour le Sodium, les concentrations établies sont plus faibles que pour les lacs d'eau douce du St Laurent.

5.1.2. Phosphore bio-disponible

L'analyse du phosphore bio disponible a été réalisée sur l'intégralité des carottes. Il définit le phosphore participant aux processus d'eutrophisation car il est disponible sous cette forme pour les êtres vivants.

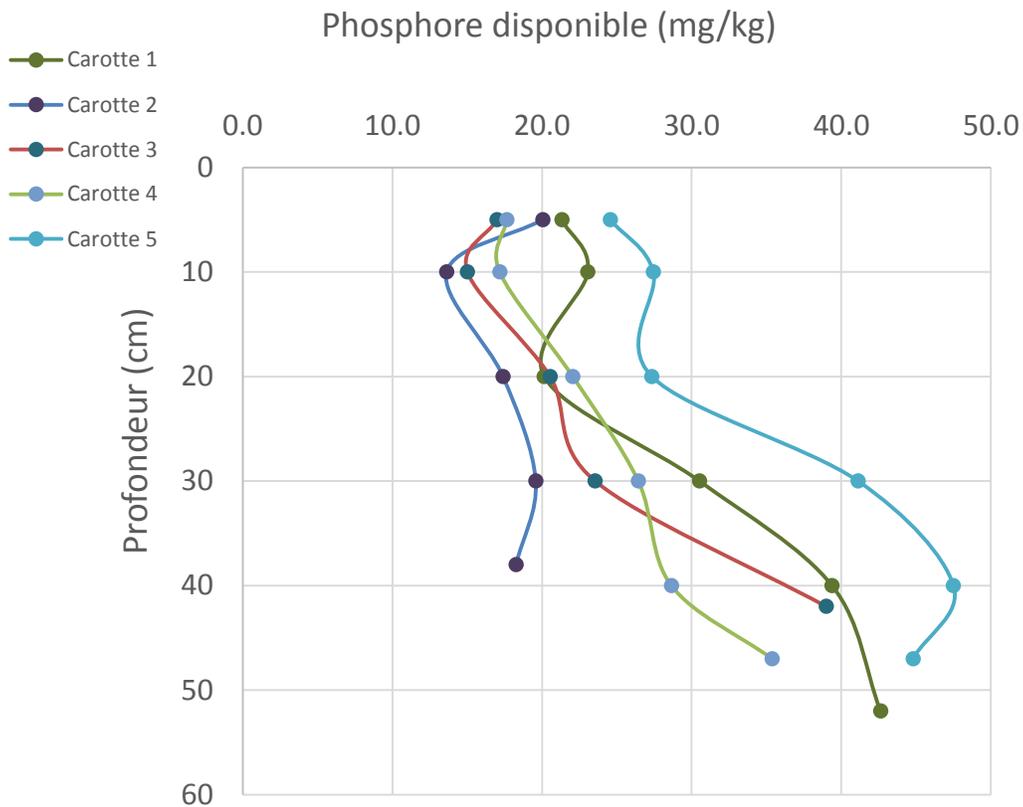


Figure 6: Concentration en phosphore biodisponible en fonction de la profondeur

Sur la figure 6, la carotte 2 à un comportement différent des autres avec des variations très faibles des concentrations en fonction de la profondeur : Les concentrations varient de 13 à 20 mg/kg pour des profondeurs allant de 5 à 40 cm. Pour les autres carottes, les concentrations varient de 17 à 25 mg/kg à 5 cm de profondeur pour augmenter progressivement jusqu'à un maximum de 48 mg/kg. Cette augmentation est plus importante après 20 cm de profondeur ce qui laisse supposer une diminution progressive des apports en phosphore au cours des dernières décennies dû aux mesures appliquées telles que : mises aux normes des fosses septiques, lessives sans phosphates, végétalisation des berges. Cependant les actions du passées ont contribué à former un véritable réservoir de phosphore. Ce phosphore pourrait aggraver potentiellement l'eutrophisation du lac.

5.1.3. Granulométrie

Une analyse granulométrique a été réalisée pour déterminer entre autres si ces sédiments sont mobilisables et si oui quelle vitesse serait nécessaire pour les mobiliser. Plusieurs paramètres permettent de décrire les sédiments tels la granulométrie, la teneur en eau et en matière organique (Schneider, 2001) : La granulométrie des sédiments est déterminée afin de comprendre l'origine des apports sédimentaires du lac. Ce paramètre nous indique la distribution de taille des particules minérales dans les sédiments, c'est-à-dire, la proportion de sable, de limon et d'argile. La granulométrie est essentielle afin d'évaluer la disponibilité immédiate et potentielle des nutriments et des polluants. Pour les différentes carottes une nomenclature définie dans le tableau 8 est utilisée.

Tableau 5: Définition des diamètres en fonction de la granulométrie

	Diamètre des particules	
	En mm	En μm
STG : Sable très grossier	1-2	1000-2000
SG : Sable grossier	0.5-1	500-1000
SM : Sable moyen	0.25-0.5	250-500
SF : Sable fin	0.1-0.25	100-250
STF : Sable très fin	0.05-0.1	50-100
Limon	0.002-0.05	2-50
Argile	<0.002	<2

La granulométrie des sédiments est constituée principalement dans les 50 premiers cm de limons à presque 80% et de sable très fins à environ 12% (Figure 7).

Ceci suggère une granulométrie très fine et peu cohésive si l'on couple ces données à la forte teneur en eau. Il est donc possible qu'une faible vitesse puisse remobiliser les sédiments de fond. En effet une particule d'argile de 50 μm nécessite une vitesse de l'eau de 12 cm/s. Une particule de 2 μm nécessite quant à elle une vitesse de 2,5 cm/s (Beachler, 2002). Ceci sera d'une importance cruciale pour la détermination d'une gestion raison des activités nautiques.

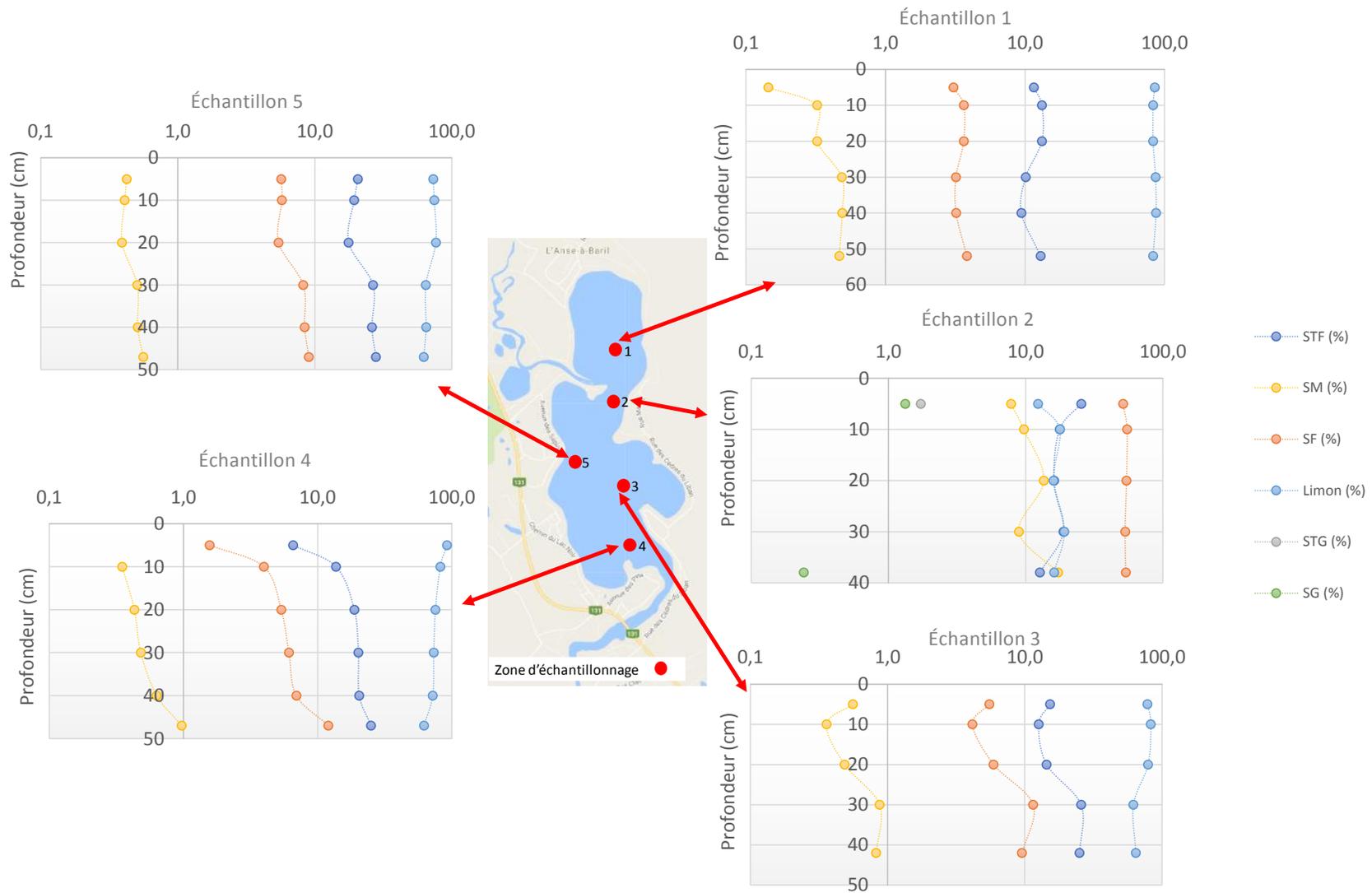


Figure 7: Granulométrie des sédiments de fond du Lac Noir

5.2. Impacts de la Navigation

Les impacts de la navigation sur la colonne d'eau ont été mesurés sur le Lac Noir via un ADCP. L'ensemble des figures ici présente une intensité de perturbation sur la colonne. Les unités exprimées en termes de nombre de coups représentent une intensité de perturbations. En effet on peut considérer que plus l'eau est perturbée plus la quantité de réflecteurs est importante (agitation de la matière en suspension, apport d'oxygène dans le milieu) et donc plus le nombre de coup renvoyé à l'ADCP est important. Les zones de jaune à rouge sont donc les plus perturbées.

La figure 8 montre l'ensemble des essais réalisés sur le lac Noir. Une analyse plus fine de l'impact de chaque embarcation sera présentée ci-après. Cependant, à la figure 8 on peut déjà remarquer que tous les types d'embarcations ont causé un certain impact sur la colonne d'eau avec des différences nettes en fonction des pratiques nautiques. Pour l'ensemble des embarcations, la perturbation maximale (zone rouge) se situe aux alentours de 1 mètre mais des perturbations significatives (zones jaune à orange) peuvent aller jusqu'à 6 mètres de profondeur.

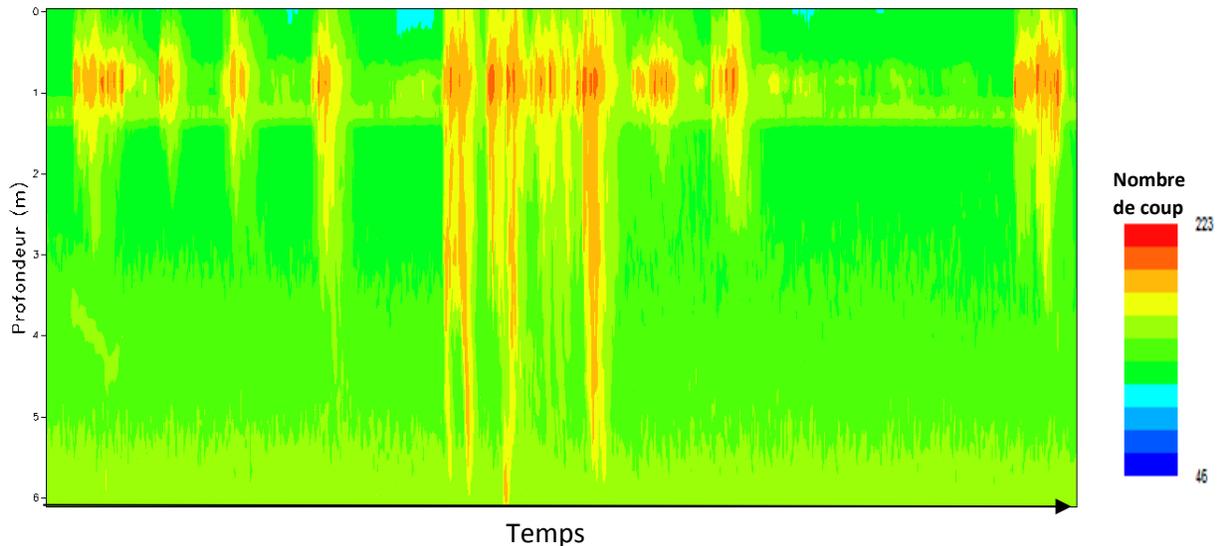


Figure 8: Impacts de l'ensemble du parc nautique sur la colonne d'eau du Lac Noir

5.2.1. L'ensemble du parc nautique du Lac Noir

Les figures 9 et 10 présentent les impacts pour chaque type d'embarcations. L'ampleur de la perturbation est visible pour les vitesses d'utilisation, en mode accélération et virage.

La figure 9 montre que les impacts pour un ponton (25 hp), une motomarine conventionnelle de 70hp, bateau nautique à moteur arrière sont inférieurs à 2m voir 1.50m (motomarine et bateau nautique en mode d'utilisation courante et virage). Le bateau nautique à moteur arrière lors de son accélération impacte la colonne d'eau jusqu'à 3 mètres.

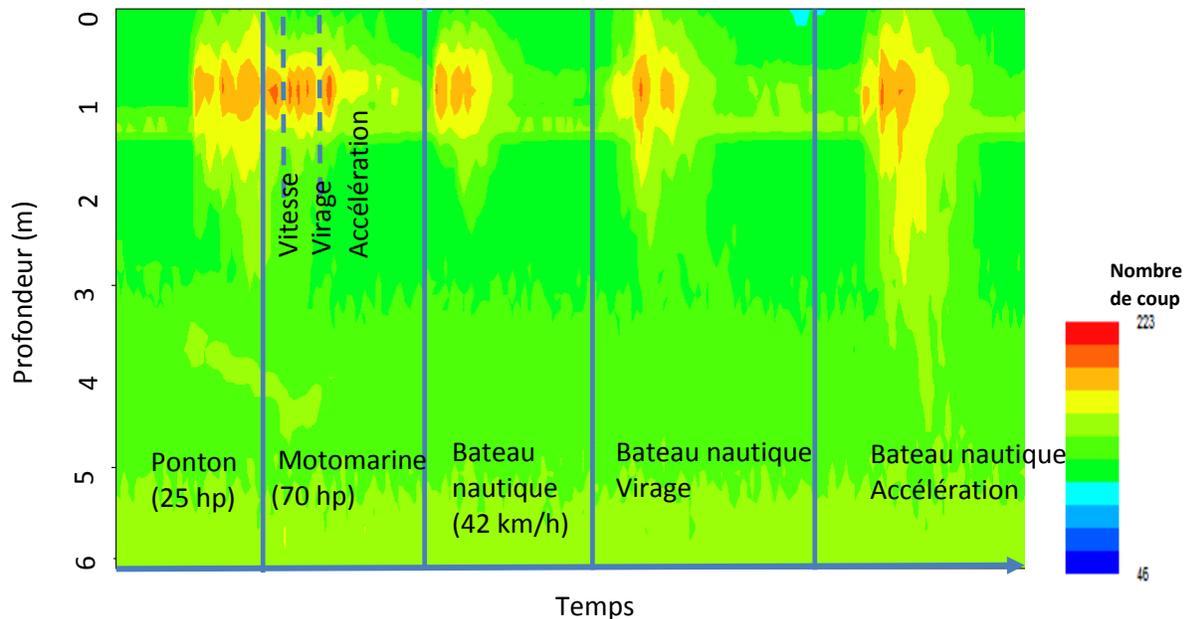


Figure 9: Zoom sur l'impact des embarcations motorisées selon différents mode de fonctionnement

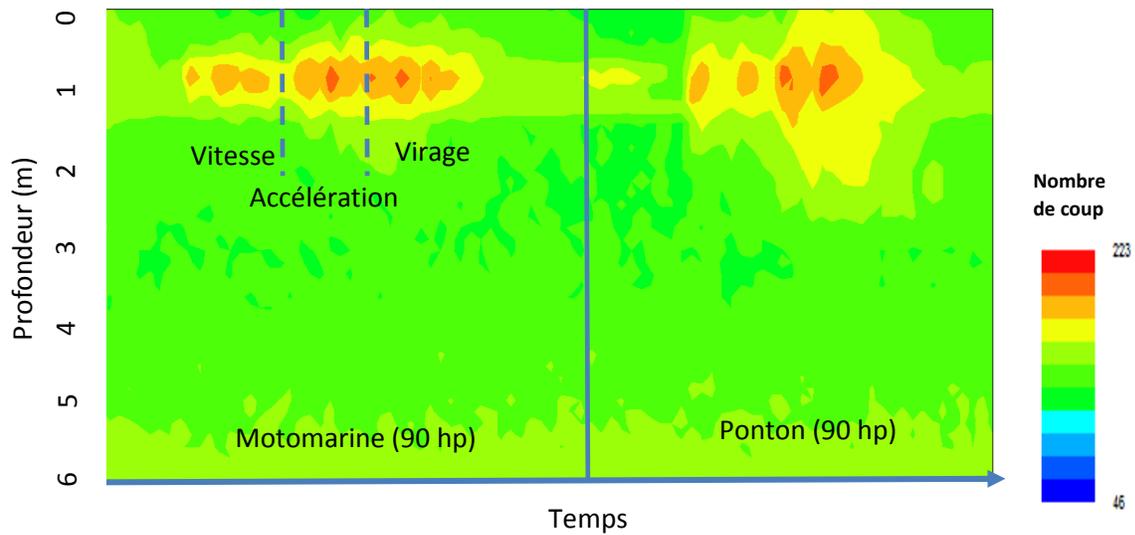


Figure 10: Zoom sur l'impact des embarcations motorisées selon différents mode de fonctionnement

Il est possible de voir sur la Figure 10 qu'une motomarine plus puissante (90 HP) n'impacte pas plus la colonne d'eau que son homologue plus ancien et moins puissant de 70 HP (Figure 9). Si l'intensité de la perturbation est plus importante en accélération et virage, elle ne dépasse pas pour autant 1.5 m. Les pontons plus puissants (90 HP) impactent également la colonne d'eau jusqu'à 2m.

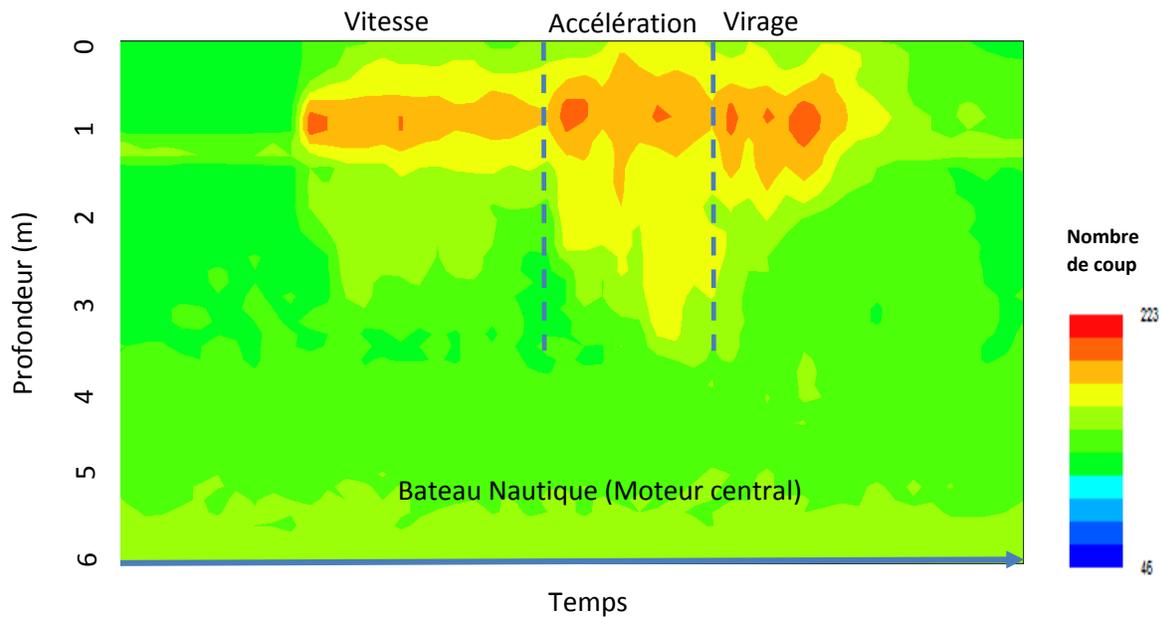


Figure 11 : Zoom sur l'impact d'un bateau nautique à moteur central selon différents mode de fonctionnement

Le cas des bateaux nautiques à moteur central, sur la figure 11, impacte la colonne d'eau jusqu'à 1.5m lors de ses passages en vitesse à l'instar des autres types d'embarcations. Cependant en accélération, une intensité importante de perturbations est constatée à des profondeurs pouvant dépasser 3 mètres. Dans le cas de virage, la colonne d'eau est perturbée jusqu'à 2 mètres.

On peut donc déterminer avec l'ensemble de ces résultats que les embarcations nautiques n'impactent pas la colonne d'eau à plus de 2 mètres de profondeur à l'exception du bateau nautique à moteur central et arrière en mode accélération. La dernière embarcation à être testée est celle qui crée le plus de polémique et fait l'objet d'une section à part en vue de son importance et impact environnemental. En effet, le *wake-boat* est un bateau puissant conçu spécifiquement pour générer les vagues les plus hautes possibles. Le *wake-boat* est équipé de ballast qui va modifier l'assiette du bateau et changer la forme de la vague produite à l'arrière (vague de poupe).

5.2.2. Le Cas particulier du *wake-boat*

Dans le cas bien particulier du *wake-boat*, des tests en virage n'ont pas été fait. En effet notre étude se veut de reproduire le plus fidèlement les pratiques qui ont lieu sur le Lac Noir. Dans le cas des *wake-boat*, les pratiques se font généralement en ligne droite à des vitesses intermédiaires d'environ 20 à 24 km/h pour générer les vagues les plus importantes possibles. L'intérêt s'est ici plus ciblé sur les effets cumulatifs de passages dans le même sens. C'est-à-dire est ce que la perturbation générée par un passage peut être amplifié par le passage successif d'un autre *wake-boat* dans le même sens ? Les accélérations ont également été testées.

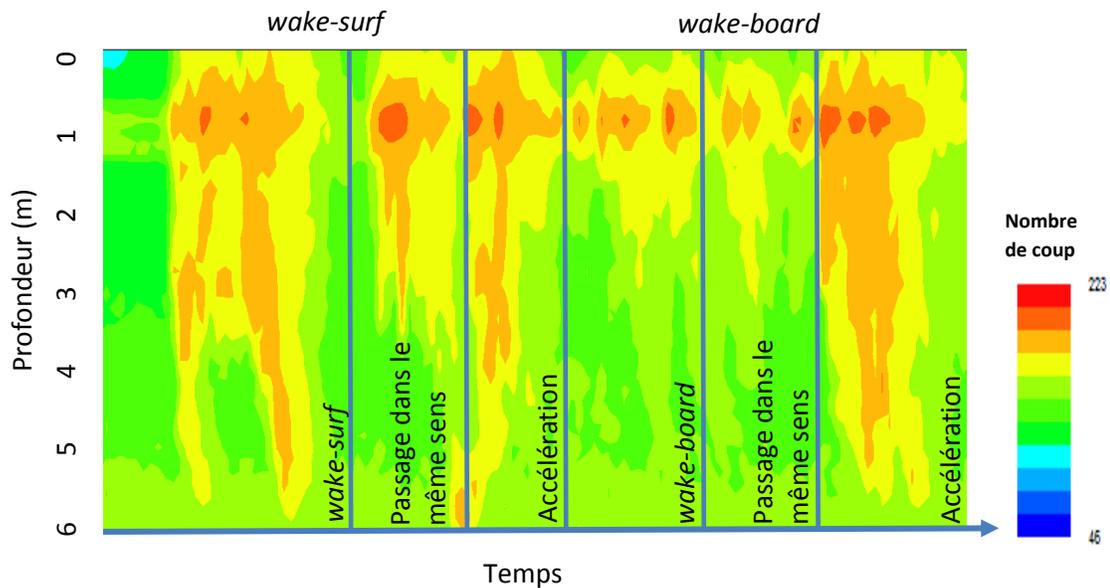


Figure 12: Zoom sur l'impact d'un *wake-boat* selon différents mode de fonctionnement

La figure 12 permet de constater que les deux pratiques : *wake-board* et *wake-surf*, n'ont pas le même impact sur la colonne d'eau. Le *wake-surf* est de loin le style de navigation le plus impactant qui a lieu sur le lac Noir avec un impact mesuré jusqu'à environ 6 mètres de profondeur soit le double de celle mesurée par des bateaux nautiques en accélération. Les passages dans le même sens pour le *wake-surf* ne montrent pas spécialement d'effet cumulatif sur la perturbation. On peut cependant remarquer à 6 mètres une zone de perturbations plus importante. En accélération, l'impact du *wake-surf* est également important avec une zone d'impact jusqu'à 6 mètres. La pratique du *wake-board* ne dépasse pas les 3 mètres que ce soit pour des passages en sens opposés ou dans le même sens. Cependant lors des accélérations, l'impact sur la colonne d'eau est très marqué et les perturbations atteignent quasiment les 6 mètres. Lors de l'accélération la puissance des bateaux est donc corrélée à la profondeur impactée (Figure 13, $R^2=0.98$)

L'impact des pratiques nautiques *wake-surf* et *wake-board* n'a donc pas d'équivalent en termes de perturbation de la colonne d'eau du Lac Noir par rapport aux autres types d'embarcations.

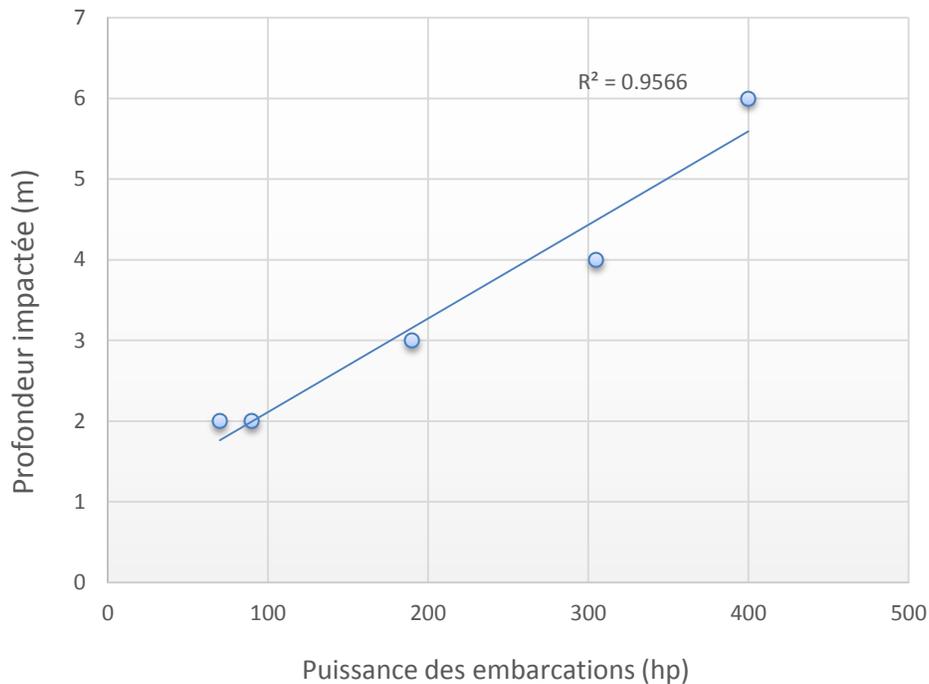


Figure 13: Puissance des embarcations en fonction de la profondeur impactée en accélération

6. Discussion

6.1. La qualité de l'eau

L'intégration des données recueillies à chacune des stations par le réseau de surveillance volontaire des lacs permet de situer l'état trophique du lac Noir dans la classe mésotrophe. Ce lac est à un stade intermédiaire d'eutrophisation. La qualité des eaux est intimement liée à celles de ses sédiments. Dans le cas du Lac Noir, les sédiments sont un réservoir à éléments nutritifs qui ont le potentiel d'être remis en suspension. Au vue de l'état trophique du lac, le MDDELCC recommande l'adoption de mesures pour limiter les apports de matières nutritives issues des activités humaines. S'il parait indispensable de limiter les apports, il parait tout autant indispensable de ne pas « réactiver » ceux déjà présents.

Concernant les paramètres physico-chimiques, les valeurs de pH qui sont inférieures à 6 doivent être surveillées. En effet, la mesure du pH est très importante car ce paramètre influence la diversité biologique du lac. Les organismes aquatiques ont besoin d'un pH compris entre 6 et 9 afin de garantir leur survie et leur bon développement. Des algues tolérantes au pH pourraient être favorisées, ce qui peut entraîner leur prolifération massive et l'aggravation du processus d'eutrophisation. En outre, la plupart des réactions

physico-chimiques sont hautement contrôlées par le pH, telles que la précipitation, la dissolution et/ou l'adsorption. Au niveau de la pollution, la valeur du pH est essentielle. Par exemple, les faibles valeurs de pH peuvent favoriser la solubilisation des éléments traces métalliques, ce qui pourrait augmenter leur biodisponibilité immédiate.

Au Lac Noir, certains éléments traces métalliques sont en concentrations importantes, à savoir le Cadmium, le Zinc et le Plomb. Le Cadmium se retrouve naturellement dans les sols québécois à une concentration moyenne d'environ 1.20 ppm. C'est le métal lourd qui a la plus faible teneur naturelle dans les sols québécois. Cependant, en présence de Ca, de Co, de Cr, de Cu, de Ni et de Pb, l'effet cationique peut également être un facteur d'inhibition de l'adsorption et favoriser la remise en solution du Cd. La concentration moyenne du plomb dans les sols québécois est d'environ 45 ppm soit bien inférieure à nos résultats. Le zinc a un bruit de fond d'environ 113 ppm dans les sols québécois ce qui est également inférieures aux concentrations mesurées dans les sédiments du lac Noir. Le Zn aura tendance à se complexer avec des carbonates et des oxydes hydratés de fer et de manganèse. En outre, il aura tendance à s'adsorber à la surface des minéraux argileux et à la matière organique.

Au niveau de la pollution métallique, plusieurs études de spéciation chimique ont montré que des éléments traces métalliques présentent différents degrés d'affinité pour les composés organiques, ce qui est un facteur essentiel influençant sa disponibilité immédiate et potentiel. Certains éléments (Hg, As, Sb, Pb, Cd, Zn) montrent une grande affinité pour la matière organique, tandis que d'autres (Al, Cr, Co, Fe, Mn et) montrent peu de tendance à être adsorbés sur la fraction organique (El Bilali et al., 2002). Les sources de ces métaux peuvent être multiples. Il faut aussi porter une attention particulière au Cd, Cu, Pb et Zn car ce sont des métaux qui sont généralement présents dans les eaux de ruissellement routier (Morteau, 2011). La provenance de ces métaux lourds n'a pas fait l'objet d'une étude spécifique. Cependant, la littérature peut nous fournir des indices pertinents sur la source de ces métaux qui prennent origine en grande partie du ruissellement routier. Le tableau 9 présente les utilisations typiques du Cd, Cr, Cu, Ni, Pb et Zn et leurs origines potentielles.

Tableau 6 : Utilisation et sources potentielles des éléments traces métalliques (adapté de Kabata-Pendias et Mukherjee, 2007, Galvez-Cloutier et Lefrançois, 2005a.)

Éléments traces métalliques	Utilisation typique	Sources potentielles
Cd	Batteries, Peinture, Plastiques, Activités de placage, Fabrication d'alliages métalliques	-Peintures routières, résidus métalliques provenant de camions et voitures
Cr	Industrie métallurgique, chimique, papetière, placage électronique	-Peinture routière, résidus métalliques provenant de camions et voitures (les fosses septiques dans le passé)
Cu	Très vastes : production de matériel conducteur dans les industries électriques, de moteurs et automobiles, dans l'alliage de bronze et de laiton. Présent aussi dans les fertilisants et les pesticides.	Résidus métalliques provenant de camions et voitures (l'agriculture dans le passé et l'actuel)
Ni	Industries minières	résidus métalliques provenant de camions et voitures
Pb	Tendance mondiale pour diminuer la production : Batteries et encre, anciennement dans l'essence et la peinture	résidus métalliques provenant de camions et voitures
Zn	Industries métallurgiques (protection contre la corrosion), chimiques (Caoutchouc, peinture), automobiles (Tuyaux, batteries), pesticides, plastiques	Peintures routières, résidus métalliques provenant de camions et voitures, (l'agriculture dans le passé et l'actuel)

Dans le cas du lac Noir les concentrations en Cd, Pb et Zn n'ont donc pas seulement une origine naturelle mais très probablement également une origine anthropique liée aux activités humaines.

Le phosphore soluble (en µg/L) est un nutriment provenant de sources diffuses de pollution du bassin versant du lac. Le phosphore soluble est bio-accessible pour les producteurs primaires aquatiques comme

les plantes, les algues et les cyanobactéries et sa concentration permet de vérifier l'état trophique du milieu.

Dans le cas du phosphore, sa sorption dans les sédiments est l'un des processus les plus importants dans la régulation de sa mobilisation et de son comportement dynamique. Le phosphore mobilisé peut être réadsorbé par d'autres composants de sédiments ou rejeté dans l'eau. Le processus d'adsorption ou de libération dépend principalement de la composition des sédiments (ex. matière organique, oxydes) et de la saturation en phosphore. En général, la matière organique est positivement corrélée avec l'adsorption du phosphore (Tang et al., 2014).

Les sources exogènes diffuses sont fonction des superficies drainées par les eaux de ruissellement et de lessivage et sont plus difficiles à identifier et contrôler que les sources ponctuelles. Elles peuvent provenir de l'altération de la roche ignée et du sol, du changement de l'affectation du sol des apports atmosphériques, de la matière organique en décomposition, les engrais, les détergents et les eaux de drainage de terrains érodés (Bergeron et al., 2002; Pilote et al., 2002).

6.2. Les conséquences potentielles d'une remise en suspension des sédiments et du phosphore

La question de la remise en suspension des sédiments est au cœur de cette étude, mais pourquoi est-ce dommageable pour l'environnement? Les sédiments sont un ensemble de particules qui se déposent sous l'effet de la gravité (sédimentation) et qui ont la capacité d'adsorber les nutriments et les métaux lourds.

En effet le phosphore a tendance à s'adsorber facilement sur les particules de sols et ce en grande quantité. Même si l'on enlevait les apports externes en phosphore, la charge interne contenue dans les sédiments lacustres pourrait émettre du phosphore pour une période de 10 à 20 ans (Sondergaard et al., 2003). Il est généralement considéré que le phosphore participant au métabolisme du lac est localisé approximativement dans les 10 cm supérieurs des sédiments. Cependant, la mobilité du phosphore a été observée à des profondeurs allant de 20 à 25 cm (Sondergaard et al., 2003). En général, le phosphore aura tendance à s'adsorber aux sédiments durant l'hiver et à se libérer partiellement pendant le printemps et le début de l'été (Sondergaard et al., 2003). Les échanges de phosphore entre les sédiments et la couche d'eau superficielle aux sédiments (couches actives) sont un élément majeur du cycle du phosphore dans

les eaux naturelles. Le processus d'échange entre l'eau et les sédiments va dépendre de facteurs physiques, chimiques et biologiques (Wetzel, 2001).

Parmi les facteurs physiques, la force du vent peut provoquer une remise en suspension des sédiments dans un lac principalement si ce lac est peu profond. Pour certains lacs peu profonds, la force des vents peut même être l'élément principal qui contrôle la charge interne de phosphore. La remise en suspension des sédiments peut générer une perturbation suffisante pour libérer du P emmagasiné dans les sédiments vers la colonne d'eau (Nedohin and Elefsiniotis, 1997). Ce relargage peut s'effectuer en moins de 2 heures alors que le phénomène inverse est beaucoup plus long et peut dépasser les 20 heures (Yousef et al., 1980). Ce différentiel temporel permet au phosphore d'être disponible assez longtemps pour entraîner une augmentation de la croissance des algues et une dégradation de la qualité de l'eau. D'autres facteurs peuvent influencer la remise en suspension comme la température, le potentiel Redox, le pH et le ratio Fer/Phosphore.

La vitesse du processus d'eutrophisation peut se retrouver accélérée par les pratiques nautiques qui impactent la colonne d'eau. Plusieurs études ont montré des impacts non négligeables dus aux activités de navigation de plaisance mais le développement d'embarcations de plus en plus nombreuses et puissantes tend à davantage accélérer le processus. En effet, la densité des embarcations sur un lac impacte les écoulements en favorisant la remise en suspension des sédiments (Mercier-Blais and Prairie, 2014; Verney et al., 2007) ce qui entraîne une augmentation de la turbidité (Alexander and Wigart, 2013; Anthony and Downing, 2003). McConchie et Toleman (2003) ont mesuré une augmentation de 24% de la concentration en MES dans la colonne d'eau lié aux passages des bateaux.

D'après De Santiago Martin et al. (2016), la turbidité peut être augmentée jusqu'à deux fois après une journée normale d'activité de la navigation sur un lac (<74 comptages) et jusqu'à 12 fois de plus à la suite d'une journée intense (> 355 comptages) (Alexander and Wigart, 2013).

En plus d'un nombre croissant d'embarcations, il y existe depuis quelques années, un engouement pour des pratiques nautiques nouvelles dont les impacts commencent à être de plus en plus documentés. Les activités de *wake-surf* et *wake-board* préconisent l'utilisation d'embarcations très puissantes (supérieures à 350 HP) allant à des vitesses intermédiaires de 24 km/h. Ces vitesses intermédiaires sont considérées comme les plus néfastes par Anthony et Downing (2003). Ils estiment dans leur étude que les embarcations génèrent une turbidité supérieure à des vitesses intermédiaires de 10 à 14 mph (18 à 24 km/h) comparées

à des vitesses faibles ou élevées de 5 mph ou 30 mph respectivement. Raymond et Galvez-Cloutier (2015), ont observé que les activités de type *wake-surf* et *wake-board* impactent la colonne d'eau de 4 à 5 mètres générant des vitesses suffisantes pour remettre en suspension des particules de 50 μ m de diamètre.

Le diagramme adimensionnel de Yalin-Shields, figure 14, est utilisé pour l'étude des sédiments fluviaux.

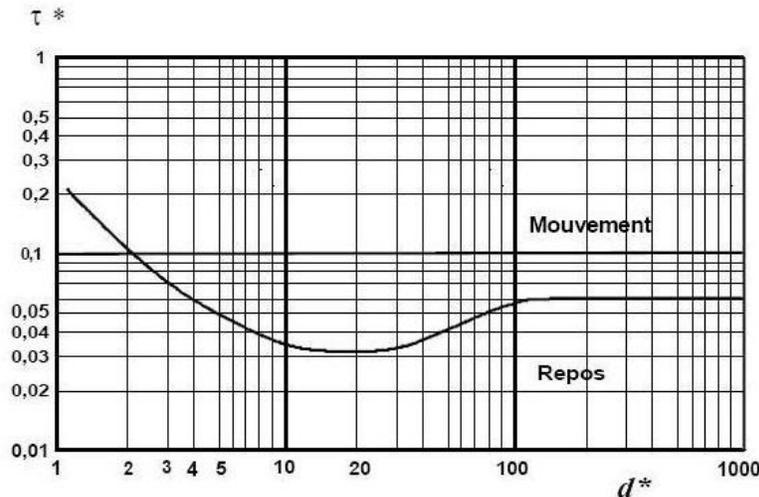


Figure 14: Diagramme adimensionnel de Shields (VAN RIJN L.C., 1989)

Le diagramme de Yalin-Shields donne la valeur du paramètre de Shields τ^* (quantifiant la force de traction critique) en fonction de la valeur de d^* (ces deux grandeurs étant adimensionnelles) : Dans le cas de la présente étude $d^*=50$ et τ^* critique=0.04 ce qui induit une vitesse minimale pour remettre en suspension les sédiments de 3 mm/s. Raymond et Galvez en 2015 ont démontré que des vitesses supérieures à 10 mm/s était générées en profondeur dans la colonne d'eau par le passage des *wake-boat*.

Il y a donc bien un transport possible des particules à 6 mètres de profondeur.

Après les passages des bateaux, l'augmentation de la turbidité est plus importante dans les couches inférieures de la colonne d'eau lorsque les sédiments de fond sont à texture fine (limons et argiles) (Ailstock et al., 2002). Ces sédiments peuvent être déplacés à plus de 50 m du tracé pris par le bateau (Lenzi et al., 2005). En 2014, Mercier-Blais et Prairie mettent en évidence que les vagues produites par les embarcations de type *wake-boats* doivent parcourir, de part et d'autre du sillage, une distance de 300m ou plus (600m au total), pour que l'énergie générée par celle-ci se dissipe complètement, pouvant entraîner ainsi une remise en suspension des sédiments et une érosion accélérée des berges. L'action des vagues et la turbulence comme conséquences de la navigation en eaux peu profondes des lacs produisent

des évidentes remises en suspension de sédiments et le relargage de nutriments et polluants dans la colonne d'eau (Alexander and Wigart, 2013 ; Bastien et al., 2009 ; Gélinas et al., 2005 ; Wang et al., 2009 ; Zoumis et al., 2001), ayant un impact sur la qualité de l'eau.

Au vue des profondeurs du Lac Noir disponibles sur la carte bathymétrique (Figure 3) et de la granulométrie des sédiments, il apparaît évident à la lumière des résultats de cette étude que les activités de *wake-boat* ne peuvent être pratiquées sans avoir de conséquences pour l'environnement aquatique.

Les impacts liés à la navigation nautique peuvent être principalement sous trois formes, à savoir : physique, chimique et biologique (De Santiago Martin, 2016). Ces impacts qui sont généraux à la navigation de plaisance sont intensifiés dans le cadre des *wake-boat*.

Les conséquences pour le Lac Noir pourraient être néfastes à plusieurs niveaux :

- ✓ Environnemental :
 - Détérioration de la qualité de l'eau
 - Diminution et changement des populations aquatiques
 - Développement de cyanobactéries
 - Développement de plantes envahissantes

- ✓ Sanitaire :
 - Des risques de bioaccumulations des métaux au niveau des espèces aquatiques peuvent entraîner un risque sur la consommation à long terme de ces mêmes espèces.
 - Dans le cas du Lac Noir, la situation n'est pas alarmante mais il faut cependant assurer une surveillance et un suivi afin de réduire le risque de relargage de ces métaux dans la colonne d'eau.

- ✓ Économique : d'importantes conséquences socio-économiques découlent de la dégradation de la qualité des eaux.
 - l'occupation et la valeur des zones riveraines en souffrent et font subir des pertes aux usagers
 - la perte des activités récréatives = moins de touristes = moins de consommation = pertes économiques pour les commerces à proximité du lac

- c'est la qualité de vie des citoyens et de leur rapport à l'environnement qui sont affectés par la perte des usages récréatifs.

Les conséquences environnementales, économiques et sanitaires sont intimement liées et peuvent se décrire comme des impacts directs, indirects et cumulatifs à la pratique du *wake-surf* et *wake-board*. Il est donc important de comprendre que dans le contexte actuel de développement durable on ne peut dissocier les effets environnementaux économiques et sociaux. Il est donc nécessaire d'avoir une vision de gestion intégrée à court moyen et long terme de ces impacts.

6.3. Vers une gestion intégrée basée sur la minimisation des impacts

La réglementation existante (ex : limitation de vitesse, distance par rapport aux berges) est insuffisante par rapport à l'évolution des types d'embarcations, de la puissance des bateaux et des pratiques nautiques. La législation se doit aussi d'évoluer et se renforcer pour s'arrimer à la réalité actuelle.

Plusieurs facteurs influencent les impacts de la navigation de plaisance. Ceux-ci se classe entre des facteurs liés aux types de bateaux et d'autres sont liés à l'environnement lacustre.

Une gestion intégrée de cette navigation doit donc intervenir sur l'ensemble de ces facteurs pour servir à définir une nouvelle réglementation. En se basant sur cette étude et la littérature, les facteurs suivants pourraient être regardés comme des suggestions ou des éléments de réflexion pour une gestion raisonnée :

- ✓ Contexte climatique :
 - Lors d'évènement venteux, il serait préférable de limiter les activités nautiques voir de les annuler pour éviter un effet cumulatif des perturbations.
 - Après un évènement venteux, il serait préférable de laisser un temps de repos au lac d'au moins 24h pour favoriser la sédimentation et limiter le relargage du phosphore
- ✓ Contexte morphologique : Les degrés de turbidité provoqués par le trafic des bateaux sont généralement plus affectés en eau peu profonde, de sorte que la profondeur de l'eau est un facteur d'influence important à considérer dans l'établissement de règlements visant à réduire l'impact (Hilton and Phillips, 1982).

- Toute activité avec des *wake-boat* ne pourrait se faire si les caractéristiques suivantes ne sont pas respectées : Profondeur d'au moins 7 mètres et largeur minimale de 600 mètres (Mercier-Blais and Prairie, 2014).
- Toute activité avec des bateaux nautiques à moteur centrale et arrière ne pourrait se faire si les caractéristiques suivantes ne sont pas respectées : Profondeur d'au moins 5 mètres.
- Toutes activité avec des bateaux de type ponton, motomarine ne pourrait se faire si les caractéristiques suivantes ne sont pas respectées : Profondeur d'au moins 2 mètres.
- Pour toutes profondeurs inférieures à 2 mètres, la vitesse devrait se limiter au plus faible avec une accélération lente et modérée comme pratique de conduite.

Les facteurs anthropiques liés aux activités nautiques peuvent également être réglementés :

- ✓ Densité des embarcations : Le nombre de bateaux présent sur le lac ne devrait pas dépasser la capacité de charge récréative (De Santiago Martin, 2016) du lac. Si celle-ci est atteinte il faudrait alors limiter l'accès au lac (fermeture du débarcadère) ou limiter le temps de navigation pour un meilleur partage du lac.
- ✓ Comportement des bateaux :
 - Limitation des déplacements : une partie élevée du trafic peut être due à seulement quelques bateaux qui passent plusieurs fois par le même point
 - Conception des bateaux :
 - limiter les bateaux en fonction de la taille : la taille des bateaux augmente l'amplitude du sillage et l'énergie jusqu'à 10 fois (Hill et al., 2002) ainsi que les MES dans la colonne d'eau (Garrad and Hey, 1987).
 - coque : Type de coque : les bateaux avec des coques en « V » peuvent produire une hauteur de vague de 66% supérieure à ceux à fond plat (Maynard, 2001)
 - puissance
 - nombre de passagers: 5-6 passagers produisent jusqu'à 22% plus d'énergie de vagues que 3 passagers
 - Respect des consignes et des vitesses : Il n'y a pas une relation linéaire entre la vitesse du bateau et l'énergie maximale des vagues (Ahmad et al., 2011). L'énergie des vagues la plus élevée induite par bateau et/ou l'impact physique est observée dans le cas de vitesse intermédiaire, tel que : 10 - 20 mph (Mercier-Blais and Prairie, 2014), 6-18 mph (Raymond

and Galvez-Cloutier, 2015), 5 - 13 mph (Beachler and Hill, 2003), ou à 9,2 mph (Ahmad et al., 2011).

Si l'on applique certains de ces principes au Lac Noir, il apparaît qu'aucune zone du lac ne permettrait la pratique du *wake-surf* et *wake-board* (Figure 15). Une zone restreinte permettrait les activités avec bateau nautique à moteur central et une zone plus élargie permettrait la pratique des autres activités nautique (motomarine, ponton). Les zones à proximité des berges ainsi que la baie des bounadère ne permettraient aucune pratique nautique cependant une navigation à faible allure sans accélération brusque pourrait être acceptée. On peut également étendre ces limites à la Rivière Noire où une navigation à faible vitesse et sans accélération pourrait être recommandée.

Dans une vision de gestion durable des écosystèmes aquatiques, l'équipe du Pr Galvez par l'intermédiaire du Dr De Santiago Martin ont développé un outil d'aide à la décision pour choisir les mesures adéquates. La présente étude correspond donc à une des phases du processus décisionnel. Cet outil à l'avantage de proposer trois phases indépendantes et complémentaires.

Cet **outil d'aide à la décision « Decision Support Tool (DST) »** est un outil d'orientation, une procédure ou une analyse qui peut être utilisé pour aider à soutenir une décision. Un DST permet que les effets d'une incertitude puissent être quantitativement abordés et fournit un processus structuré dans lequel toutes les hypothèses, les paramètres de modèles, et les résultats prévus peuvent être revus et documentés (De Santiago Martin, 2016).

Le présent DST a été développée comme un arbre de décision dans lequel plusieurs phases sont proposées:

- ✓ **Phase 1 – Capacité de charge récréative ;**
- ✓ **Phase 2 – Trafic des bateaux ;**
- ✓ **Phase 3 – Embarcation spécifique.**

L'étude proposée sur le Lac Noir s'intègre dans la phase 3 du DST et permet de dégager des points essentiels pour une gestion saine et raisonnée des activités nautiques dans un contexte de préservation de l'environnement et des activités récréatives.

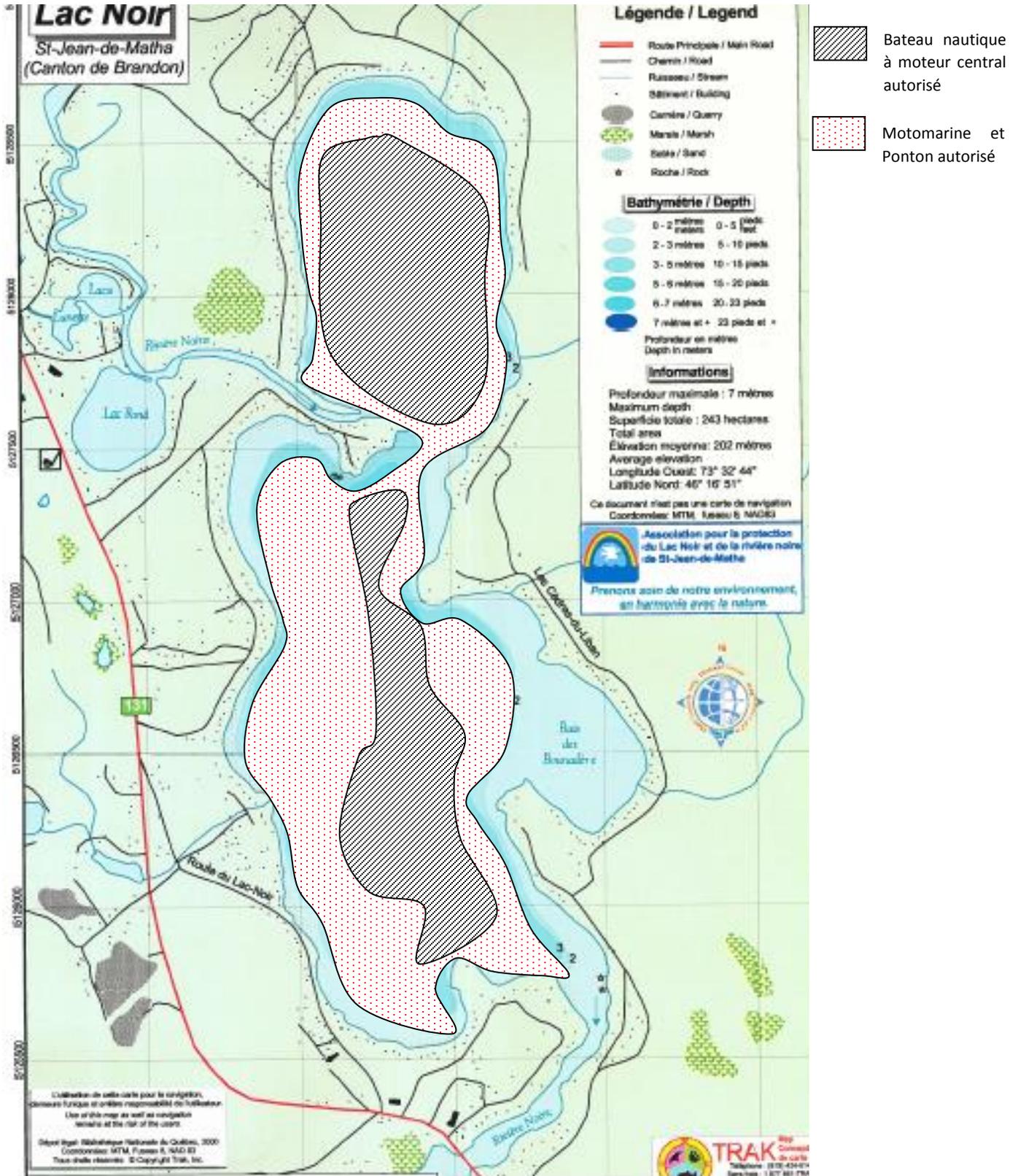


Figure 15: Délimitations des zones permettant la pratique de certaines activités nautiques sur le Lac Noir

7. Conclusions et perspectives

La présente étude avait pour objectifs de déterminer la qualité des sédiments de fonds du Lac Noir afin de déterminer un éventuel impact des activités nautiques sur la qualité des eaux et d'émettre des recommandations pour la préservation du Lac. Le Lac Noir est un lac peu profond sur lequel une grande diversité de pratiques nautiques s'exerce. Ces pratiques vont du kayak jusqu'aux plus modernes tel le *wake-board* et le *wake-surf*. Ce dernier génère des vagues importantes dont l'énergie se dissipe après 300 mètres dans la dimension horizontale et 6 mètres dans la dimension verticale. Il apparaît avec de telles mesures que ces pratiques ont un impact environnemental majeur sur la mise ou remise en suspension des sédiments dans la colonne d'eau. Au vue des dimensions du lac Noir et des besoins nécessaires pour la pratique de ce sport, il apparaît ici que les activités de *wake-board* ne peuvent être pratiquées sur le Lac Noir. La diversité et multitude de lacs au Québec pourrait faire en sorte que ce sport nautique soit pratiqué sur des lacs avec des caractéristiques de largeur et de profondeur plus adaptées. Au vu des résultats de la présente étude, il faut en fonction des activités nautiques encadrer/restreindre ou interdire ces pratiques pour éviter des impacts irrémediables sur la qualité de l'eau et l'environnement aquatique.

Les résultats de qualité des sédiments montrent que les sédiments de fond du Lac Noir sont peu cohésifs et très fins donc facilement mobilisables. De plus ces sédiments sont un véritable réservoir à phosphore et à certains métaux lourds. Le phosphore pourrait entraîner le développement de floraisons algales (qui est un fléau de plus en plus présent sur les lacs québécois) ainsi qu'un problème de bioaccumulation des métaux lourds. Si le Lac Noir est pour l'instant considéré comme un lac mésotrophe par le MDDELCC, sa qualité pourrait se dégrader rapidement si un contrôle des activités nautiques ne s'exerce pas.

La prévention est l'approche la plus efficace pour réduire les problèmes environnementaux. Compte tenu de l'impact potentiel de la navigation motorisée sur les écosystèmes aquatiques, les activités de navigation devraient être gérées correctement. Dans un souci de compromis entre la préservation de l'environnement et les activités récréatives, il s'avère nécessaire d'établir des stratégies de gestion basées sur des données et des résultats scientifiques.

Remerciements:

L'équipe de l'université Laval tient à remercier l'ensemble des bénévoles pour leur disponibilité, le prêt et la conduite des embarcations motorisées. Les remerciements vont aussi aux plongeurs qui ont aidé dans l'installation du matériel pour les tests sur les embarcations. On remercie aussi les membres de l'association de protection de l'environnement du Lac Noir (APELN) pour leur disponibilité, informations, aide et logistique et plus particulièrement Monsieur Jean Pierre Morin, Jean Pierre Ménard et Raymond Picard.

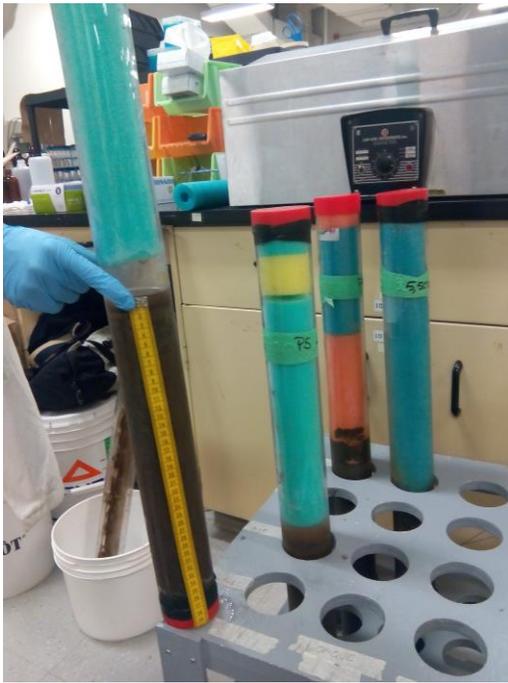
8. Références

- Ahmad, M.F., Mohamad Yusoff, M.F., Husain, M.L., Wan Nik, W.M.N., Muzathik, A.M., 2011. An investigation of boat wakes wave energy a case study of Kemaman River Estuary, in: Universiti Malaysia Terengganu International Annual Symposium. UMTAS, Kuala Terengganu. pp. 907–913.
- Ailstock, M.S., Hornor, S.G., Norman, C.M., Davids, E.M., 2002. Resuspension of sediments by watercraft operated in shallow water habitats of Anne Arundel County, Maryland. *Journal of Coastal Research* 18–32.
- Alexander, M.T., Wigart, R.C., 2013. Effect of motorized watercraft on summer nearshore turbidity at Lake Tahoe, California–Nevada. *Lake and Reservoir Management* 29, 247–256. doi:10.1080/10402381.2013.840704
- Anthony, J.L., Downing, J.A., 2003. Physical impacts of wind and boat traffic on Clear Lake, Iowa, USA. *Lake and Reservoir Management* 19, 1–14. doi:10.1080/07438140309353984
- Bastien, D., Demers, A., Dénomée P., L., Rancourt, E., 2009. Experts conseillers en environnement. Rapport final de mandat. Impacts environnementaux des embarcations motorisées et des sports nautiques sur le lac Massawippi. 123pp.
- Beachler, M. M. 2002. The hydrodynamical impacts of recreational watercraft on shallow lakes, p. 77. Master thesis. Department of civil and environmental engineering. Pennsylvania State University. 74 p.
- Beachler, M.M., Hill, D.F., 2003. Stirring up trouble? Resuspension of bottom sediments by recreational watercraft. *Lake and Reservoir Management* 19, 15–25. doi:10.1080/07438140309353985
- Bergeron, M., Corbeil, C., et Arsenault, S. 2002. Diagnose écologique du lac Saint-Augustin. Document préparé pour la municipalité de Saint-Augustin-de-Desmaures par EXXEP Environnement, Québec : 70 p.
- De Santiago Martín, A., Guesdon, G., Galvez-Cloutier, R., 2016. Boating activity and its potential impacts on inland waters. Technical report, Department of Civil and Water Engineering, Laval University, Quebec (Canada).
- Environnement Canada et Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP), 2007. Critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments au Québec et cadres d'application : prévention, dragage et restauration. 39pp.

- El Bilali, L., Rasmussen, P., Hall, G., Fortin, D., 2002. Role of sediment composition in trace metal distribution in lake sediments. *Applied Geochemistry* 17, 1171–1181.
- Galvez-Cloutier, R. et Lefrançois, P. J. 2005 a. Les sols contaminés par des métaux lourds : Distribution géochimique et technique de restauration (Première partie), Vecteur environnement, volume 38, Numéro 3, pp. 30-38.
- Garrad, P.N., Hey, R.D., 1987. Boat traffic, sediment resuspension and turbidity in a broadland river. *Journal of Hydrology* 95, 289–297.
- Gélinas, P. et Locat, J. 1988. Effets des sels déglaçants sur la qualité de l'eau de l'aquifère de Trois-Rivières-Ouest. Ministère des Transports du Québec, Direction des sols et matériaux, raort no RTQ-87-05, 120 p.
- Hilton, J., Phillips, G.L., 1982. The effect of boat activity on turbidity in a shallow broadland river. *Journal of Applied Ecology* 19, 143–150.
- Hill, D.F., Beachler, M.M., Johnson, P.A., 2002. Hydrodynamic impacts of commercial jet-boating on the Chilkat River, Alaska. Report. Department of Civil and Environmental Engineering. The Pennsylvania State University.
- Kabata-Pendias, A. and Mukherjee, A.B. 2007. Trace Elements from Soil to Human, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 550 p.
- Lane, A., Knight, P.J., Player, R.J., 1999. Current measurement technology for near-shore waters. *Coastal Engineering* 37, 343–368.
- Lenzi, M., Finioia, M.G., Persia, E., Comandi, S., Gargiulo, V., Solari, D., Gennaro, P., Porrello, S., 2005. Biogeochemical effects of disturbance in shallow water sediment by macroalgae harvesting boats. *Marine Pollution Bulletin* 50, 512–519. doi:10.1016/j.marpolbul.2004.11.038
- Maynard, S.T., 2001. Boat waves on Johnson Lake and Kenai River, Alaska. Report. U.S. Army Corps of Engineers.
- McConchie, J.A., Toleman, I.E.J., 2003. Boat wakes as a cause of riverbank erosion: a case study from the Waikato River, New Zealand. *Journal of Hydrology* 42, 163–179.
- Mercier-Blais, S., Prairie, Y., 2014. Projet d'évaluation de l'impact des vagues créées par les bateaux de type wakeboat sur la rive des lacs Memphrémagog et Lovering. 41pp.
- Nedohin, D.N., Elefsiniotis, P., 1997. The effects of motor boats on water quality in shallow lakes. *Toxicological and Environmental Chemistry* 61, 127–133. doi:10.1080/02772249709358479

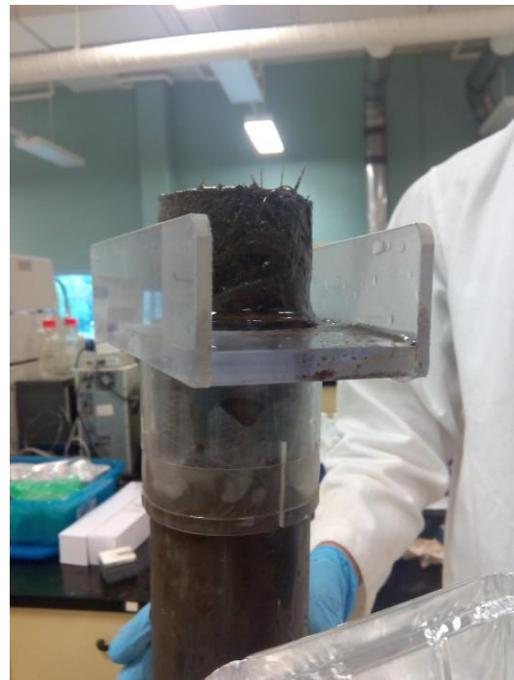
- Pilote, R., Corbeil, C. et Arsenault, S. 2002. Gestion des apports en phosphore pour améliorer la qualité de l'eau du lac Saint-Augustin. Préparé pour *La grande corvée* par EXXEP Environnement, 38 pages.
- Raymond, S., et Galvez, R., Impact de la navigation en milieu lacustre – Étude sur la remise en suspension des sédiments : Cas du lac Masson et du lac des Sables – année 2015. Université Laval. 32p.
- RD Instruments, 1989. Acoustic Doppler current profilers. Principles of operation: a practical primer. 39 p.
- Schneider Grégoire, 2001. Boues de curage des cours d'eau. Courrier de l'Environnement de l'INRA, 43, 146-147.
- Sondergaard, M., Jensen, J.P. and Jappesen, E. 2003. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes, *Hydrobiologia* (506-509): 135-145.
- Tang, X., Wu, M., Dai, X., Chai, P., 2014. Phosphorus storage dynamics and adsorption characteristics for sediment from a drinking water source reservoir and its relation with sediment compositions. *Ecological Engineering* 64, 276–284.
- Van Rijn L.C., 1989. Hand book Sediment Transport by currents and waves. Delft Hydraulics, Rep. H461, June 1989.
- Verney, R., Deloffre, J., Brun-Cottan, J.C., Lafite, R., 2007. The effect of wave-induced turbulence on intertidal mudflats: Impact of boat traffic and wind. *Continental Shelf Research* 27, 594–612. doi:10.1016/j.csr.2006.10.005
- Yousef, Y.A., McLellon, W.M., Zebuth, H.H., 1980. Changes in phosphorus concentrations due to mixing by motor-boats in shallow lakes. *Water Research* 14, 841–852.
- Wang, S., Jin, X., Zhao, H., Wu, F., 2009. Phosphorus release characteristics of different trophic lake sediments under simulative disturbing conditions. *Journal of Hazardous Materials* 161, 1551–1559.
- Wetzel, R.G. 2001. *Limnology: lake and river ecosystems*. San Diego, Academic press.
- Zoumis, T., Schmidt, A., Grigorova, L., Calmano, W., 2001. Contaminants in sediments: remobilisation and demobilisation. *Science of the Total Environment* 266, 195–202.

Annexe 1 : Échantillons de sédiments au laboratoire



✓ Carotte de sédiments prélevés dans le Lac Noir

✓ Découpage des carottes par tranches de 5 cm à 10 cm pour analyses





✓ Échantillons secs pour analyses

Annexe 2 : Bateaux testés pendant l'étude



- ✓ Bateau nautique " GLASTRON " : moteur arrière 190 hp

- ✓ Ponton 22 pieds 90 hp.





- ✓ Bateau nautique " MASTER CRAF " : moteur central 305 hp

- ✓ Ponton 18 pieds 25 hp.





- ✓ Bateau turbine " BOMBARDIER " : moto marine haute performance \pm 90 hp

- ✓ Bateau turbine " ARTIC CAT " : moto marine conventionnelle 70 hp





- ✓ Bateau à vagues " MOOMBA " pour *wake-board* & *surf* : moteur arrière ± 400 hp