

**SUIVI DU RÉGIME THERMIQUE DU LAC
LABERGE (QUÉBEC) DURANT L'ÉTÉ 2009**

**SUIVI DU RÉGIME THERMIQUE DU LAC LABERGE (QUÉBEC)
DURANT L'ÉTÉ 2009**

RAPPORT DE RECHERCHE # R1129

Par

**André St-Hilaire
Anik Daigle**

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

**Février ~~2009~~
2010**

Référence à citer :

St-Hilaire, A. et A. Daigle. 2010. Suivi du régime thermique du lac Laberge (Québec) durant l'été 2009. Rapport de recherche R1129 INRS-ETE. V+23 pages.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	III
LISTE DES TABLEAUX	IV
LISTE DES FIGURES	V
1. INTRODUCTION	1
2. MÉTHODOLOGIE.....	3
2.1 TRAVAUX SUR LE TERRAIN	3
2.2 ANALYSES DES DONNEES	4
3.0 RÉSULTATS	7
3.1. TEMPÉRATURES DE L'EAU	7
3.3. ANALYSE DES CORRÉLATIONS	16
4. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	21
5. RÉFÉRENCES.....	23

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE LES TEMPÉRATURES DE L'EAU ET LES VARIABLES
HYDROCLIMATIQUES. LES CORRÉLATIONS SIGNIFICATIVES ($p < 0.05$) SONT EN GRAS. 17

TABLEAU 2. COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE LES DIFFÉRENCES DE TEMPÉRATURES DE L'EAU ET LES
VARIABLES HYDROCLIMATIQUES. LES CORRÉLATIONS SIGNIFICATIVES ($p < 0.05$) SONT EN GRAS..... 18

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. TEMPÉRATURES DE L'EAU DANS LE BASSIN NORD-EST.	7
FIGURE 2. DIFFÉRENCES DE TEMPÉRATURES DE L'EAU ENTRE LA SURFACE ET LE MILIEU, LA SURFACE ET LE FOND DANS LE BASSIN NORD-EST.	8
FIGURE 3. TEMPÉRATURES DE L'EAU DANS LE BASSIN CENTRAL.	9
FIGURE 4. DIFFÉRENCES DE TEMPÉRATURES DE L'EAU ENTRE LA SURFACE ET LE MILIEU, LA SURFACE ET LE FOND DANS LE BASSIN CENTRAL.	10
FIGURE 5. TEMPÉRATURES MOYENNES JOURNALIÈRES MESURÉES À ENVIRON 1,5 M DE PROFONDEUR, DANS LES BASSINS DU NORD-EST ET SUD-EST.	11
FIGURE 6. TEMPÉRATURE DE L'AIR (MOYENNES JOURNALIÈRES).	12
FIGURE 7. VECTEURS DE VENTS À LA STATION DE L'AÉROPORT JEAN-LESAGE POUR LA PÉRIODE DU 4 JUILLET AU 30 SEPTEMBRE 2009. LES FLÈCHES POINTENT DANS LA DIRECTION DU VENT ET LA LONGUEUR DES VECTEURS DONNE LA VITESSE.	13
FIGURE 8. SÉRIES CHRONOLOGIQUE DE A) VITESSE ET B) DIRECTION DU VENT.	14
FIGURE 9. PRÉCIPITATIONS TOTALES JOURNALIÈRES.	15
FIGURE 10. NIVEAUX D'EAU MOYENS JOURNALIERS.	16
FIGURE 11. NOMBRE DE RICHARDSON CALCULÉ À PARTIR DES SÉRIES CHRONOLOGIQUES DE TEMPÉRATURE ET DE VENT.	20

1. INTRODUCTION

La ville de Québec a annoncé durant l'automne 2009, des travaux d'aménagement à la Base de Plein air de Ste-Foy, avec une emphase sur le réaménagement des rives du Lac Laberge.

Ce lac est un système fermé, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de décharge ni d'entrée d'eau de surface connue, mis à part le ruissellement de surface sur un petit bassin versant. Dans le passé, des suivis ponctuels de la qualité d'eau du lac a permis entre autres d'identifier des concentrations de chlorure élevées au fond du lac. Ces suivis ont aussi permis de conclure qu'une bonne partie du lac subit des périodes de stratification importantes, pouvant mener à des événements anoxiques près du fond. Les concentrations de phosphore moyennes varient entre 20 et 50 µg/L, ce qui correspond à l'intervalle de concentrations associé à un lac méso-eutrophe ou faiblement eutrophe, selon les lignes directives canadiennes pour la protection de la vie aquatique (Conseil canadien des ministres de l'environnement, 2004).

Les aménagements proposés incluent entre autres le déplacement de la plage située actuellement sur la rive nord du lac vers la rive sud afin qu'elle puisse accueillir jusqu'à 1200 personnes. Un important projet de revégétalisation des rives est aussi prévu. Dans ce contexte, on peut émettre l'hypothèse que la qualité de l'eau du lac risque de changer. En particulier, le régime thermique du lac risque d'être modifié. En effet, une bordure végétale plus large et plus dense risque de diminuer la quantité de radiation solaire incidente sur certaines parties du lac, ce qui pourrait amener une diminution de la température moyenne, ou à tout le moins, une baisse des températures maximales.

Afin de compléter les suivis ponctuels existants, le présent projet consiste à faire un suivi à haute fréquence des températures de l'eau. Ce suivi pourra être éventuellement répété durant et après la période de réaménagement de la plage et des infrastructures de la base de plein air.

Les objectifs spécifiques du projet incluent :

-
- 1) Faire le suivi des températures dans les trois bassins principaux du lac (nord-est, central et sud-ouest)
 - 2) Faire une première caractérisation de la stratification et du mélange dans le lac et décrire la relation entre la structure thermique verticale du lac et certaines variables explicatives potentielles (vent, précipitation, niveau d'eau souterraine).
 - 3) Faire le suivi des températures près de la berge sud du lac. Ces berges seront les sites qui subiront le plus de changements suite aux aménagements proposés.

2. METHODOLOGIE

2.1 Travaux sur le terrain

Trois chaînes de thermographes ont été déployées dans la partie la plus profonde de chacun des bassins. Chacune des chaînes comportait trois thermographes : un situé entre 1 m et 1.5 m sous la surface, un second situé à 2.5 m sous le premier et un dernier placé 65 cm au-dessus de l'ancre du mouillage. Il est important de noter que la profondeur initiale du mouillage a probablement été modifiée légèrement durant les premiers jours de déploiement, durant lesquels l'ancre a pu caler dans les sédiments de quelques centimètres. Les mouillages étaient tenus à la verticale par une bouée submergée. Un deuxième ancrage a été mis en place à partir d'une ligne de fond afin d'augmenter la stabilité du mouillage et rendre son repêchage plus difficile pour les non-initiés. Les profondeurs maximales aux sites de mouillage ont varié entre les trois sites, mais étaient de l'ordre de 5 à 7 m. Le mouillage central était le plus profond, avec une profondeur maximale de 7 m.

De plus, deux thermographes ont été placés à environ 1,5 m de profondeur près de la rive sud du lac. Le premier a été mouillé dans le bassin sud-ouest, tandis que le second a été déployé dans le bassin nord-est.

Tous les thermographes ont été déployés le 3 juillet 2009. Ils ont été récupérés le 30 septembre 2009. Lors de la récupération, il a été impossible de retrouver le mouillage du bassin sud-ouest.

Les niveaux de la nappe phréatique ont été mesurés dans un puits situé approximativement à 10 m au nord de l'emplacement actuel de la plage, à l'orée de la zone boisée. Une jauge à pression hydrostatique de marque HOB0 a été placée à 8,0 m de profondeur à partir du sommet du puits. Une jauge à pression barométrique (HOB0), qui mesure aussi la température de l'air, a été placée à l'intérieur du puits, sous le capuchon. Les pressions ont été converties en niveau d'eau après avoir soustrait la pression barométrique et les niveaux de la nappe ont été enregistrés à toutes les 15 minutes du 5 août au 30 septembre 2009.

Les données de précipitations ont été mesurées par la ville de Québec à l'aide d'un pluviomètre à auget basculant (#U14B) situé à moins de 1,5 km au nord-ouest du Lac Laberge (46,798° latitude, -71,302° longitude). Les précipitations totales ont été enregistrées à toutes les cinq minutes.

Finalement, les données de vent (vitesse et direction) couvrant la période de suivi ont été mesurées par Environnement Canada à l'aéroport Jean-Lesage de Québec, situé approximativement à 4 km au nord-ouest (à vol d'oiseau) du lac Laberge.

2.2 Analyses des données

Les relations entre les mesures de températures et les variables explicatives potentielles ont été évaluées dans un premier temps par une analyse visuelle et l'analyse des corrélations. Afin de diminuer le bruit dans les séries, ces corrélations ont été calculées sur les moyennes (totaux dans le cas de la pluie) journalières. De simples indices de stratification ont aussi été calculés. Il s'agit de la différence entre les températures moyennes journalières de deux thermographes (c'est-à-dire celui placé dans l'épilimnion, près de la surface et celui placé dans le métalimnion, immédiatement en dessous, de même que la différence entre le thermographe à la surface et celui près du fond) de chaque mouillage. La corrélation entre ces indices et les variables explicatives potentielles a aussi été calculée.

Il existe plusieurs méthodes quantitatives pour caractériser la stratification d'un lac. Une approche fréquemment utilisée consiste à calculer le nombre de Richardson (Wetzel, 1983). Ce nombre (R_i) sans dimension est un rapport entre le travail qui doit être fait contre la gravité qui stabilise la colonne d'eau (l'eau plus dense étant au fond) et l'énergie turbulente (apportée par le cisaillement entre la couche d'air déplacée par le vent et la couche d'eau à la surface). Plus ce nombre est faible, plus la colonne d'eau est mélangée. Ce nombre est défini comme suit :

$$R_i = \frac{g \left(\frac{d\rho}{dz} \right)}{\rho \left(\frac{du}{dz} \right)} \quad (1)$$

Où g est l'accélération gravitationnelle, ρ est la densité de l'eau en kg/m^3 , z est la profondeur (m) et u est la vitesse du vent (m/s). Étant donné que seulement trois thermographes étaient placés sur chaque mouillage et qu'une seule vitesse de vent a été obtenue (à 10 m d'altitude), il est difficile de calculer les gradients de densité et de vitesse pour résoudre l'équation (1). Cette équation a donc été modifiée pour permettre une estimation de Ri , appelé « Bulk Richardson number » (Ri_b , Padisak et Reynolds, 2003) qui peut être utilisée pour un réservoir initialement fortement stratifié qui subit un mélange causé par le vent :

$$Rib = \frac{\Delta\rho g h_m}{\rho(u^*)^2} \quad (2)$$

Où $\Delta\rho$ est la différence de densité entre le métalimnion et l'épilimnion, h_m est la profondeur (m) à laquelle la densité moyenne de la colonne d'eau est observée et u^* est la vitesse de cisaillement. Cette dernière peut être calculée comme suit :

$$u^* = \left| 0.0013 \frac{\rho_a}{\rho} U_{10}^2 \right|^{0.5} \quad (3)$$

Où ρ_a est la densité de l'air (kg/m^3) et U_{10} est la vitesse du vent (m/s) à 10 m.

La profondeur h_m est difficile à estimer à partir de seulement 3 mesures de température dans la colonne d'eau. Dans un premier temps, il faut convertir les températures de l'eau en valeurs de densité. Pour ce faire, l'algorithme de Tanaka et al. (2001) a été utilisé. Selon ces auteurs, la relation entre la densité de l'eau et la température est :

$$\rho = a_5 \left[1 - \frac{(T_{eau} + a_1)^2 (T_{eau} + a_2)}{a_3 (T_{eau} + a_4)} \right] \quad (4)$$

où

$$a_1 = -3.983035$$

$$a_2 = 301.797$$

$$a_3 = 522528.9$$

$$a_4 = 69.34881$$

$$a_5 = 999.974590$$

$$T_{eau} = \text{Température de l'eau}$$

Les valeurs de densité ayant été ainsi obtenues, un polynôme d'ordre 3 est utilisé pour estimer la densité en fonction de la profondeur pour chaque jour afin d'estimer la profondeur h_m . Il faut noter que cette relation n'est pas nécessairement représentative du profile de densité. Ce dernier devrait suivre la forme du profile de température qui n'est certes pas linéaire, mais le nombre de thermographes par mouillage est insuffisant pour confirmer qu'une fonction cubique est la meilleure approximation.

Plusieurs valeurs de R_{ib} ont été identifiées dans la littérature comme étant critiques. Les valeurs inférieures à 0.25 sont considérées comme indicatrices de mélange Par Wetzel (1983). Des valeurs de R_{ib} inférieures à 1 indiquent que le cisaillement dû au vent dépasse la stabilité générée par le gradient de densité (Vincent-Leite et al., 1989).

3.0 RÉSULTATS

3.1. Températures de l'eau

Les températures enregistrées par les trois thermographes déployés dans le bassin nord-est sont présentées à la figure 1. Les températures près de la surface et au milieu sont les plus variables. La période la plus chaude (température en surface >25°C) s'étend du 12 au 23 août, avec le maximum enregistré en surface atteignant 27,4°C, le 17 août. Par la suite, les températures en surface et au milieu ont diminué rapidement pour atteindre 22°C le 28 août.

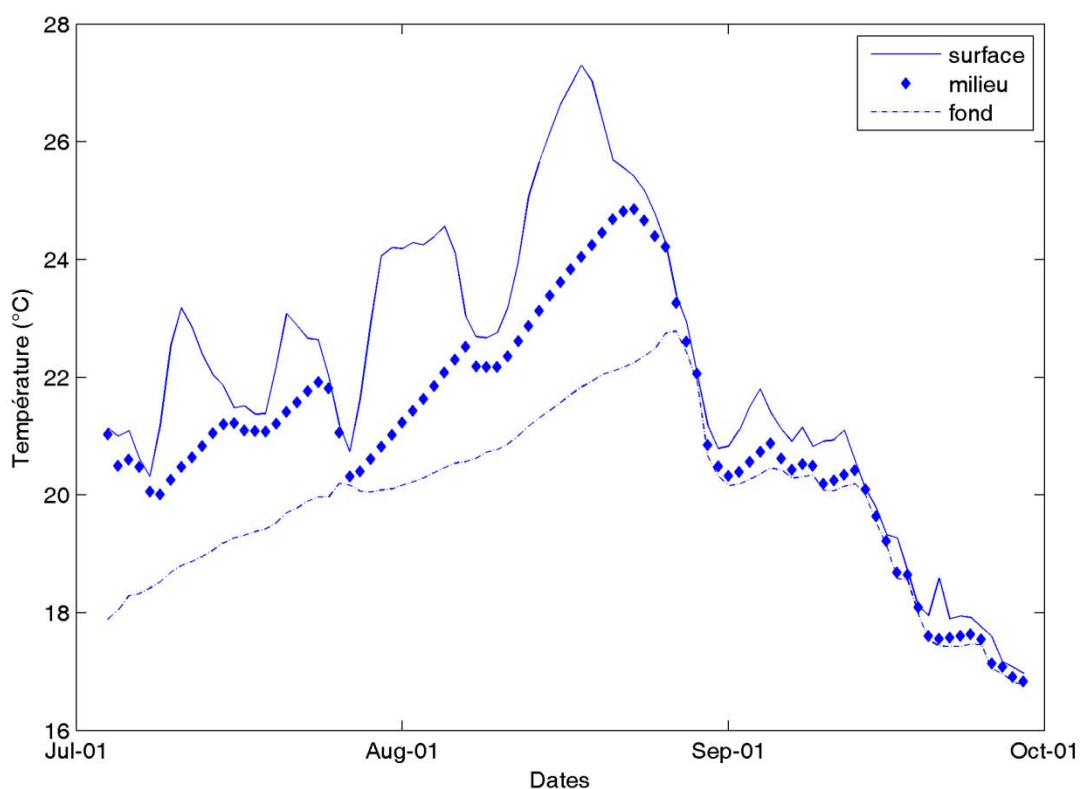


Figure 1. Températures de l'eau dans le bassin nord-est.

La température au milieu de la colonne d'eau est en moyenne 1°C plus faible qu'à la surface, avec un écart maximum de 3,3°C le 22 août (figure 2). Durant le mois de septembre, la

différence de température entre les deux premiers thermographes est presque toujours inférieure à $0,5^{\circ}\text{C}$ (figure 2).

La température près du fond est moins bruitée. On assiste d'abord à une augmentation graduelle de 18°C à 22°C (figure 1). Après la baisse subite de près de trois degrés à la fin août, la température du fond demeure constante durant la première moitié de septembre, puis chute jusqu'à $16,8^{\circ}\text{C}$ à la fin de la période d'échantillonnage (figure 1). La différence maximale de température entre la surface et le fond est $5,5^{\circ}\text{C}$, atteinte le 22 août. Les différences entre la surface et le fond sont de l'ordre du demi-degré Celsius en septembre (figure 2).

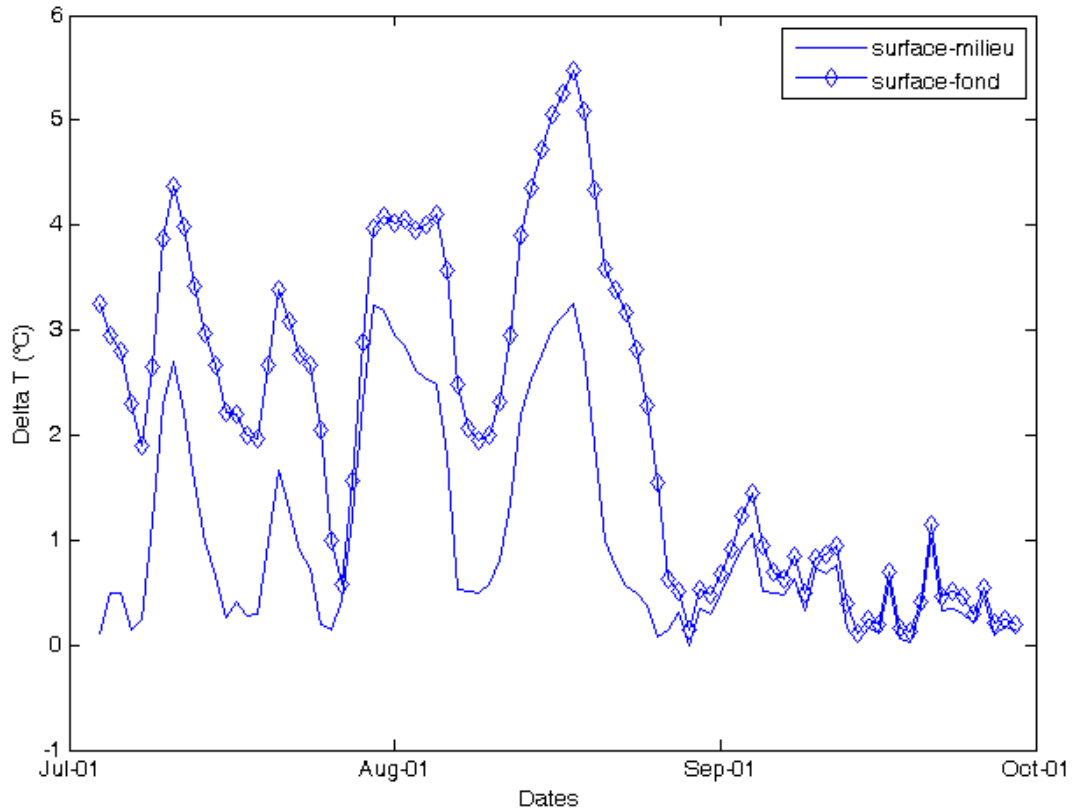


Figure 2. Différences de températures de l'eau entre la surface et le milieu, la surface et le fond dans le bassin nord-est.

Les températures mesurées au mouillage du bassin central sont présentées dans la figure 3. En surface, l'évolution temporelle est très similaire à celle du bassin nord-est. Le maximum atteint

est 26,5°C, le 17 août. Les températures en surface ont dépassé 25°C entre le 14 et le 21 août (figure 3). On constate que les températures du fond, mesurées à une profondeur plus grande que celle du bassin nord-est, sont moins variables. Elles augmentent de manière monotone de 12,6 à 15,9 °C durant la période d'échantillonnage.

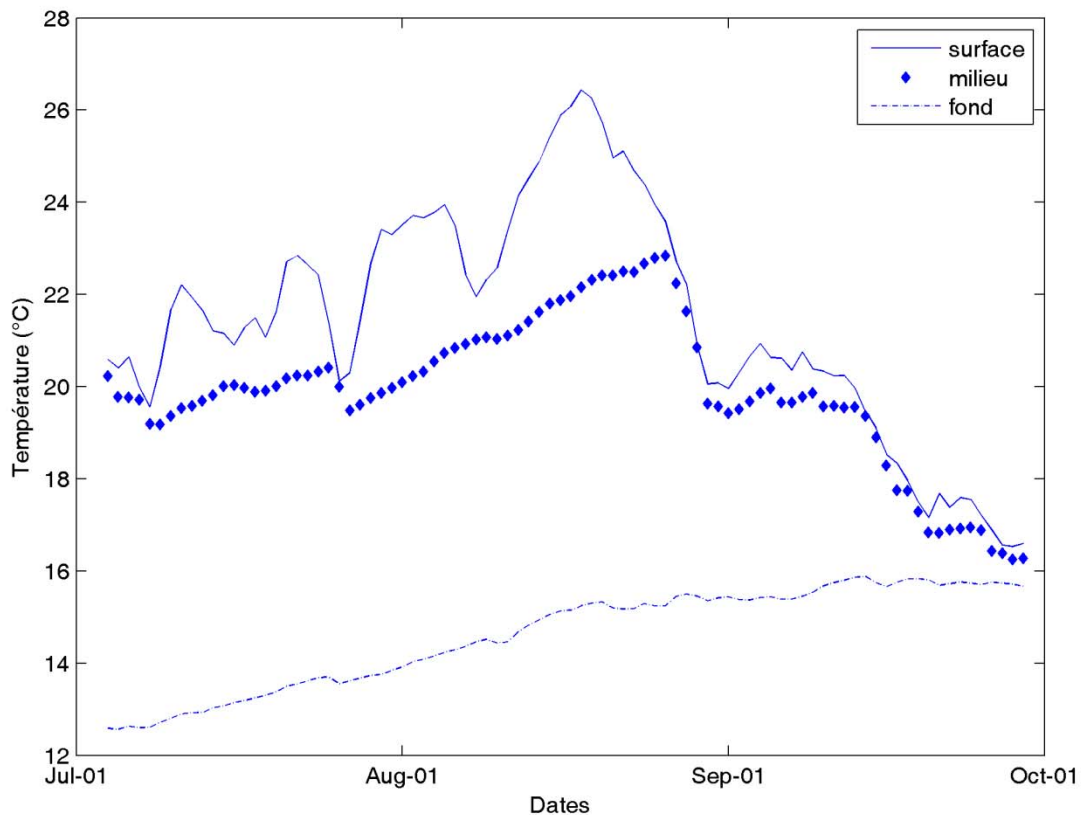


Figure 3. Températures de l'eau dans le bassin central.

Les différences de température entre la surface et le milieu de la colonne d'eau varient entre 0 et 4,3°C (figure 4). Durant le mois de septembre, ces différences ont une moyenne de 0,53°C. La différence entre la surface et le fond atteint 11,2 °C le 17 août. Une stratification relativement importante entre la surface et le fond (>2°C) demeure présente jusqu'à la mi-septembre à ce site.

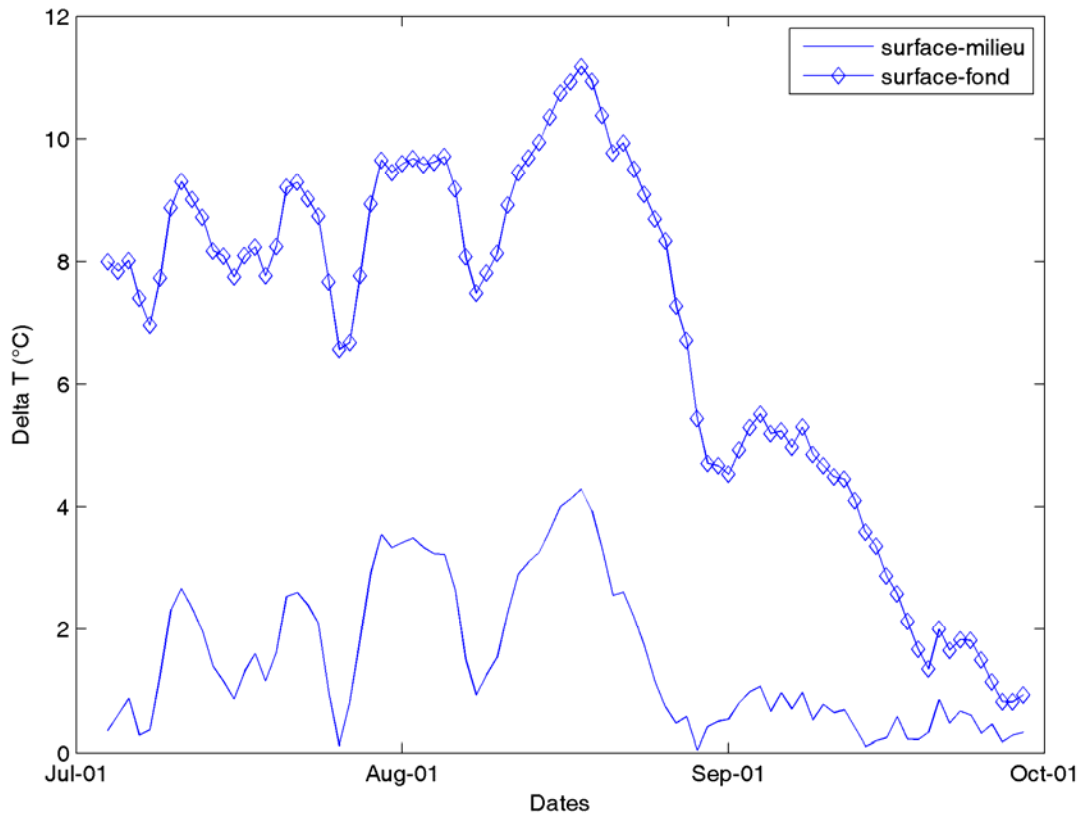


Figure 4. Différences de températures de l'eau entre la surface et le milieu, la surface et le fond dans le bassin central.

Les températures mesurées près des berges du lac Laberge (figure 5) sont très similaires pour les deux sites. Les moyennes journalières ont atteint 26,7 et 27,1 °C le 17 août, près de la berge de bassin nord-ouest et du bassin sud-est, respectivement. La différence moyenne entre les deux stations est 0,15 °C durant la période de suivi.

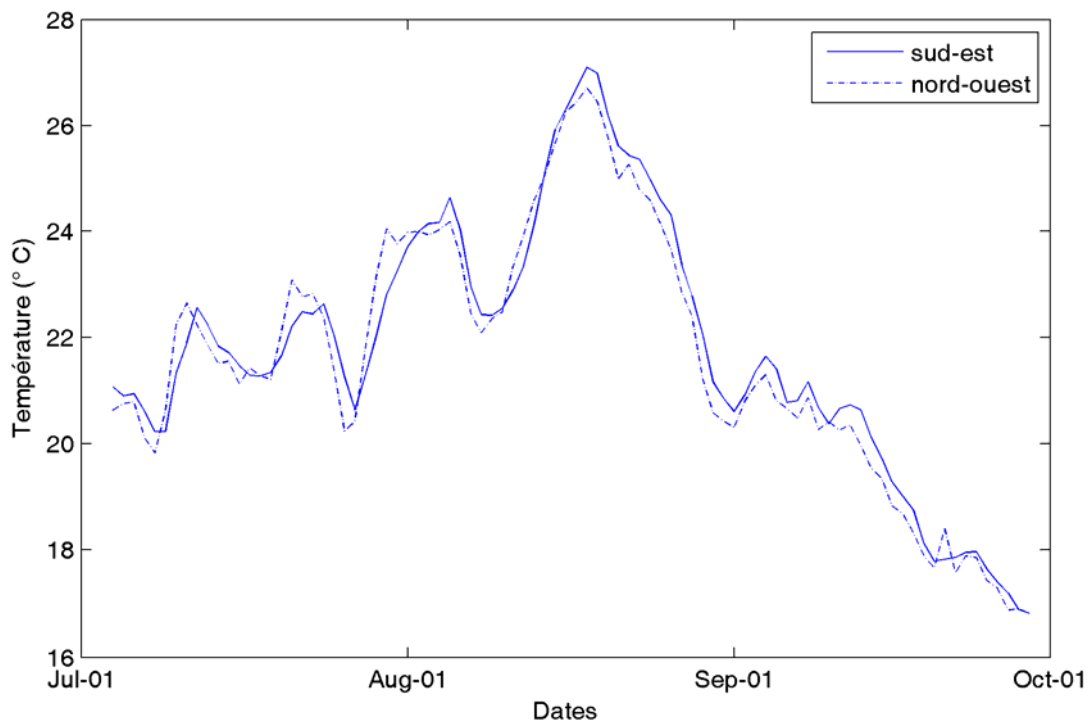


Figure 5. Températures moyennes journalières mesurées à environ 1,5 m de profondeur, dans les bassins du nord-est et sud-est.

3.2 Autres variables

Les températures de l'air sont d'abord présentées puisqu'elles jouent un rôle primordial dans le bilan thermique des masses d'eau (figure 6). Le mois de juillet a été plus frais que le mois d'août avec une moyenne de 21,8°C. La température moyenne du mois d'août est 24,6°C tandis que celle du mois de septembre est 19,4°C. La température moyenne de l'air s'est maintenue au-dessus de 25°C entre le 12 et le 23 août, avec un maximum de 27,3°C le 17 août.

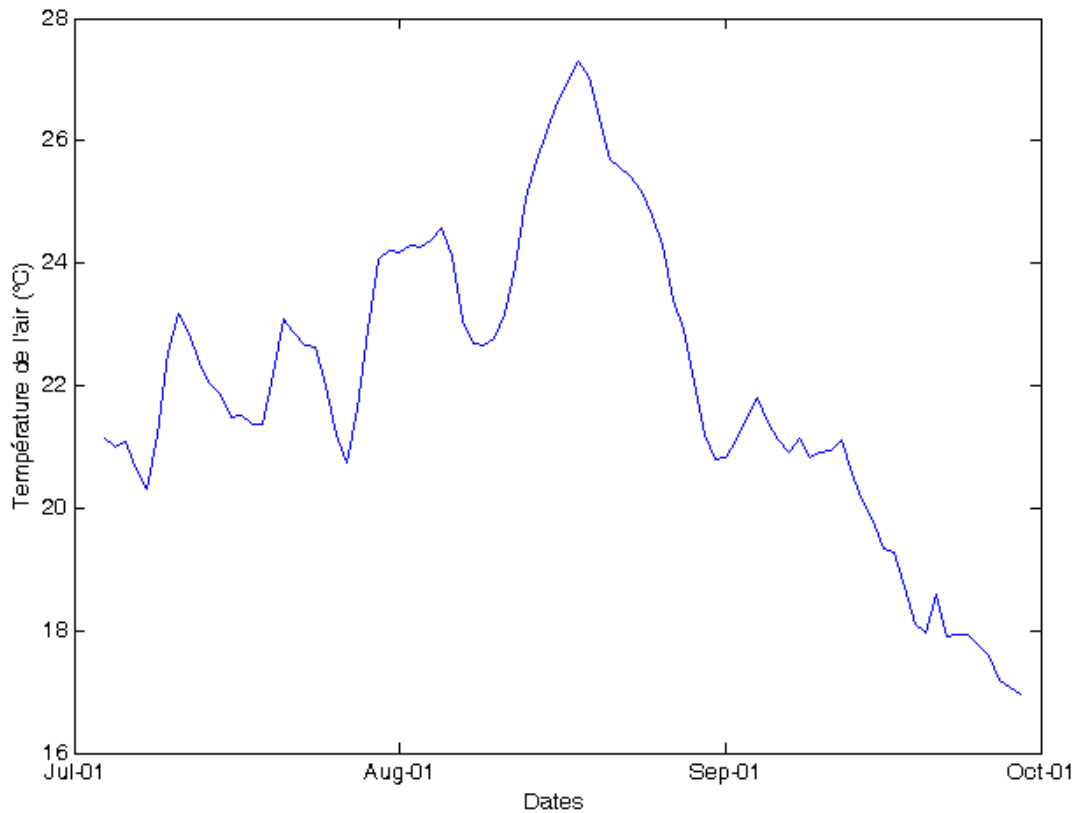


Figure 6. Température de l'air (moyennes journalières).

Le vent est aussi une variable de première importance dans le processus de mélange des masses d'eau lacustres. La figure 7 présente les vecteurs de vents mesurés à l'aéroport Jean-Lesage durant la période d'échantillonnage. On constate que la direction principale du vent est dans le secteur sud-est à sud-ouest. Cependant, plusieurs événements venteux importants (vitesse > 10m/s) provenaient aussi de l'est.

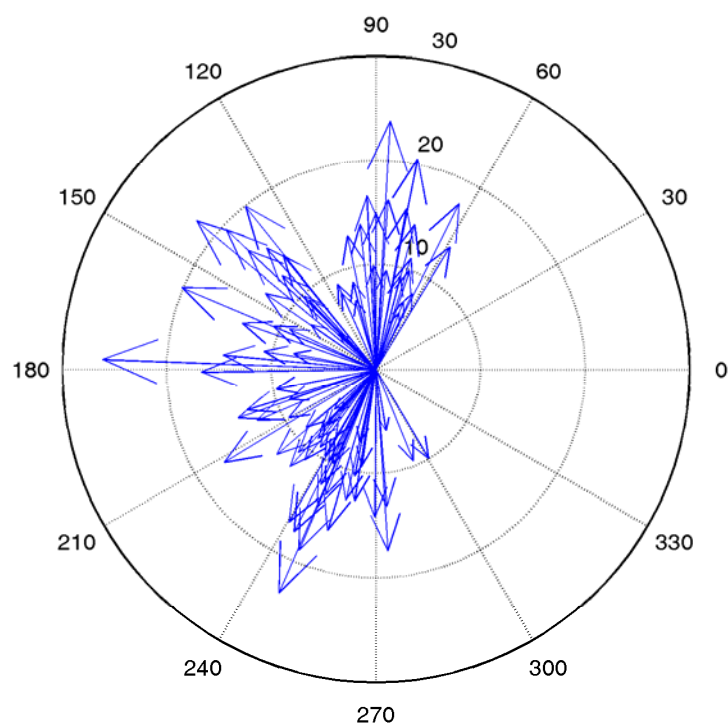


Figure 7. Vecteurs de vents à la station de l’aéroport Jean-Lesage pour la période du 4 juillet au 30 septembre 2009. Les flèches pointent dans la direction du vent et la longueur des vecteurs donne la vitesse.

Les séries chronologiques des vitesses et directions du vent sont présentées à la figure 8. On peut y observer que la période de stratification de l’eau au mois d’août (voir figures 2 et 4) correspond à une période de vents plus faibles, alors que les vitesses les plus élevées surviennent à la fin du

mois d'août, juste avant que les masses d'eau se mélangent.

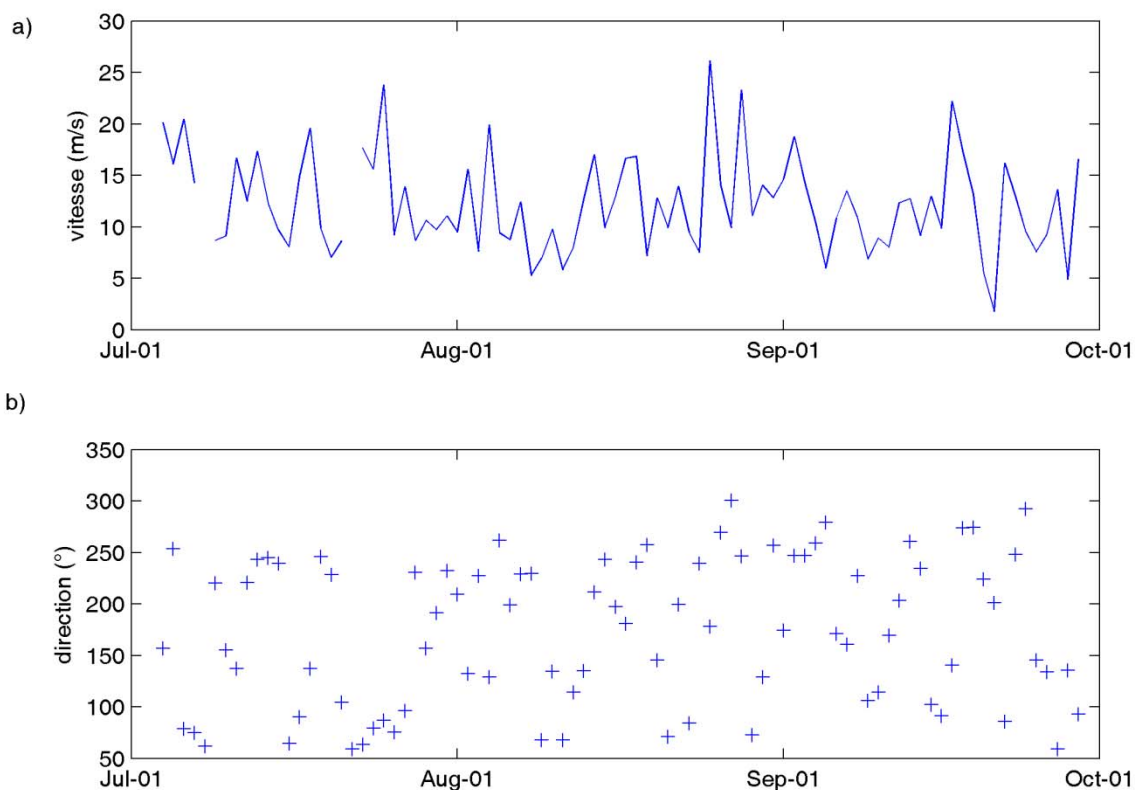


Figure 8. Séries chronologique de a) vitesse et b) direction du vent.

Une autre variable ayant pu jouer un rôle dans les variations du régime thermique du lac est la précipitation (figure 7). Un total de 353,9 mm de pluie est tombé durant la période d'échantillonnage. Le mois de juillet fut le plus humide avec un total de 154,2 mm, tandis que les précipitations des mois d'août et septembre ont totalisé 99,4 et 100,3 mm respectivement. Des événements à intensité relativement forte (>25 mm/jour) se sont produits le 18 juillet, 29 juillet, 7 août et 29 septembre.

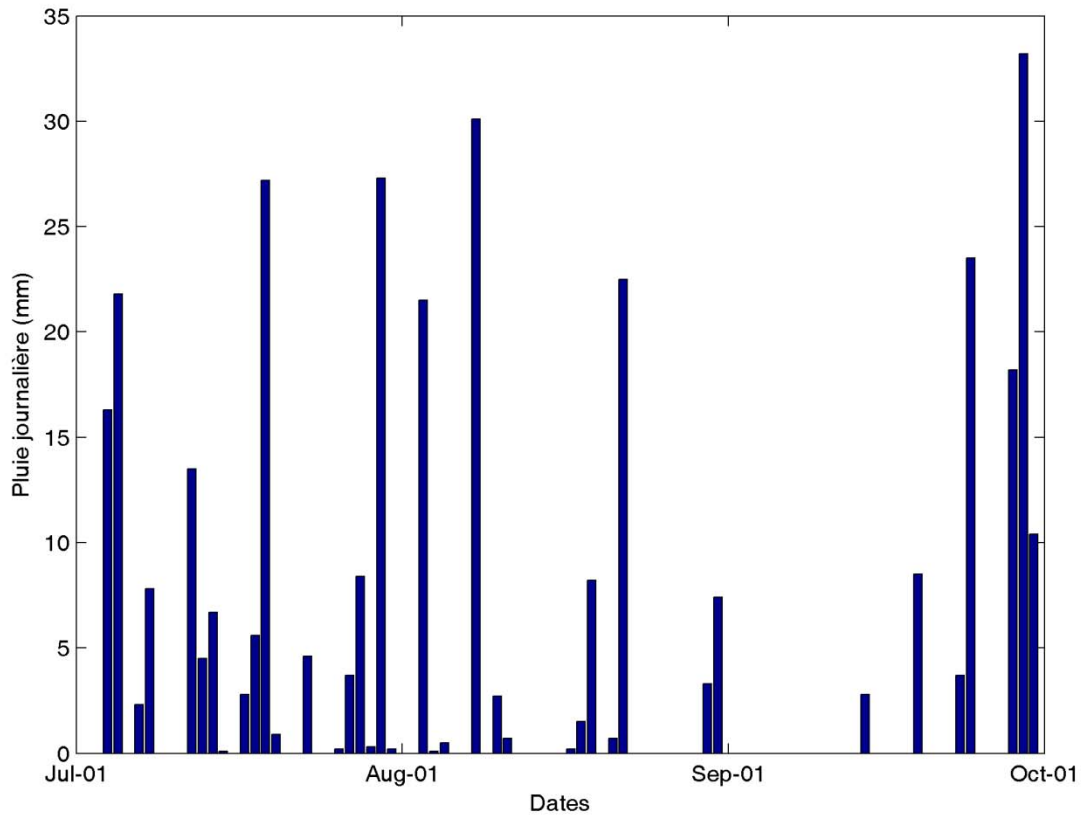


Figure 9. Précipitations totales journalières.

Finalement, les niveaux d'eau souterraine enregistrés en août et septembre sont présentés à la figure 10. On peut y voir une baisse continue jusqu'au 19 septembre, suivie d'une stabilisation et d'une légère hausse à la fin de la période de suivi.

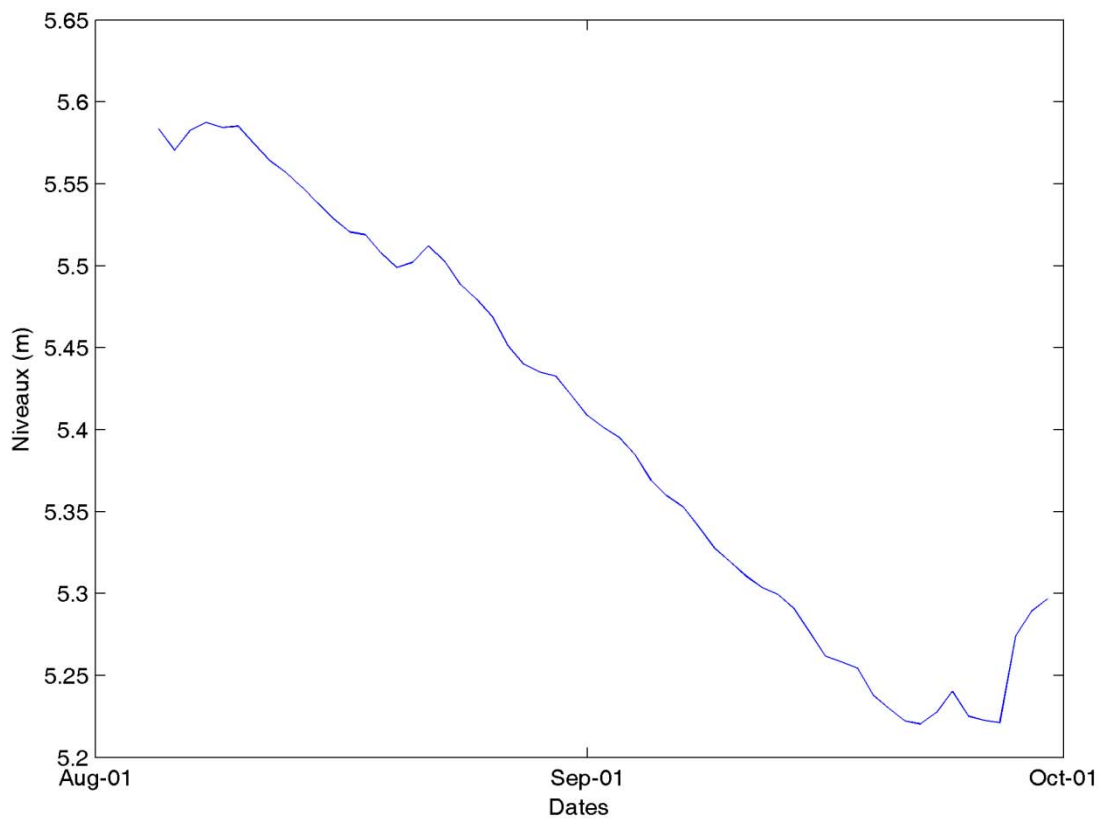


Figure 10. Niveaux d'eau moyens journaliers.

3.3. Analyse des corrélations

Les tableaux 1 et 2 donnent les valeurs de coefficients de corrélation entre les températures de l'eau et les variables climatiques. Les températures de l'eau sont évidemment fortement corrélées entre elles. Cependant, la température de l'air est la seule variable climatique fortement corrélée avec les températures de l'eau (tableau 1). Cette corrélation est positive, à l'exception des températures mesurées au fond du bassin central, qui sont négativement corrélées avec les températures de l'air. Le vent n'est pas significativement corrélé avec les différences de température, utilisées comme indice de la stratification (tableau 2).

Tableau 1. Coefficients de corrélation entre les températures de l'eau et les variables hydroclimatiques. Les corrélations significatives ($p < 0.05$) sont en gras.

	centre surface	Centre milieu	Centre fond	Est surface	Est milieu	Est fond	Berge est	Berge ouest	Précip.	Direction vent	Vitesse vent	T air	Niveau nappe
centre surface	1,00												
Centre milieu	0,92	1,00											
Centre fond	-0,23	-0,17	1,00										
Est surface	0,99	0,92	-0,21	1,00									
Est milieu	0,93	0,99	-0,16	0,93	1,00								
Est fond	0,81	0,91	0,16	0,82	0,90	1,00							
Berge est	0,99	0,93	-0,18	0,99	0,95	0,84	1,00						
Berge ouest	1,00	0,90	-0,23	1,00	0,92	0,80	0,98	1,00					
Précip.	-0,12	-0,16	-0,15	-0,13	-0,15	-0,25	-0,13	-0,11	1,00				
Direction vent	0,08	0,08	0,20	0,11	0,06	0,14	0,12	0,10	0,18	1,00			
Vitesse vent	0,07	0,11	-0,13	0,07	0,11	0,05	0,09	0,06	-0,07	-0,10	1,00		
T air	0,99	0,92	-0,21	1,00	0,93	0,82	0,99	1,00	-0,13	0,11	0,07	1,00	
Niveau nappe	0,89	0,83	-0,89	0,86	0,84	0,83	0,87	0,88	-0,04	0,02	0,003	0,87	1,00

Tableau 2. Coefficients de corrélation entre les différences de températures de l'eau et les variables hydroclimatiques. Les corrélations significatives ($p < 0.05$) sont en gras.

	ΔT est sfc-milieu	ΔT est sfc-fond	ΔT centre sfc-milieu	ΔT centre sfc-fond	Precip	Direction vent	Vitesse vent	T air	Niveau Nappe
ΔT est sfc-milieu	1,00								
ΔT est sfc-fond	0,84	1,00							
ΔT centre sfc-milieu	0,92	0,91	1,00						
ΔT centre sfc-fond	0,65	0,89	0,80	1,00					
Precip	-0,04	0,02	-0,03	-0,05	1,00				
Direction vent	0,17	0,04	0,06	-0,01	0,18	1,00			
Vitesse vent	-0,04	0,07	-0,02	0,10	-0,07	-0,10	1,00		
T air	0,68	0,83	0,83	0,92	-0,13	0,11	0,07	1,00	
Niveau nappe	0,56	0,76	0,72	0,92	-0,04	0,02	0,003	0,87	1,00

Le niveau d'eau souterraine ayant été enregistré uniquement aux mois d'août et septembre, il est fortement corrélé avec les températures de l'eau et de l'air, puisque ces dernières sont principalement en phase de décroissance durant cette période. Bien que la corrélation entre les précipitations et le niveau ne soit pas significative, il faut noter que la baisse du niveau de la nappe est associée à la période plus sèche (figures 9 et 10). Le mois d'août et de septembre ont reçu moins de pluie (environ 50 cm de moins) que le mois de juillet, ce qui signifie qu'il y a eu moins de recharge de la nappe durant cette période.

Il ne faut pas nécessairement voir de lien de causalité directe dans les corrélations élevées entre le niveau d'eau souterraine et la température de l'eau. Ce lien est plutôt indirect et peut-être même fortuit. Il est probablement attribuable à l'occurrence conjointe d'un climat plus sec et du refroidissement des températures de l'air. Le premier amène une baisse des niveaux d'eau souterraine tandis que le second est le principal agent de refroidissement du lac.

3.4 Nombres de Richardson.

La méthode décrite dans la section 2.2 a été utilisée afin de calculer la série chronologique des nombres de Richardson au mouillage du bassin central durant la période de suivi (figure 11). Les valeurs de R_{ib} ont varié entre 1,6 et 734,7 avec une moyenne de 61,4. Fait important à souligner, entre le 21 et le 31 août, les valeurs de R_{ib} calculées sont relativement faibles (< 5). Cette période de 10 jours durant laquelle le rapport entre les forces de cisaillement établies par les différences de densité et la puissance de mélange du vent sont faibles est celle qui précède le mélange complet de la colonne d'eau qui se produit le 1^{er} septembre dans le bassin nord est (figure 2) et le mélange des trois premiers mètres d'eau qui se produit à la même date dans le bassin central (figure 4). Les vents forts de la fin août (figure 8) de même que le refroidissement de l'air durant cette même période (figure 6) auront été suffisants pour causer ce mélange. Les valeurs de R_{ib} sont demeurées toujours supérieures aux seuils critiques trouvés dans la littérature (entre 0,25 et 1). Ceci peut s'expliquer par le fait qu'au mouillage central, la colonne d'eau n'est jamais complètement mélangée (voir figure 4). Cependant, un nombre accru de thermographes, permettant de mieux définir h_m et conséquemment d'obtenir des valeurs plus précises de R_{ib} , serait nécessaire pour valider cette hypothèse.

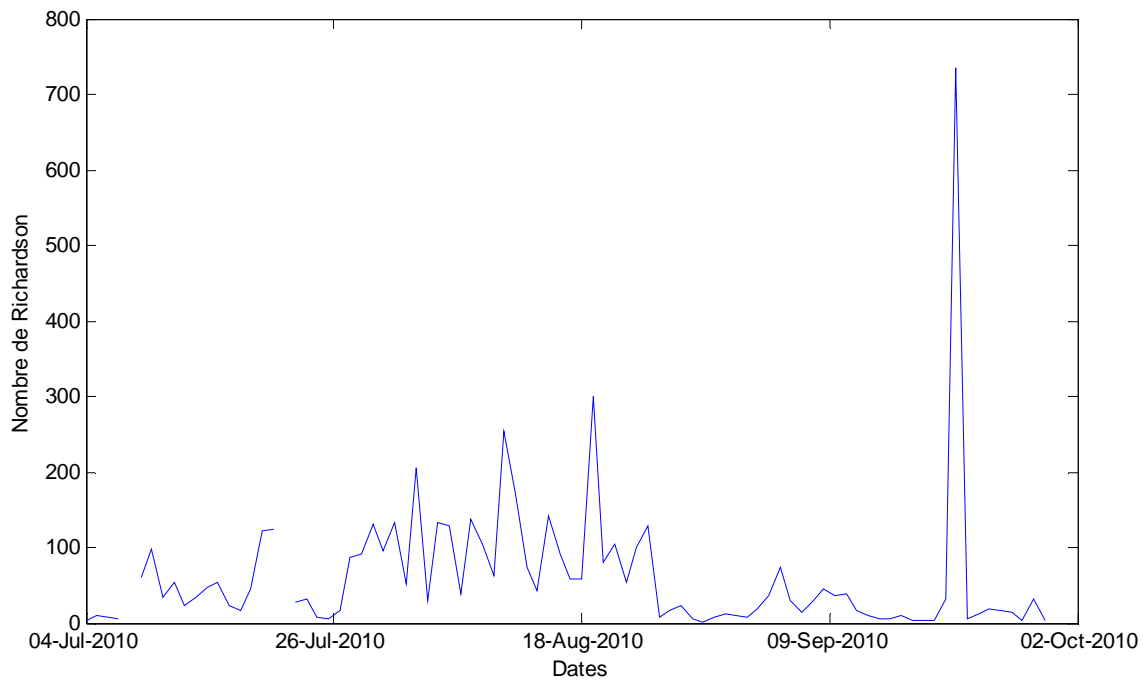


Figure 11. Nombre de Richardson calculé à partir des séries chronologiques de température et de vent.

4. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce premier suivi de l'évolution temporelle estivale des températures de l'eau du lac Laberge a permis de confirmer la présence d'une stratification importante durant les mois de juillet et août dans deux des trois bassins du lac. La combinaison d'épisodes venteux et d'une baisse de température de l'air à la fin du mois d'août a causé un mélange de toute la colonne d'eau dans le bassin nord-est et d'une partie de la colonne d'eau dans le bassin central.

Bien qu'une analyse fréquentielle n'est pas été faite sur les données de vents, les vitesses enregistrées dans les jours précédant la période de mélange des couches d'eau sont certes élevées, mais ne semblent pas extrêmes (de l'ordre de 25 m/s ou 90 km/h) et risquent de se produire assez fréquemment. Les valeurs de R_{ib} faibles durant cette période confirment que ces vitesses sont suffisantes pour causer un mélange des couches supérieures de la colonne d'eau.

Il est important de noter que la couche d'eau au fond du bassin central (plus profond que le bassin nord-est) demeure plus froide que le reste de la colonne d'eau après l'épisode de mélange. Il semble donc qu'une stratification demeure en place dans la zone profonde du lac, ce qui pourrait amener cette couche à être caractérisée par une qualité différente du reste de la colonne d'eau, puisqu'elle ne bénéficie pas des apports en oxygène des eaux superficielles lors du mélange.

Les mesures de température près des berges ont atteint des maximums semblables à ceux mesurés près de la surface aux mouillages (de l'ordre de 26-27 °C). Il semble donc que les températures dans les premiers mètres d'eau du lac évoluent de manière relativement homogène.

Le protocole d'échantillonnage a permis de faire une première caractérisation relativement grossière de la stratification du lac. La description de l'évolution de cette stratification et des périodes de mélange serait plus précise avec un plus grand nombre de thermographes déployés. Il est donc recommandé de doubler le nombre de thermographes sur chacun des mouillages l'an

prochain. De plus, le suivi des températures en berge pourrait aussi être densifié et inclure plus de sites qui seront touchés par les nouveaux aménagements.

5. RÉFÉRENCES

Conseil canadien des ministres de l'environnement. 2004. Recommandations canadiennes pour la protection de la vie aquatique : le phosphore : cadre canadien d'orientation pour la gestion des réseaux hydrographiques. Dans : *Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement*, 2004, CCME, Winnipeg.

Padisak J, C.S. Reynolds. 2003. Shallow lakes: the absolute, the relative, the functional and the pragmatic. *Hydrobiologia* 506-509: 1-11.

Tanaka, M., G. Girard, R. A. Peuto, et N. Bignell. 2001. Recommended table for the density of water between 0°C and 40°C on recent experimental report. *Metrologia* 28:301-309.

Vinçon-Leite, B., J.M. Mouchel, B. Tassin. 1989. Modélisation de l'évolution thermique saisonnière du lac Du Bourget. *Revue des sciences de l'eau* 2L 483-510.

Wetzel, R.G. 1983. *Limnology*, second edition. Sauders College Publishing, 767 pages.