



UNIVERSITÉ
LAVAL

**IMPACT DE LA NAVIGATION EN MILIEU LACUSTRE -
ÉTUDE SUR LA REMISE EN SUSPENSION DES SÉDIMENTS :
CAS DU LAC MASSON ET DU LAC DES SABLES**

Par

Sébastien Raymond, Ph.D.

Sous la direction de

Rosa Galvez-Cloutier, Ph.D, Ing.

Québec, 25 Novembre 2015

Table des matières

Liste des figures.....	3
Liste des tableaux.....	3
1. Introduction.....	5
2. Problématique.....	8
3. Site d'étude.....	9
3.1 Caractéristiques du Lac Masson.....	9
3.2 Caractéristiques du Lac des Sables.....	9
4. Méthodologie.....	10
5. Résultats.....	14
5.1 Lac Masson : du laboratoire au terrain.....	14
5.2 Lac des sables : Prise des mesures.....	14
5.2.1 Paramètres physico-chimiques.....	14
5.2.2 Impacts du passage des Wake Boat et vitesses générées.....	15
5.2.3 Variations des paramètres au niveau du fond du Lac des Sables.....	19
6. Discussion.....	22
6.1 Études antérieurs sur les impacts.....	22
6.2 Vitesses générées au fond du Lac.....	23
6.3 Oxygénation et transfert de phosphore?.....	24
7. Conclusion et perspectives.....	26
8. Remerciements.....	28
9. Références.....	29

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Photographie du "WakeBoat" utilisé pour les essais sur le Lac Masson.....	6
Figure 2: Emplacements des zones d'essais sur le Lac Masson d'après les cartes bathymétriques	10
Figure 3: Emplacements des zones d'essais sur le Lac des sables d'après les cartes bathymétriques ...	11
Figure 4: Photographie de l'équipement au fond du Lac.....	12
Figure 5: Mesures de courant en 3 dimensions	13
Figure 6: profil des paramètres physico-chimique sur l'intégralité de la colonne d'eau avant la réalisation des essais.....	15
Figure 7: Intensité moyenne (a) et vitesse générées (b) lors du passage des « Wake Boat » à différentes vitesses pour le 1 ^{er} jour d'essai	16
Figure 8: Intensité moyenne (a) et vitesse générées (b) lors du passage des « Wake Boat » à différentes vitesses pour le 2 ^{ème} jour d'essai.....	18
Figure 9: Zoom de la figure 8a sur les passages de bateaux en mode « Wake surf » pour le 2ème jour sur le Lac des Sables	19
Figure 10 : Évolution temporelle des paramètres de conductivité, d'oxygène dissous et turbidité au fond du lac des Sables pour le 2 ^{ème} jour de mesures.....	20
Figure 11 : Vue du dispositif expérimental avant (a) et 2 minutes après (b) le passage d'un « Wake Boat »	21
Figure 12: Vitesses près des sédiments en fonction de la vitesse du bateau	22
Figure 13: Abaque reliant la puissance d'un bateau et la profondeur maximale de perturbation de particules de différentes tailles.	24

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Données morphométriques et hydrologiques du Lac Masson.....	9
Tableau 2: Données morphométriques et hydrologiques du Lac des Sables.....	9
Tableau 3: Schéma des mesures de vitesse pour un essai.....	11

Termes de référence et limitations légales

L'université et son personnel ont pris les mesures raisonnables afin d'effectuer les travaux de recherche selon les règles de l'art normalement reconnus 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 de conséquences liées à l'utilisation de données ni par les demandeurs de l'étude ni par de tiers.

Référence à citer:

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. 30p.

1. INTRODUCTION

Les lacs du Québec sont des lieux de villégiatures où la population doit savoir concilier les activités récréatives, la protection de l'environnement et la réglementation en vigueur. Plus particulièrement, la navigation sur les lacs est de juridiction fédérale (Coalition Navigation, 2014). Au Canada, c'est la Loi de 2001 sur la marine marchande du Canada, et ses règlements connexes, qui réglementent les embarcations de plaisance. Par entente entre le fédéral et le gouvernement du Québec, c'est la Sûreté du Québec qui est chargée d'appliquer cette loi. Il est cependant possible pour les municipalités de dicter une réglementation relative à l'usage des bateaux sur permission du gouvernement fédéral. Il est possible de définir un code éthique quant à la protection de l'environnement des lacs. Cependant, ces « codes de conduite volontaires » nécessitent 100 % d'adhésion de la part des usagers. Elles aboutissent souvent à des débats difficiles à résoudre entre les différents acteurs impliqués, et ce, dans toutes les collectivités partout au Canada (Coalition Navigation, 2014).

Des études ont montré l'impact des embarcations à moteur sur les écosystèmes lacustres. Plusieurs facteurs affectent l'impact que peut avoir le passage d'un bateau tels que la vitesse de navigation, la force et le type de moteur, la géométrie de l'hélice, la géométrie de la coque, la cohésion des sédiments, la taille et la masse des particules formant les sédiments, la profondeur de l'eau, la stratification du lac.

La popularité des « wakeboats » (Figure 1) parmi les plaisanciers nautiques augmente continuellement. La configuration de ces embarcations peut créer des vagues substantielles qui permettent aux adeptes de « surfer » à l'arrière de leur embarcation.



Figure 1: Photographie du "WakeBoat" utilisé pour les essais sur le Lac Masson

En 2014, Mercier-Blais et Prairie mettent en évidence que les vagues produites par les embarcations de type « wakeboats » doivent parcourir, de part et d'autre du sillage, une distance de 300m ou plus, pour que l'énergie générée par celle-ci se dissipe complètement entraînant une remise en suspension des sédiments et une érosion accélérée des berges. L'action des vagues et la turbulence comme conséquence 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), ainsi que des bactéries indicatrices de contamination fécale non récente (*Escherichia coli* et coliformes totaux) (An et al., 2002) ayant un impact sur la qualité de l'eau. Ces processus sont renforcés par la récolte de macroalgues par des hélices et les coques des bateaux (Lenzi et al., 2005, 2013).

Anthony et Downing (2003) ont fait un suivi de l'effet du vent, la circulation des bateaux et de la turbidité sur la remise en suspension de sédiments et ont montré que des vitesses de vents supérieures à 20 m.s^{-1} peuvent mobiliser jusqu'à 98 % des sédiments de surface et augmenter les concentrations en phosphore (~ 100 %) et en ammoniac (niveaux toxiques) dans la colonne d'eau. Les auteurs ont aussi observé que la corrélation entre le trafic des bateaux et la remise en suspension de sédiments était faible, mais que la circulation des bateaux lourds semble exacerber la remise en suspension par le vent ce qui peut ralentir la déposition des sédiments remis en suspension. Lenzi et al. (2013) ont examiné la quantité et les distances parcourues par

les sédiments et les nutriments à partir de la perturbation des bateaux. Ils ont montré que la masse de matières en suspension était relativement importante et que le phosphore total augmentait. Également, les activités récréatives motorisées (bateau à moteur, ski nautique, jet ski) peuvent augmenter de manière significative les niveaux de pollution dans les lacs (métaux, hydrocarbures aromatiques polycycliques, etc.), ce qui représente un risque élevé pour les organismes aquatiques, particulièrement des invertébrés benthiques (Mosisch et Arthington, 2001). Cependant, l'influence des différents types de bateaux, vitesses et accélérations sur la remise en suspension des sédiments est mal comprise.

Dans ce contexte, le département de génie civil et génie des eaux de l'université Laval ont été sollicités par M. Isabelle et M. Dubitsky de « Coalition pour une navigation durable et responsable » (appelée ci-après « Coalition Navigation ») afin de réaliser des essais proposés par le professeur Y Prairie de l'Université de Montréal. Plus spécifiquement les essais concernent l'évaluation de la remise en suspension des sédiments et ainsi décrire l'impact du passage d'un « Wake boat » sur la colonne d'eau.

2. PROBLÉMATIQUE

Au Québec, l'augmentation des activités liées aux sports nautiques sur les lacs est une préoccupation pour les citoyens, associations, municipalités et riverains soucieux de l'impact écologique que ces activités récréatives produisent. La difficulté réside dans l'incapacité de trouver des solutions environnementales durables satisfaisantes en termes de réglementation. D'autre part, plusieurs s'interrogent à savoir s'il existe un lien de causalité entre le passage des embarcations motorisées et la dégradation des milieux lacustres.

Ce projet est donc défini afin de fournir des données préliminaires scientifiques avec le but ultime pour la Coalition Navigation de proposer des recommandations qui seront proposées au gouvernement fédéral afin de mieux encadrer l'usage des embarcations sur les lacs.

Le projet cherche à évaluer l'impact des embarcations motorisées de type « wakeboats ». Afin d'élargir les connaissances sur l'impact de la navigation sur les lacs et notamment la remise en suspension des sédiments, l'étude que nous proposons a pour objectifs :

- i) définir l'impact de la profondeur des jets des systèmes de propulsion des embarcations à moteur,
- ii) mesurer la vitesse générée susceptible de remettre en suspension les sédiments dans la colonne d'eau.

3. SITE D'ÉTUDE

L'étude se déroule sur deux lacs dans la région des Laurentides (Québec) : le Lac Masson (74°02'05"O – 46°02'30"N) et le Lac des Sables (74°18'08"O – 46°02'35"N).

3.1 Caractéristiques du Lac Masson

Le lac Masson se situe dans la MRC de Les pays-d'en-Haut au niveau des municipalités de Sainte-Marguerite-du-Lac Masson et d'Estérel. Les données morphométriques et hydrologiques du lac Masson sont présentées dans le tableau 1. Le Lac possède une profondeur moyenne importante de 11.3 m qui va permettre de calibrer notre protocole sans risque environnemental.

Tableau 1: Données morphométriques et hydrologiques du Lac Masson

Superficie du lac	2,5 km ²
Volume du lac	28 202 000 m ³
Profondeur maximale	47,3 m
Profondeur moyenne	11,3 m
Altitude	335,3 m
Superficie du bassin versant incluant les lacs	34,9 km ²
Temps de renouvellement	1,41 année

3.2 Caractéristiques du Lac des Sables

Le lac des Sables se situe dans la MRC Les Laurentides au niveau de la municipalité de Saint – Agathe-des-monts. Les données morphométriques et hydrologiques du lac des Sables sont présentées dans le tableau 2. Celui-ci possède une profondeur moyenne légèrement plus faible de 7.1 m mais possède des caractéristiques similaires au Lac Masson.

Tableau 2: Données morphométriques et hydrologiques du Lac des Sables

Superficie du lac	2,96 km ²
Volume du lac	21 105 000 m ³
Profondeur maximale	23.6 m
Profondeur moyenne	7.1 m
Altitude	376.6 m
Superficie du bassin versant incluant les lacs	38.8 km ²
Temps de renouvellement	0.95 année

4. MÉTHODOLOGIE

Afin de mesurer l'impact de la navigation en milieu lacustre, la vitesse et la profondeur impactée par le passage des « wake boat » ont été mesurées : Cinq vitesses ont été testées à savoir :

- 5 km/h (~3mph);
- 10 km/h (~6mph);
- Vitesse maximum: 50 à 70 km/h (~de 33 à 44 mph).
- La vitesse d'utilisation du « Wave Surf » : 19 km/h (~12 mph)
- La vitesse d'utilisation du « Wake Boat » : 29 km/h (~ 18 mph)

Au moins deux profondeurs ont été testées par lac à savoir approximativement 15 mètres et 9 mètres sur le Lac Masson et environ 6 et 5 mètres pour le Lac des sables. Les points d'acquisition des données sont visibles sur les cartes bathymétriques du Lac Masson et du Lac des Sables présentées à la figure 2 et la figure 3 respectivement.

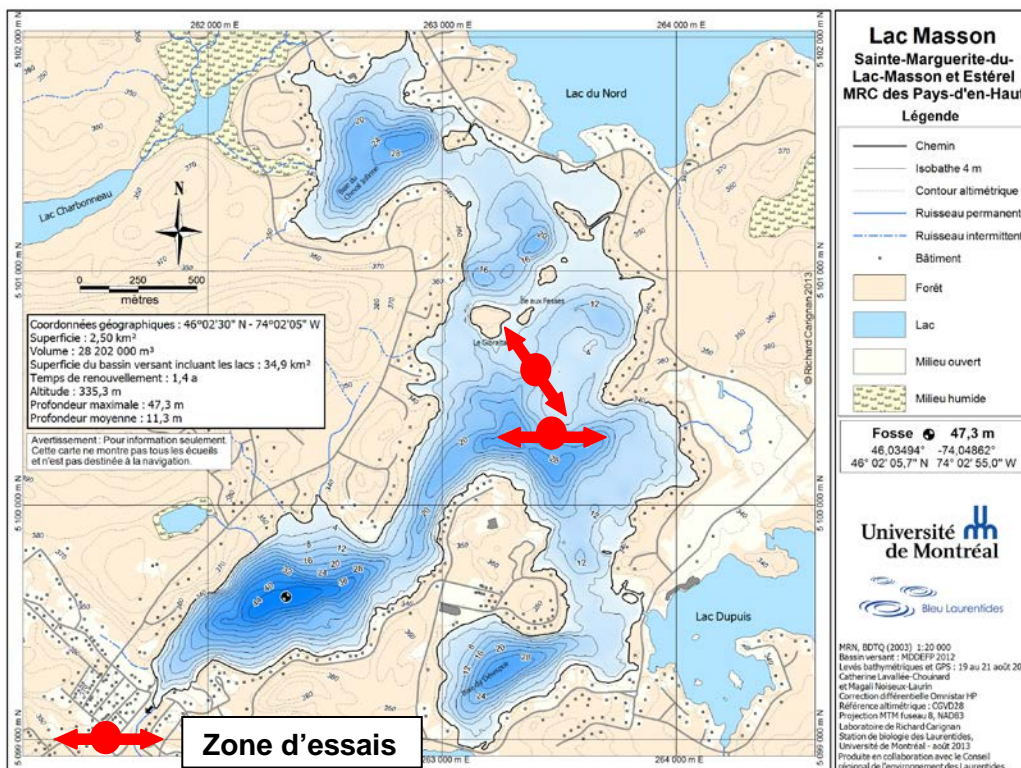


Figure 2: Emplacements des zones d'essais sur le Lac Masson d'après les cartes bathymétriques (<http://www.crelaurentides.org/dossiers/eau-lacs/atlasdeslacs?lac=12214>)

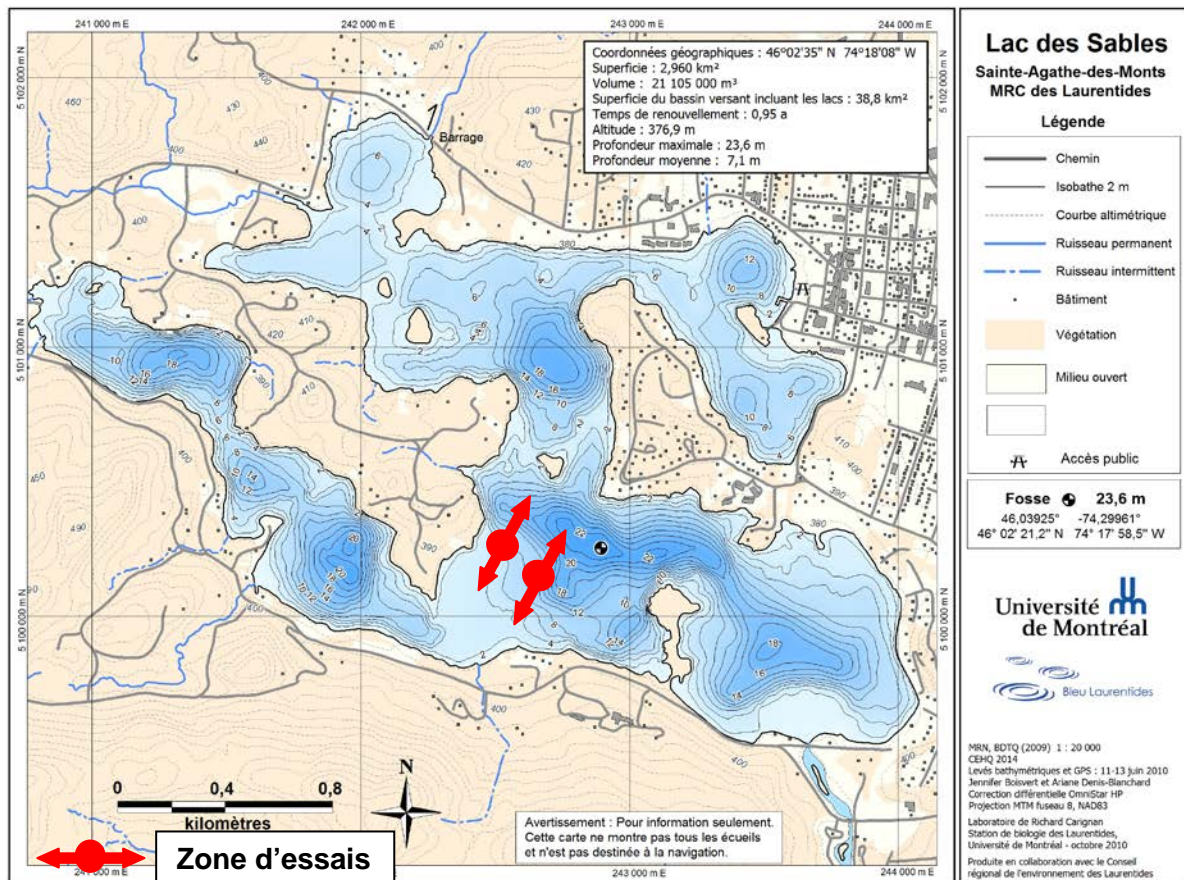


Figure 3: Emplacements des zones d'essais sur le Lac des sables d'après les cartes bathymétriques (<http://www.crelaurentides.org/dossiers/eau-lacs/atlasdeslacs?lac=12138>)

Ces données permettront d'évaluer une profondeur critique d'impact du « Wake Boat ». En fonction de vitesses générées dans la colonne d'eau, c'est à cette profondeur critique que les sédiments de fonds seront potentiellement remis en suspension. Tous les essais seront réalisés en triplicata pour obtenir des données représentatives comme le résume le Tableau 3.

Tableau 3: Schéma des mesures de vitesse pour un essai

Vitesses (km/h)	Profondeur (m)	Type de bateau	Nombre de passages par expérience
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 5 ▪ 10 ▪ max. ▪ Vitesse d'utilisation du Wave surf ▪ Vitesse d'utilisation du Wake boat 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 10 ▪ 20 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wake boat 	3 fois

Les essais se sont réalisés pendant les mois d'Aout à Septembre, un profil de température a été réalisé pour savoir s'il y a stratification des lacs.

Le travail de terrain a compris l'installation d'un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) qui se définit comme (Figure 4) :

- Acoustic - Utilisation d'une onde sonore ;
- Doppler - Effet Doppler appliqué à la mesure de vitesse. L'effet Doppler permet de transmettre des sons à des fréquences fixes et en écoutant les échos retournés par des réflecteurs dans l'eau.
- Current - Mesure de la vitesse de l'eau ;
- Profiler - Mesure d'un profil de vitesse, pas d'une vitesse ponctuelle.



Figure 4: Photographie de l'équipement au fond du Lac

Suite à l'enregistrement des données, un travail d'extraction et d'exploitation des données stockées dans les ADCP a été réalisé pour la détermination de la vitesse du courant et de l'intensité de la perturbation.

L'ADCP est un instrument qui calcule les composantes de la vitesse de l'eau à différentes profondeurs dans la colonne d'eau, dans les 3 directions (Figure 5). L'appareil permet de calculer la vitesse et 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

écoutant 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 (Figure 5). 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.

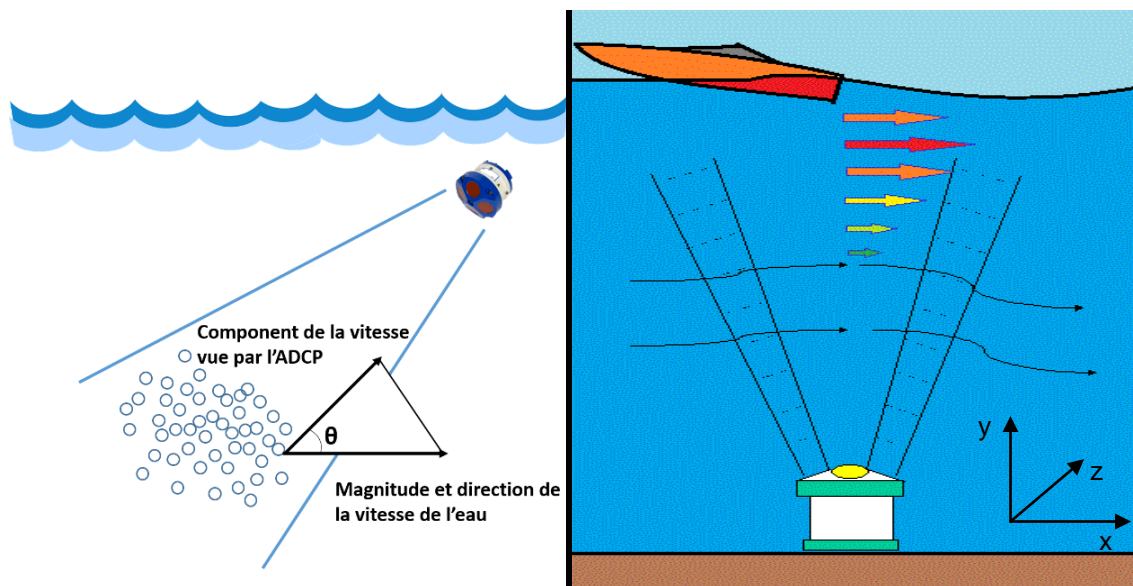


Figure 5: Mesures de courant en 3 dimensions (RD Instrument, 1989)

Les technologies acoustiques sont non intrusives et elles ont l'avantage de fournir simultanément et au même endroit des informations sur la topographie du fond, le champ de vitesse (Thorne et al., 2002).

5. RÉSULTATS

Les résultats seront présentés par lac pour différencier les deux campagnes de terrain et focaliser sur les intérêts de chacune.

5.1 Lac Masson : du laboratoire au terrain

Le Lac Masson a été le 1^{er} lac à participer à ce type de recherche. Il a été un élément majeur du développement du protocole de mise en place de l'instrumentation. En effet les seuls essais effectués ont eu lieu en laboratoire avec des conditions contrôlées aussi bien au niveau de la calibration de l'appareil que de la mise en place de l'instrumentation. Cependant les essais en milieu naturel sont souvent différents et beaucoup plus difficiles de ceux en laboratoire et ces essais n'ont fait que confirmer l'adage.

Malgré tout, les essais sur le Lac Masson ont été indispensables pour comprendre les dysfonctionnements du protocole. Des difficultés de calibration de l'appareil sont apparues sur le bateau ainsi que des difficultés de mise en place de l'instrumentation liées aux vents et à la complexité du dispositif.

Suite aux deux essais réalisés, nous avons pu optimiser la calibration de l'appareil et nous avons également amélioré la mise en place de l'instrumentation en simplifiant le dispositif. Celle-ci était finalement plus rapide et sécuritaire.

5.2 Lac des sables : Prise des mesures

Une fois le protocole optimisé, les premières mesures ont été réalisées sur le lac des Sables.

5.2.1 Paramètres physico-chimiques

La figure 6 présente les profils de température, de turbidité et d'oxygène dissous dans la colonne d'eau pour le 2^{ème} jour de campagne de mesures sur le lac des Sables. Les résultats des deux jours de mesures sont similaires.

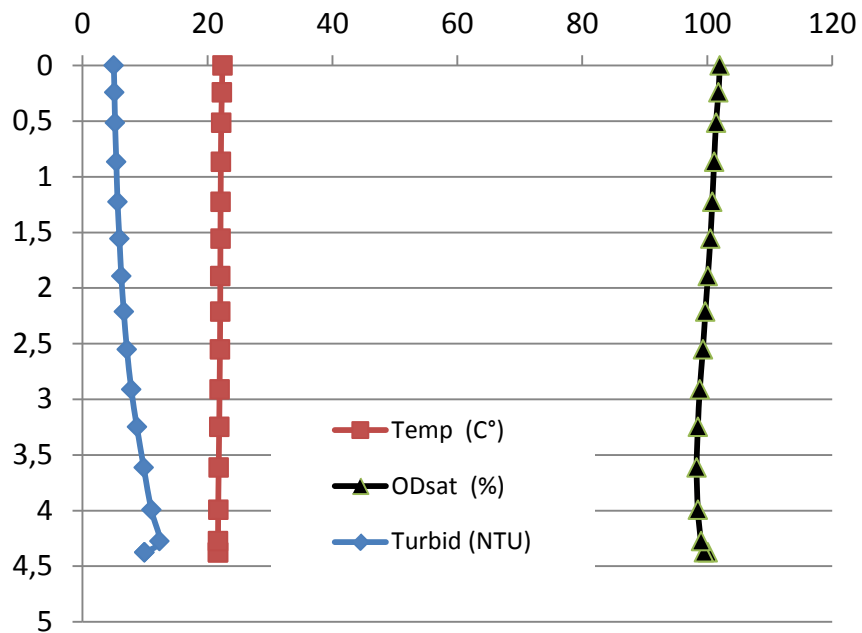


Figure 6: profil des paramètres physico-chimique sur l'intégralité de la colonne d'eau avant la réalisation des essais

Les valeurs sont également semblables à celles mesurées en 2006 par le Conseil Régional de l'Environnement des Laurentides (CRE Laurentides). Dans leurs travaux, il apparaît que le lac est stratifié durant l'été pour des valeurs de profondeur oscillant entre 7m et 9m. Nos essais se sont déroulés en eaux peu profondes, il n'y a donc pas de stratification apparente à cette profondeur. Il est à noter que dans le cas de cette étude, ce n'est pas tant la valeur de ces paramètres qui est intéressante mais leurs variations s'il y a lieu, lors d'un passage de « Wake Boat ».

Les essais se sont donc déroulés dans de bonnes conditions car il n'y a pas eu d'impact de la stratification.

5.2.2 Impacts du passage des « Wake Boat » et vitesses générées

Les figures 7 et 8 présentent les résultats des journées d'essais sur le lac des Sables pour le 1^{er} et le 2^{ème} jour respectivement. On peut ainsi distinguer les résultats de l'intensité moyenne en nombre de coups (figure 7a et 8a) qui caractérise l'intensité de la perturbation et va ainsi

permettre de répondre sur la profondeur d'impact. Les figure 7b et 8b vont quant à elles indiquées les vitesses générées par le passage des « Wake Boat ».

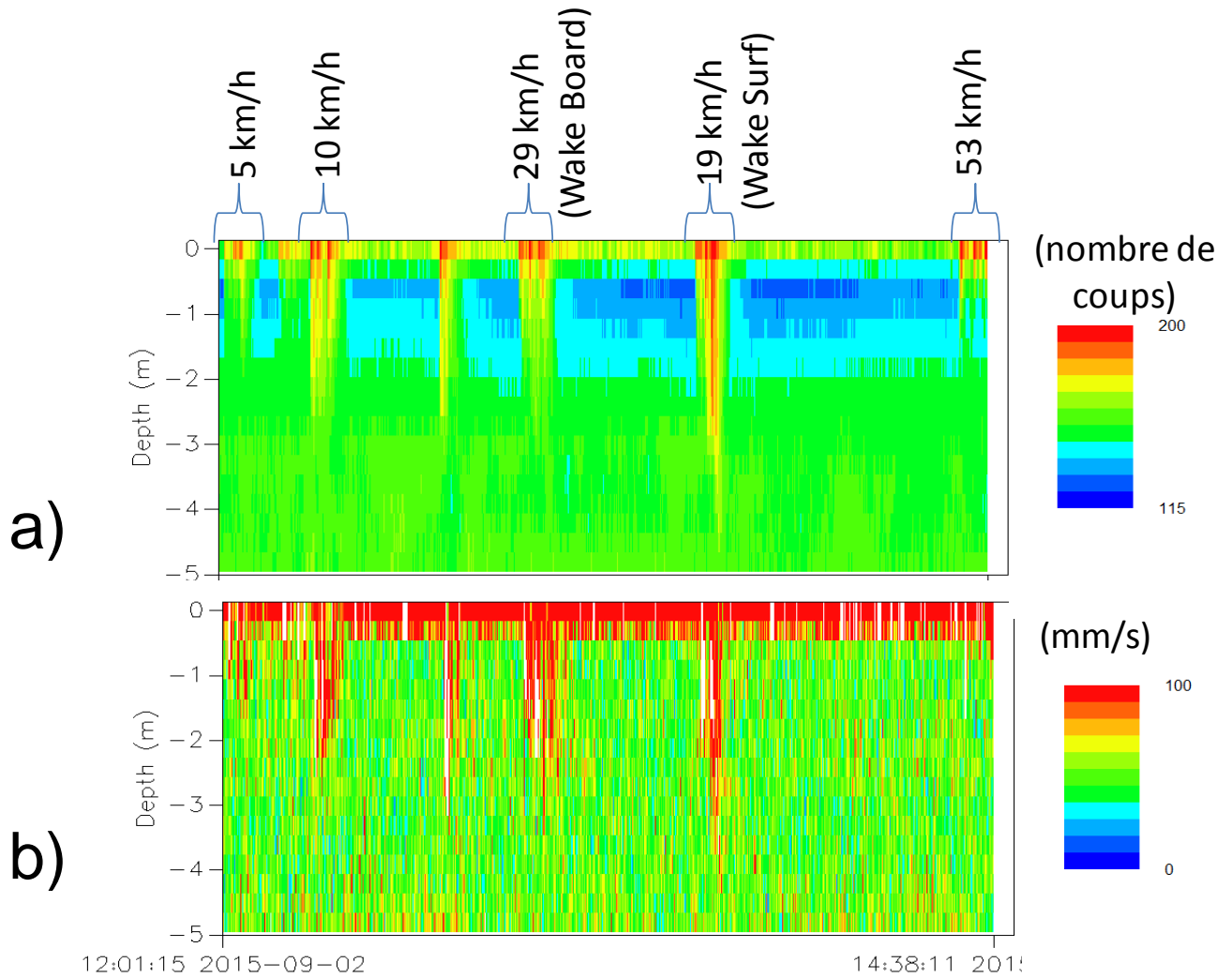


Figure 7: Intensité moyenne (a) et vitesse générées (b) lors du passage des « Wake Boat » à différentes vitesses pour le 1^{er} jour d'essai

Le nombre de coups nous permet de définir l'intensité de la perturbation, il correspond au nombre d'impulsions reçu par l'appareil. Plus le nombre de coup est important, plus il y a de réflecteurs dans l'eau donc plus le nombre d'impulsions reçues par l'ADCP est grand. La figure 5a permet de constater que chaque passage de « Wakeboat » à un impact sur la colonne d'eau. A 5 km/h et à 53 km/h les impacts sur la colonne d'eau ne dépassent pas le mètre de profondeur. Pour des vitesses de 10 km/h et/ou en mode d'utilisation « Wake Board » (~ 29 km/h) la profondeur impactée est d'environ 2.5m. L'impact le plus important est pour le mode « Wake Surf » (~ 19 km/h) qui est mesuré jusqu'à 4.5m.

La figure 7b présente les profondeurs auxquelles des vitesses d'au moins 0.1 m/s sont générées dans la colonne d'eau par le passage des bateaux. La corrélation avec la figure 7a est évidente. Les passages de bateaux à des vitesses faibles (5 km/h) ou élevées (~50 km/h) engendrent des vitesses d'au moins 0.1 m/s jusqu'à environ 1 m de profondeur. Pour des passages des bateaux à 10 km/h et en utilisation « Wake Boat » et « Wake Surf », les vitesses de 0.1 m/s sont générées dans la colonne d'eau jusqu'à environ 4.5m :

- > 2m pour 10km/h
- > 2.5m pour le « Wake Board »
- >3m pour le « Wake surf »

Les figures 8a et 8b représentent les mêmes indicateurs que les figures 7a et 7b pour le 2^{ème} jour respectivement. Les impacts sont d'ailleurs similaires mais ils apparaissent plus clairs et plus marqués. En effet les ajustements réalisés le 2^{ème} jour au niveau des conditions de navigation étaient optimales : les ballastes arrières étaient remplies et il y avait 3 personnes dans le « Wake Boat » pour ajouter du poids. Ceci permettait de ressembler plus à la réalité car ces embarcations sont souvent un lieu de fête où il n'est pas rare d'avoir plus de six ou sept personnes à bord. Les passages les plus impactants sur la colonne d'eau sont clairement lors des passages en mode « Wake Surf » et « Wake Board ». La profondeur d'impact peut dépasser dans ces cas les 4.5 mètres.

Les premiers pics qui apparaissent sont dus au passage au-dessus de notre instrumentation d'un ponton (100HP) à une vitesse de 15 km/h. Même si ce n'est pas la finalité de l'étude, on peut remarquer pour ce type de bateau motorisé, une profondeur d'impact allant jusqu'à 2.20m.

Les passages de bateaux en utilisation « Wake surf » et « Wake Board » génèrent des vitesses dans la colonne d'eau de 0.1 m/s jusqu'à 4.5m et 4m respectivement. Il est donc potentiellement possible pour ces bateaux de remettre en suspension des sédiments de 50 µm jusqu'à 4.2 à 5m de profondeur. En effet les pics descendent jusqu'à une profondeur de 4.5m mais il existe une zone 'aveugle' due à la résonance de l'émetteur (RDI, 1996) d'environ 20cm à 30cm au-dessus de l'ADCP ainsi que la taille de l'appareil qui est d'environ 40cm. On peut donc raisonnablement penser que les vitesses de 0.1m/s peuvent être générées jusqu'à 5m.

Contrairement au 1^{er} jour, les ballastes ont été remplies pour les passages de « Wake Board ». On s'aperçoit de la différence et de l'importance de ce facteur dans la profondeur impactée. En effet avec des ballasts pleins l'impact est beaucoup plus important : 4m au lieu de 2 à 3m.

La vitesse maximum générée dans la colonne d'eau atteint des valeurs de 0.6 m/s à 0.7 m/s lorsque que le bateau passe en mode « Wake surf ». Il y a donc un impact faible (environ 1m) pour des vitesses de bateaux faibles ou élevées et un impact fort (jusqu'à 4.5m à 5m) pour des vitesses de bateaux intermédiaires.

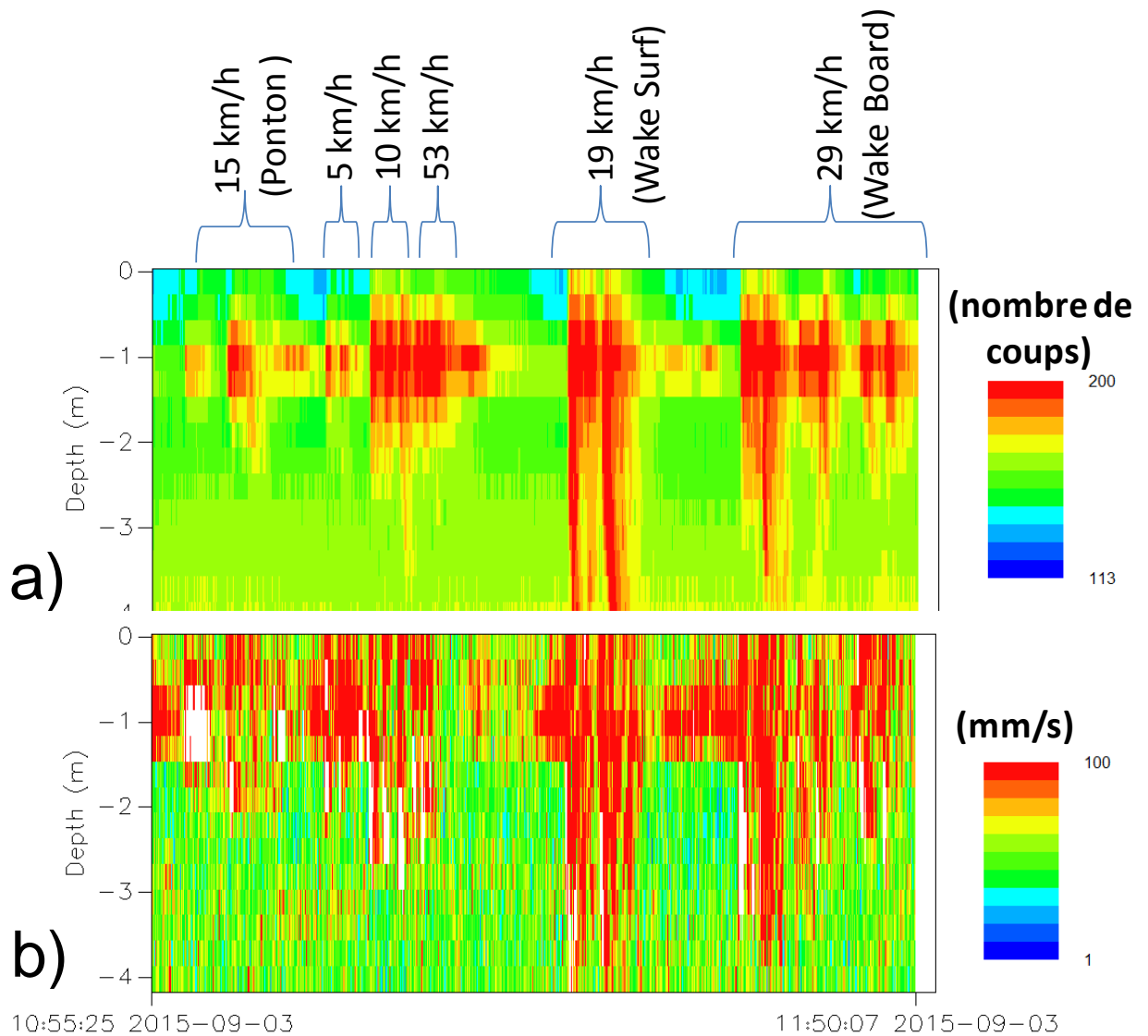


Figure 8: Intensité moyenne (a) et vitesse générées (b) lors du passage des « Wake Boat » à différentes vitesses pour le 2^{ème} jour d'essai

Il est également important de connaître la durée de cet impact dans la colonne d'eau. La figure 9 permet de mesurer la durée pour le passage en « Wake Surf » pour le 2^{ème} jour. Chaque

passage est encadré en noir et mesure entre 72 et 80 secondes. On voit nettement dans le 3^{ème} passage le déplacement de la perturbation dans la colonne d'eau et dans le temps.

L'impact individuel de chaque passage est donc bien marqué et dure quelques minutes.

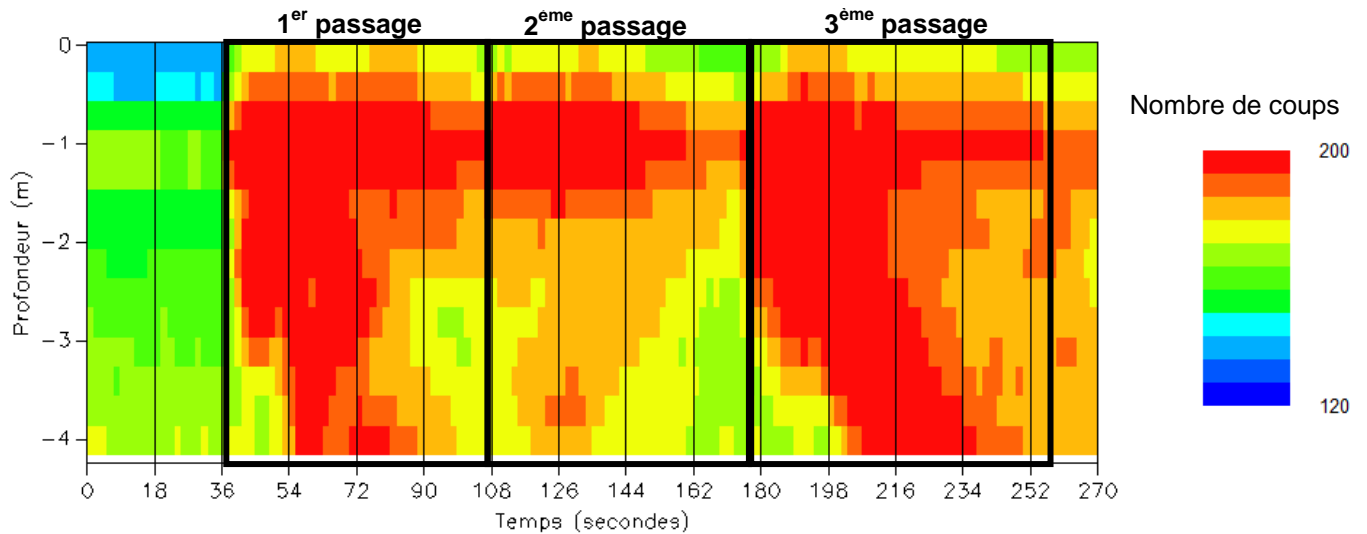


Figure 9: Zoom de la figure 8a sur les passages de bateaux en mode « Wake surf » pour le 2^{ème} jour sur le Lac des Sables

5.2.3 Variations des paramètres au niveau du fond du Lac des Sables

A l'aide des sondes multiparamétriques, les paramètres de turbidité (Figure 10a), de conductivité (Figure 10b) et d'oxygène dissous (Figure 10c) ont été mesurés au fond du Lac des Sables lors des passages de bateaux. La figure 10 présente ainsi le comportement de ces 3 paramètres dans le temps pour le 2^{ème} jour de mesures sur le lac des sables. Cette journée est sélectionnée car elle est celle dont l'impact sur la colonne d'eau est la plus marquée. Les valeurs absolues des paramètres nous importent ici moins que leurs variations. Cependant on n'observe aucune variation significative de ces paramètres et ceci malgré le fait que des vitesses de 0.1 m/s soient générées à ces profondeurs.

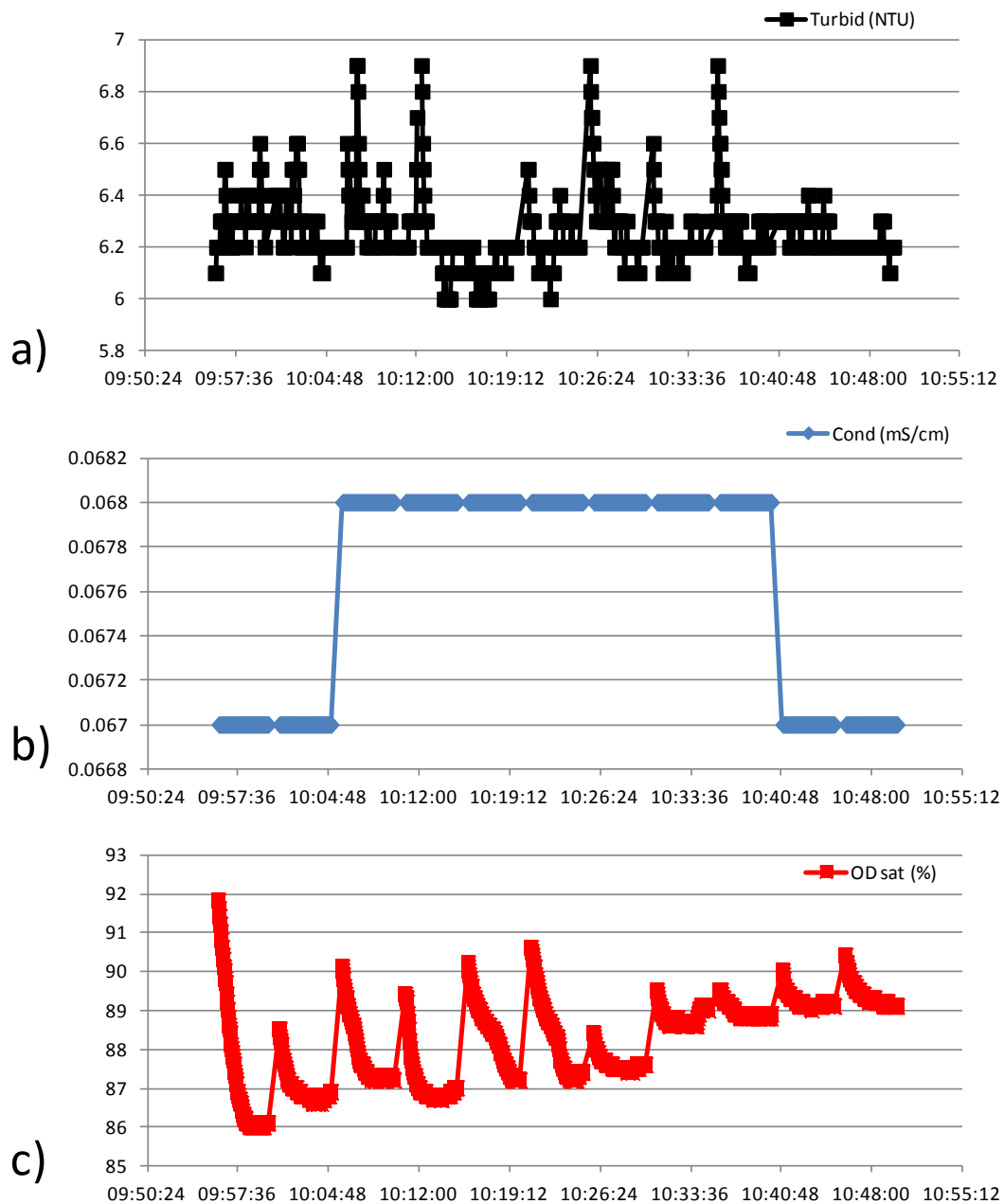


Figure 10 : Évolution temporelle des paramètres de conductivité, d'oxygène dissous et turbidité au fond du lac des Sables pour le 2^{ème} jour de mesures

Ceci a été confirmé par les observations du plongeur visible sur la figure 11. Celui-ci ne remarquait pas de matière en suspension suite au passage des bateaux. L'hypothèse la plus plausible veut que la granulométrie des sédiments du fond soit majoritairement supérieure à 50 μm dans cette partie du lac et nécessite donc des vitesses supérieures à 0.1 m/s pour remettre en suspension les sédiments dans l'eau.



Figure 11 : Vue du dispositif expérimental avant (a) et 2 minutes après (b) le passage d'un « Wake Boat »

6. DISCUSSION

Il est important de comparer les résultats obtenus avec ceux obtenus par d'autres chercheurs lors d'études antérieures.

6.1 Études antérieures sur les impacts

Avec d'autres méthodologies et/ou technologies, plusieurs auteurs ont mesurés l'impact des bateaux à moteur. Ces bateaux ont des forces allant jusqu'à 150 HP. Ils mesurent ainsi un relargage de phosphore pour des profondeurs de 1.5 à 3.4 m (Youssef, 1980) et estime que les bateaux sont responsables d'au minimum 17% des apports totaux en phosphore durant la saison estivale (James et al, 2002). Anthony et Downing (2003) observent une augmentation de la turbidité pour des profondeurs de lac variant de 127 à 188 cm. Ils n'estiment que les bateaux circulant à basse vitesse de même que ceux à haute vitesse induisent peu de déplacement d'eau en profondeur comparativement à une vitesse intermédiaire comme le montre la figure 12. Les résultats indiquaient même qu'une vitesse de 30 mph (~48 km/h) avait moins d'impact qu'une vitesse de 3 mph (~5km/h).

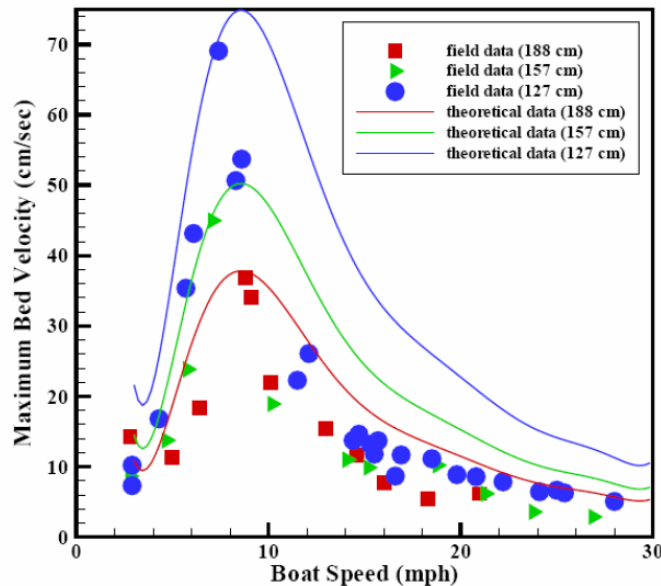


Figure 12: Vitesses près des sédiments en fonction de la vitesse du bateau d'après Anthony et Downing (2003)

Ces études sont en adéquation avec nos résultats en ce qui concerne les impacts à des vitesses de passages faibles et élevés. Les profondeurs mesurées sont quant à elles inférieures à celles de la présente étude mais les bateaux utilisés à l'époque n'avaient des

forces que de 150HP. Ils ne disposaient pas également des technologies pour mesurer en temps réel les perturbations.

Certaines études ont remarqué que les moteurs hors-bords avaient plus d'impacts que les moteurs internes à vitesse intermédiaire, et inversement à haute vitesse. Mais de manière générale, les trois types de moteurs (hors-bord, interne et moto marine) provoquaient un déplacement d'eau près du fond similaire (Anthony et Downing, 2003). Ces conclusions sont à nuancer car les profondeurs des tests sont très faibles (inférieure à 2 mètres). Au vue de nos résultats et au vue des évolutions des bateaux au cours de ces 15 dernières années, il est raisonnable de penser que les différents types de moteurs vont impacter différemment le lac en termes de profondeur et de vitesse.

On n'était pas en présence de stratification du lac aux profondeurs testées mais celle-ci pourrait limiter l'impact des embarcations sur les sédiments par sa résistance au mélange (James et al., 2002).

6.2 Vitesses générées au fond du Lac

La mise en suspension des sédiments est corrélée à la vitesse en profondeur, soit faible à des vitesses de circulation des bateaux faibles ou élevée, et maximale à des vitesses intermédiaires. Beachler (2002) indique de manière théorique, et les observations le confirment, que la vitesse de déplacement d'une particule de sable de 0,3 mm est d'environ 25 cm/s alors qu'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.

Les résultats montrent que cela peut être atteint lorsque les « Wake Boat » circule en mode « Wake Surf » soit environ 12 mph (~ 19 km/h).

Plusieurs modèles ont été développées reliant la profondeur, la force des moteurs et la taille des particules (figure 13). Cependant ces travaux s'arrêtent à une puissance de 200HP ce qui empêche de corréler les résultats mais offre des perspectives intéressantes pour des recherches futures. Ils permettent cependant de confirmer que plus la puissance du bateau est élevée, plus la vitesse de l'eau au fond est importante et donc que l'on remobilise les sédiments à des profondeurs plus grandes. Cette étude utilisant des bateaux beaucoup plus puissants, il

est donc logique que les impacts obtenus atteignent des profondeurs encore pas observées à savoir 5 m.

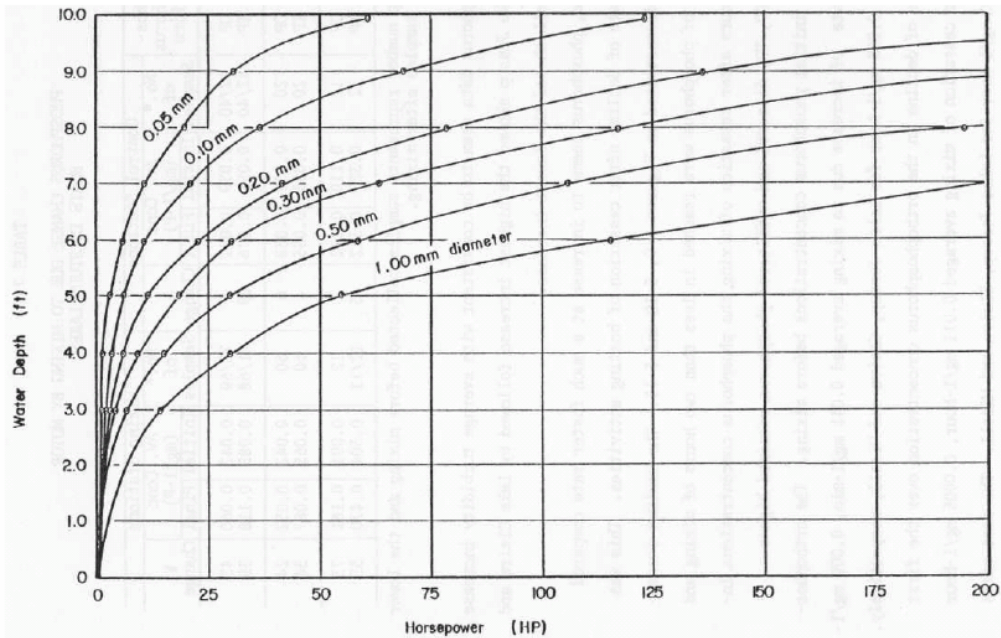


Figure 13: Abaque produit par Youssef (1978) reliant la puissance d'un bateau (HP) et la profondeur maximale de perturbation de particules de différentes tailles d'après Beachler (2002).

Il est important de mentionner que si la vitesse de déplacement est atteinte près du fond, cela n'implique pas nécessaire la mise en suspension de la particule. La vitesse de déplacement doit être en effet supérieure à la vitesse de sédimentation décrite par la loi de Stokes.

6.3 Oxygénation et transfert de phosphore?

Une remarque qui revient régulièrement par les usagers de « Wake Boat » concerne l'oxygénation du fond du lac. Les passages répétés en « Wake Boat » seraient ainsi utiles et bénéfiques pour la santé du lac en introduisant de l'oxygène dans la colonne d'eau. Cette théorie est évidemment fautive. Les sédiments de fonds sont souvent des réservoirs à phosphore dans les lacs, lors de passage de bateau, s'ils sont remis en suspension alors les embarcations pourraient même contribuer significativement au transfert de phosphore dans la colonne d'eau. En condition oxygène, un paramètre qui semble important dans la libération du PO_4^{3-} est le pH. Plus celui-ci est élevé (basique), plus la libération de PO_4^{3-} est élevée (James et al 2002). De même, la température semble favoriser la libération de phosphore, ce qui laisse supposer la dominance des processus biologiques sous des conditions riches en oxygène. En

condition oxygène, le brassage serait donc favorable à la mise en disponibilité du PO_4^{3-} contenu dans les sédiments. Ainsi ceci permet d'envisager des scénarios qui pourraient être néfastes à la santé des lacs. On pourrait dire que plusieurs lacs québécois réunissent les conditions défavorables suivantes:

- Passage de nombreux bateaux de type « Wake Boat »
- Sédiments riches en Phosphore
- Faible profondeur donc pas de stratification et riche en oxygène sur toute la colonne d'eau ou introduit par les « Wake Boat »
- pH élevé dû à la présence de Myriophylle à épis (Raymond et Galvez, 2014)
- Température élevée

L'ensemble de ces conditions favorise le relargage de phosphore en conditions oxygène et favorise donc le phénomène d'eutrophisation ou de vieillissement accéléré du lac.

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La navigation de plaisance sur les lacs du Québec est en perpétuelle augmentation. Les pratiques de navigation se diversifient (« wake Surf », « wake board ») et la puissance des moteurs des embarcations ne cessent de croître. Ces pratiques ont un impact non négligeable sur la colonne d'eau et augmenteraient la turbidité de l'eau, la concentration en phosphore total et orthophosphate, l'oxygène dissous près du fond et donc le potentiel d'oxydo-réduction, et réduiraient la consolidation des sédiments. Le relargage de phosphore total et surtout d'orthophosphate peut être un facteur dans le vieillissement prématuré des lacs qu'on appelle l'eutrophisation. Cette augmentation de phosphore dans la colonne d'eau peut également favoriser le développement de cyanobactéries qui devient un problème majeur dans de nombreux lacs québécois.

La présente étude avait pour objectifs d'évaluer les impacts dans la colonne d'eau par les « Wake Boat » qui sont des embarcations motorisées d'une puissance supérieure à 350 HP. Ces impacts ont ici été mesurés pour la 1^{ère} fois à l'aide de la technologie ADCP. Cet outil permet de déterminer la profondeur et les vitesses générées par le passage des bateaux en temps réel. Le caractère novateur de l'étude repose donc aussi bien sur la nature des embarcations et pratiques testées que de la technologie employée pour quantifier les impacts. Les questions auxquelles il sera possible de répondre concernent la profondeur de l'impact et la vitesse générée dans la colonne d'eau.

En termes de profondeur, les résultats permettent de montrer qu'à faibles et fortes vitesses d'embarcations (5 km/h, 10 km/h et vitesse maximum), il y a un impact limité sur la colonne d'eau n'excédant pas 1 à 2m de profondeur. Les pratiques de « Wake surf » et « Wake board » quant à elles, impactent la colonne d'eau jusqu'à 5 m. Aucune étude n'avait encore quantifié un impact d'une telle ampleur sur les lacs. Cette perturbation a également été quantifiée dans le temps, permettant de déterminer une durée variant entre 70 et 80 secondes.

Concernant les vitesses, celles-ci sont supérieures à 0.1 m/s jusqu'à 5m pour le « Wake surf » et 4 m pour le « Wake board ». Ces vitesses sont théoriquement susceptibles de transporter des particules de 50 µm de diamètre.

Dans les conditions étudiées, la pratique du « Wake Surf/Wake board » a donc le potentiel d'impacter la colonne d'eau et de remobiliser des sédiments de fond jusqu'à 5m pendant plus d'une minute.

Ces résultats sont à coupler avec ceux obtenus par Mercier-Blais et Prairie en 2014 qui évaluaient que lors des pratiques de « Wake surf » et « Wake board », la vague de surface créée avait besoin d'au moins 300m pour perdre son énergie et ne plus éroder les berges.

Ainsi pour une navigation responsable et durable il est nécessaire de prévenir l'impact des bateaux sur l'érosion des berges, sur la remise en suspension des sédiments, et donc la mise en disponibilité du phosphore dans la colonne d'eau. Il faut donc préconiser une pratique des « Wake Surf » et « Wake Board » (avec des bateaux de 350HP) dans des zones de 600m de large et d'au moins 5m de profondeur. Si une de ces conditions n'est pas respectée, il faut alors limiter/encadrer ces pratiques de navigation car elles impactent l'environnement. Les autres pratiques de navigations de plaisance sont à surveiller également avec une vitesse ne dépassant pas 5km/h dans les zones inférieures à 2 m de profondeur et 10 km/h dans les zones de 2 à 5 m.

L'étude ici se limite qu'au « Wake Boat », cependant pour avoir un panel complet des impacts, d'autres types d'embarcations motorisées devront être considérées et étudiées. Les mêmes essais peuvent être faits avec tous les types d'embarcation (motorisée ou non) et ceci aussi bien sur la colonne d'eau que sur l'impact latéral de surface et berges. Il serait ainsi possible d'avoir une vision claire et complète des impacts et permettrait de recommander les conditions de navigation lacustres qui ne seraient peu ou pas impactantes.

Afin de compléter cette étude, il serait également intéressant de prendre en compte l'achalandage sur le lac. Il a été ici déterminé qu'un passage de « Wake Boat » seul avait un impact sur une durée de plus d'une minute, mais que se passe-t-il si un autre passage a lieu dans la même zone et dans la même minute? Y a-t-il un effet cumulatif des passages et donc une profondeur d'impact encore plus importante? Ceci impliquerait des conditions de navigations différentes, devrait on augmenter encore la profondeur, former les conducteurs pour ne pas passer aux mêmes endroits, limiter le nombre maximum d'embarcation sur le lac?

Cette étude est un premier pas important dans la compréhension des impacts des embarcations motorisées permettant une navigation responsable et durable. Il reste cependant encore beaucoup d'éléments et conditions à explorer afin d'avoir un portrait complet sur les types

d'embarcations, les pratiques, l'achalandage sur les lacs du Québec et du Canada et les impacts sur la qualité de l'eau et l'érosion des berges.

8. REMERCIEMENTS

Ce projet pionnier a bénéficié de l'appui financier de plusieurs commanditaires que nous tenons à remercier:

- **Lac-Masson à Estérel et Ste-Marguerite-du-Lac-Masson**
 - MRC des Pays d'en-Haut
 - Municipalité d'Estérel et son maire Jean Pierre Neveu
 - Municipalité de Ste-Marguerite-du-Lac-Masson et son maire Gilles Boucher

- **Lac-des-Sables à Ste-Agathe-des-Monts**
 - Ville de Ste-Agathe-des-Monts
 - Comité du débarcadère, de l'Association pour la protection de l'environnement du Lac-des-Sables

- Une mention toute particulière à l'ensemble des bénévoles qui ont gentiment donné leur temps, leur matériel et qui ont permis la réalisation de cette étude:
 - Roger Martel (membres du conseil municipal d'Estérel)
 - Christine Corriveau (membres du conseil municipal d'Estérel)
 - Luc Lafontaine (Directeur Général de la ville d'Estérel)
 - Daniel Piché
 - Maxime Piché
 - Marc Legault
 - Gilles Morin

- Nous remercions également Mr Jean-Pierre Dumoulin d' Xplorations Sans limites qui a plongé pour permettre la bonne installation de l'instrumentation ainsi que pour le partage de ces connaissances et sa sympathie.

9. RÉFÉRENCES

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.

An, Y.J., Kampbell, D.H., Peter Breidenbach, G., 2002. *Escherichia coli* and total coliforms in water and sediments at lake marinas. *Environmental Pollution* 120, 771–778.

Anthony, J., et J. Downing. 2003. Physical impacts of wind and boat traffic on Clear Lake, Iowa, USA. *Lake and Reservoir Management* 19: 1-14.

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.

Coalition Navigation, 2014. Faits saillants : Vision de la Coalition. Publié le 22 octobre 2014. Consultable en ligne : <http://coalitionnavigation.ca/fr/>.

CRE Laurentides, 2006. Rapport physicochimique, Lac des Sables , Été 2006.

Gélinas, R., Bouchard Valentine, M., Roy., M-S., 2005. Impacts des embarcations motorisées sur la libération du phosphore à partir des sédiments : revue de la littérature et analyse pour le lac Saint-Augustin. Ville de Québec - Service de l'Environnement. 46pp.

James, W., J. Barko, H. Eakin, et P. Sorge. 2002. Phosphorus budget and management strategies for an urban Wisconsin lake. *Lake and Reservoir Management* 18: 149 - 163.

Lane, A., Knight, P.J., Player, R.J., 1999. Current measurement technology for near-shore waters. *Coastal Engineering* 37, 343–368.

Lenzi, M., Finoia, M.G., Gennaro, P., Mercatali, I., Persia, E., Solari, J., Porrello, S., 2013. Assessment of resuspended matter and redistribution of macronutrient elements produced by boat disturbance in a eutrophic lagoon. *Journal of Environmental Management* 123, 8–13.

Lenzi, M., Finoia, 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.

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.

Mosisch, T.D., Arthington, A.H., 2001. Polycyclic aromatic hydrocarbon residues in the sediments of a dune lake as a result of power boating. *Lakes and Reservoirs: Research and Management* 6, 21–32.

Raymond, S., Galvez, R., 2014. Diagnostic environnemental du Lac Sergent : caractérisation des sédiments et qualité de l'eau de surface – année 2014. Université Laval. 45pp.

RD Instruments, 1989. Acoustic Doppler current profilers. Principles of operation: a practical primer. 39 p.

RD Instruments, 1996. Acoustic Doppler current profilers. Principles of operation: a practical primer. San Diego CA.

Thorne P.D., Hanes, D.M., 2002. A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes. *Continental Shelf Research*, 22 (4), 603–632.

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.

Youssef, Y. A., W. M. McLellan, et H. H. Zebuth. 1980. Changes in phosphorus concentrations due to mixing by motor-boats in shallow lakes, p. 841-852, *Water Research*.

Zoumis, T., Schmidt, A., Grigorova, L., Calmano, W., 2001. Contaminants in sediments: remobilisation and demobilisation. *Science of the Total Environment* 266, 195–202.