

**SUIVI DU RÉGIME THERMIQUE  
DU LAC LABERGE (QUÉBEC)  
DURANT LA SAISON SANS  
GLACE EN 2010**

**SUIVI DU RÉGIME THERMIQUE DU LAC LABERGE (QUÉBEC)  
DURANT LA SAISON SANS GLACE EN 2010  
RAPPORT DE RECHERCHE # R1263**

**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**

**Avril 2011**

**Référence à citer :**

St-Hilaire, A. et A. Daigle. 2011. Suivi du régime thermique du lac Laberge (Québec) durant la saison sans glace en 2010. Rapport de recherche R1263 INRS-ETE. V+28 pages.

# TABLE DES MATIÈRES

---

<b>TABLE DES MATIÈRES .....</b>	<b>III</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>IV</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>V</b>
<b>1. MISE EN CONTEXTE .....</b>	<b>1</b>
<b>2. MÉTHODOLOGIE.....</b>	<b>3</b>
2.1 TRAVAUX SUR LE TERRAIN .....	3
2.2 ANALYSES DES DONNEES .....	6
<b>3.0 RÉSULTATS .....</b>	<b>7</b>
3.1. TEMPÉRATURES DE L'EAU .....	7
3.2 AUTRES VARIABLES .....	12
3.3 NOMBRE DE RICHARDSON .....	17
3.4. ANALYSE DES CORRÉLATIONS.....	20
<b>4. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....</b>	<b>23</b>
<b>5. RÉFÉRENCES.....</b>	<b>26</b>
<b>ANNEXE 1. MÉTHODE DE CALCUL DU NOMBRE DE RICHARDSON.....</b>	<b>27</b>

---

# LISTE DES TABLEAUX

---

TABLEAU 1. THERMOGRAPHES DÉPLOYÉS DANS LE LAC LABERGE EN 2010. ....	5
TABLEAU 2. STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES TEMPÉRATURES JOURNALIÈRES POUR LA PÉRIODE D'ÉCHANTILLONNAGE. ....	10
TABLEAU 3. COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE LES TEMPÉRATURES DE L'EAU MESURÉES AUX MOUILLAGES A, B ET D ET LES VARIABLES HYDROMÉTÉOROLOGIQUES. LES CORRÉLATIONS SIGNIFICATIVES ( $p < 0.05$ ) SONT EN GRAS.....	21
TABLEAU 4. COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE LES TEMPÉRATURES DE L'EAU MOYENNES ET MAXIMUM JOURNALIÈRES EN BERGE, LE NOMBRE DE RICHARDSON ( $R_{IB}$ ) ET LES VARIABLES HYDROCLIMATIQUES. LES CORRÉLATIONS SIGNIFICATIVES ( $p < 0.05$ ) SONT EN GRAS. ....	22

# LISTE DES FIGURES

---

FIGURE 1. EMLACEMENT DES CHAÎNES DE THERMOGRAPHES (A, B, ET D) ET DES THERMOGRAPHES EN BERGE (1 À 6). .....	4
FIGURE 2. TEMPÉRATURES DE L'EAU JOURNALIÈRES, MOUILLAGES A ET B. ....	8
FIGURE 3. TEMPÉRATURES JOURNALIÈRES A) AU MOUILLAGE D ET B) POUR LES THERMOGRAPHES EN BERGE. ....	9
FIGURE 4. DIAGRAMMES DE HAMAC DES TEMPÉRATURES JOURNALIÈRES AU MOUILLAGE A. ....	11
FIGURE 5. DIAGRAMMES DE HAMAC DES TEMPÉRATURES JOURNALIÈRES AU MOUILLAGE B. ....	11
FIGURE 6. DIAGRAMMES DE HAMAC DES TEMPÉRATURES JOURNALIÈRES AU MOUILLAGE D. ....	12
FIGURE 7. TEMPÉRATURES DE L' AIR MINIMUMS, MOYENNES ET MAXIMUMS JOURNALIÈRES MESURÉES À LA STATION MÉTÉOROLOGIQUE DÉPLOYÉE SUR LA RIVE NORD DU LAC LABERGE POUR LA PÉRIODE DU 7 MAI AU 28 OCTOBRE 2010. ....	13
FIGURE 8. VECTEURS DE VENTS MESURÉS PAR L' ANÉMOMÈTRE DÉPLOYÉ SUR LA RIVE NORD DU LAC LABERGE POUR LA PÉRIODE DU 7 MAI AU 28 OCTOBRE 2010. LES FLÈCHES POINTENT DANS LA DIRECTION DU VENT ET LA LONGUEUR DES VECTEURS DONNE LA VITESSE. ....	14
FIGURE 9. SÉRIES CHRONOLOGIQUE DE A) VITESSE ET B) DIRECTION DU VENT. ....	15
FIGURE 10. PRÉCIPITATIONS TOTALES JOURNALIÈRES. ....	16
FIGURE 11. MOYENNES JOURNALIÈRES DES NIVEAUX D'EAU SOUSTERRAINE ENREGISTRÉES EN BORDURE DU LAC. ....	17
FIGURE 12. NOMBRES DE RICHARDSON CALCULÉS POUR A) LE MOUILLAGE A ET B) LE MOUILLAGE B À PARTIR DES SÉRIES CHRONOLOGIQUES DE TEMPÉRATURE ET DE VENT. ....	19

# 1. MISE EN CONTEXTE

---

Initié en 2009, le suivi de la thermie du lac Laberge par l'INRS-ETE a pour objectif principal de caractériser la variabilité des températures de l'eau avant, pendant et après d'éventuels travaux de réaménagement à la Base de plein air de Ste-Foy. Les travaux prévoient entre autres un déplacement de l'aire de baignade de la rive nord à la rive sud du lac Laberge. De plus, il est prévu qu'une portion importante du périmètre du lac soit reboisée. Cette revégétalisation pourrait avoir un impact sur le régime thermique du lac en diminuant la radiation solaire incidente à sa surface, surtout dans les zones peu profondes.

Un premier rapport a été publié par St-Hilaire et Daigle (2010) suite à la première campagne de suivi. Parmi les conclusions de ce premier rapport, on retrouvait les faits saillants suivants :

- La colonne d'eau du lac est stratifiée 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 peut causer un mélange de toute la colonne d'eau dans certaines zones du lac.
- Les vitesses du vent (enregistrées à l'aéroport Jean-Lesage, situé à quelques kilomètres du lac), seraient suffisantes pour causer un mélange des couches supérieures de la colonne d'eau. Des mesures locales de vent seraient préférables.
- La couche d'eau au fond du bassin central demeure plus froide que le reste de la colonne d'eau après l'épisode de mélange. Cette stratification résiduelle pourrait influencer la qualité de l'eau dans cette zone puisqu'elle ne bénéficie pas des apports en oxygène des eaux superficielles lors du mélange.
- Les températures près des berges ont atteint des maximums semblables à celles mesurées près de la surface aux mouillages et les températures dans les premiers mètres d'eau du lac évoluent de manière relativement homogène.

Le rapport de St-Hilaire et Daigle (2010) incluait aussi quelques recommandations, auxquelles s'ajoutent celles découlant des discussions avec la ville de Québec suite au dépôt dudit rapport:

- 
- La description de l'évolution de la stratification et des périodes de mélange serait plus précise avec un plus grand nombre de thermographes déployés. Il a été recommandé de doubler le nombre de thermographes sur chacun des mouillages.
  - Le suivi des températures en berge pourrait aussi inclure plus de sites.
  - Il serait souhaitable d'acquérir des données météorologiques locales plutôt que d'utiliser les données de la station météorologique située à l'aéroport Jean-Lesage.

Suite à ces conclusions et recommandations, le protocole de suivi a été revu pour l'année 2010. L'objectif principal demeure la documentation des variations spatio-temporelles de la température de l'eau durant la saison sans glace. Les objectifs spécifiques du suivi de 2010 incluent :

- 1) Faire le suivi des températures dans les trois bassins principaux du lac (nord-est, central et sud-ouest) avec des chaînes de thermographes ayant un nombre de sondes plus élevé qu'en 2009.
- 2) Refaire la caractérisation de la stratification et du mélange dans le lac en utilisant des mesures météorologiques locales.
- 3) Reprendre l'analyse de corrélation entre les variables décrivant la structure thermique du lac et certaines variables explicatives potentielles (vent, précipitation, niveau de l'eau souterraine).
- 4) Faire le suivi des températures près de la berge pour un plus grand nombre de sites qu'en 2009.

---

## 2. METHODOLOGIE

---

### 2.1 Travaux sur le terrain

Trois chaînes de thermographes ont été déployées dans la partie la plus profonde des trois bassins, approximativement aux mêmes endroits qu'en 2009. Chacune des chaînes comportait six thermographes (tableau 1). Le tableau 1 donne les profondeurs de chaque sonde et résume les dates de déploiement. Il est important de se rappeler que durant les premiers jours de déploiement, l'ancre a pu caler dans les sédiments de quelques centimètres, ce qui peut modifier légèrement les profondeurs rapportées. Les mouillages étaient maintenus à la verticale par une bouée. Les profondeurs maximales aux sites de mouillage ont varié entre les trois sites, mais étaient de l'ordre de 4 à 7 m. Le mouillage central était le plus profond, avec une profondeur maximale de 7 m.

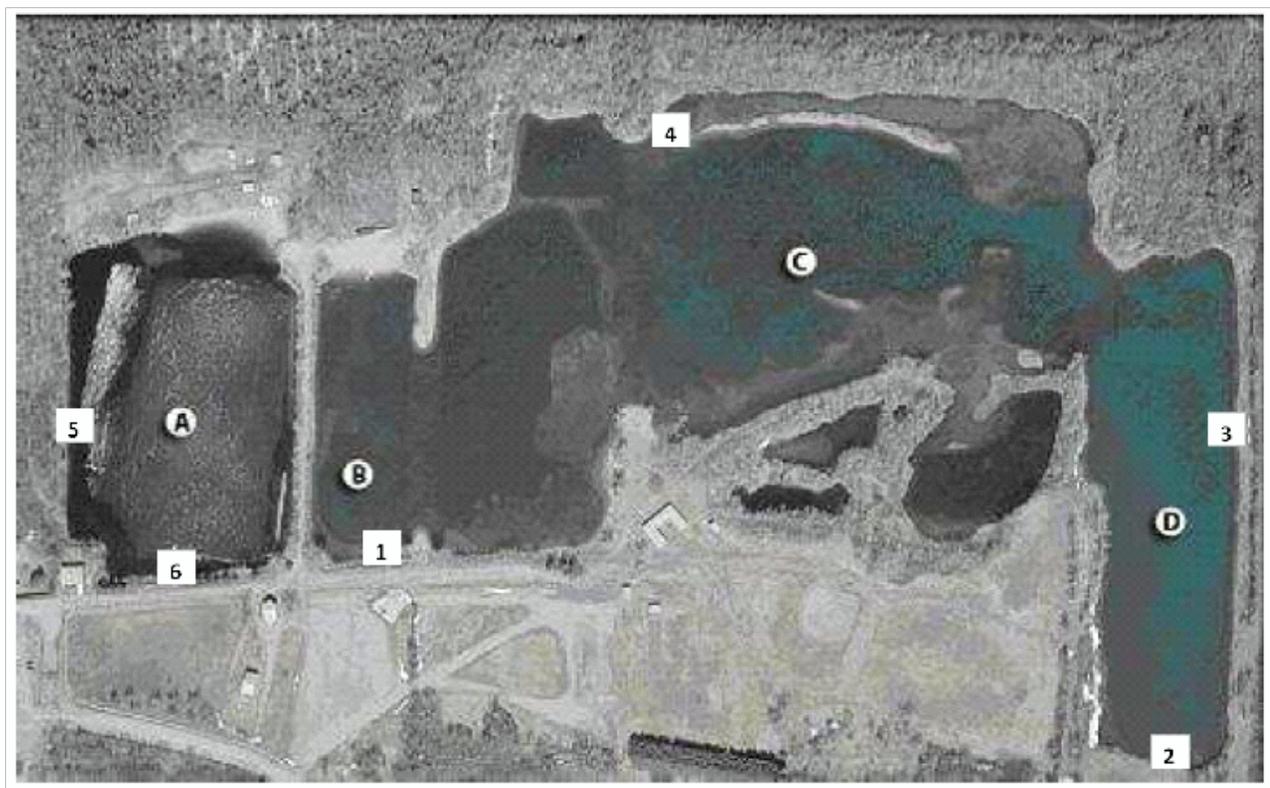
De plus, six thermographes ont été placés à environ 1,5 m de profondeur, près de la berge. Ces thermographes ont été distribués dans les trois bassins (voir tableau 1 et figure 1).

Le déploiement initial des thermographes s'est fait entre les 3 et 7 mai 2010. Une visite du site a permis de télécharger les données à mi-parcours entre le 13 et le 17 juillet. Durant cette visite, la perte de deux thermographes a été constatée sur le mouillage D (figure 1). Un seul a pu être remplacé. Lors de cette même visite, deux thermographes en rive ont été perdus, aux positions 4 et 6 (figure 1). Les appareils ont été récupérés le 19 octobre 2010. Lors de la récupération, il a été impossible de retrouver les thermographes en rive positionnés aux sites 3 et 5 (figure 1 et tableau 1).

Les niveaux de la nappe phréatique ont été mesurés dans le même puits qu'en 2009. Une jauge à pression hydrostatique de marque HOB0 a été placée à 1,8 m de la surface de la nappe. Une jauge à pression barométrique (HOB0), qui mesure aussi la température de l'air, a été installée à proximité. 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 3 mai au 19 octobre 2010.

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 mesures de vent (vitesse et direction) et de températures de l'air ont été acquises sur le site. La température de l'air a été mesurée par la même sonde qui a enregistré la pression atmosphérique (Barologger, Hobo). Un anémomètre (modèle RM Young 05103, Campbell Scientific) a été branché à un capteur de données (modèle CR10, Campbell Scientific) alimenté par une batterie chargée par un panneau solaire. Les mesures ont été enregistrées à toutes les 15 minutes. Les instruments ont été déployés sur le toit d'un abri situé à environ 100 m de la berge, à proximité du site 1.



**Figure 1. Emplacement des chaînes de thermographes (A, B, et D) et des thermographes en berge (1 à 6).**

**Tableau 1. Thermographes déployés dans le lac Laberge en 2010.**

Sites			
Mouillage A	profondeur (m)		
	0,5		
	0,9		
	1,8		
	2,4		
	3,0		
	3,6		
Mouillage B	2,0		
	2,8		
	3,4		
	4,6		
	5,6		
	6,4		
Mouillage D	1,5		
	2,1		
	2,7		Perdu le 13 juillet 2010.
	3,5		
	4,3		Perdu le 13 juillet 2010. Remplacé.
	5,0		Données disponibles jusqu'au 13 juillet seulement.
	latitude (°N)	longitude (°O)	
Berge 1	46.78818	71.33265	
Berge 2	46.79064	71.32651	
Berge 3	46.79264	71.32844	Non récupéré.
Berge 4	46.79085	71.33429	
Berge 5	46.78731	71.33497	Non récupéré.
Berge 6	46.78721	71.33366	Données disponibles à partir du 13 juillet.

## 2.2 Analyses des données

Afin de permettre une éventuelle comparaison interannuelle et de diminuer le bruit dans les séries, les moyennes (totaux dans le cas de la pluie) journalières ont été utilisées. La comparaison entre variables est principalement basée sur l'analyse des corrélations, comme ce fut le cas l'an dernier (voir section 2.2 de St-Hilaire et Daigle, 2010).

La comparaison des températures moyennes des sites en berge a été faite à l'aide de l'analyse de variance (ANOVA) à un facteur. L'ANOVA valide ou infirme l'hypothèse de base d'égalité des moyennes entre les sites. Cette validation est faite à l'aide d'une statistique de Fisher ( $F$ ) qui est un rapport entre la variance intra-site et inter-site. La valeur de  $F$  calculée est comparée à une valeur critique théorique pour un degré de confiance donné ( $\alpha=0,05$ ) et un degré de liberté correspondant à la taille de l'échantillon moins le nombre de facteurs.

Le calcul du nombre de Richardson ( $R_{ib}$ ; Wetzel, 1983) a aussi été fait pour chacune des trois chaînes de thermographes au pas de temps journalier. La méthodologie pour calculer cette valeur est décrite par St-Hilaire et Daigle (2010) et reprise dans l'annexe 1 du présent rapport. Rappelons simplement ici que plus ce nombre est faible, plus la colonne d'eau est mélangée.

---

## 3.0 RÉSULTATS

---

### 3.1. Températures de l'eau

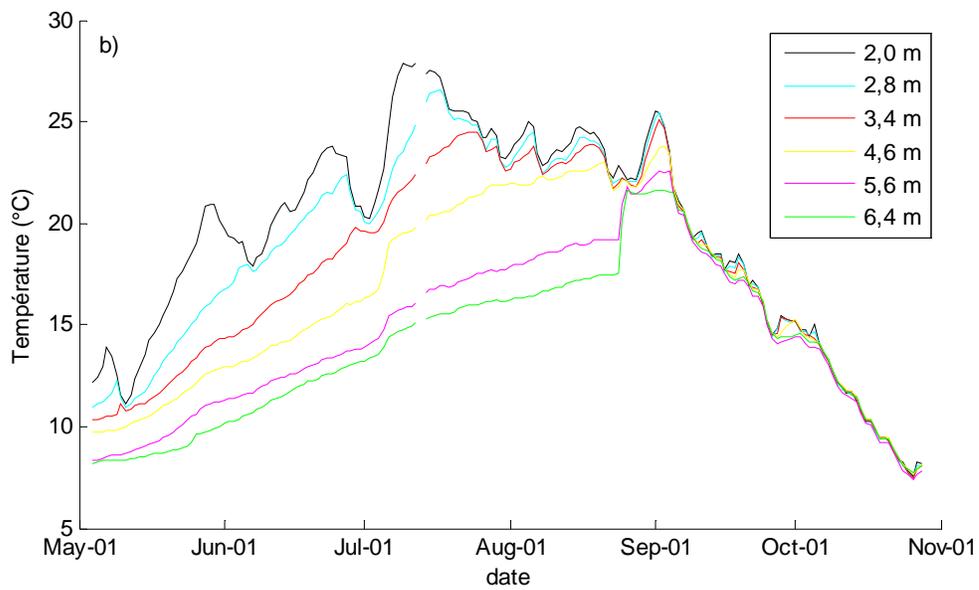
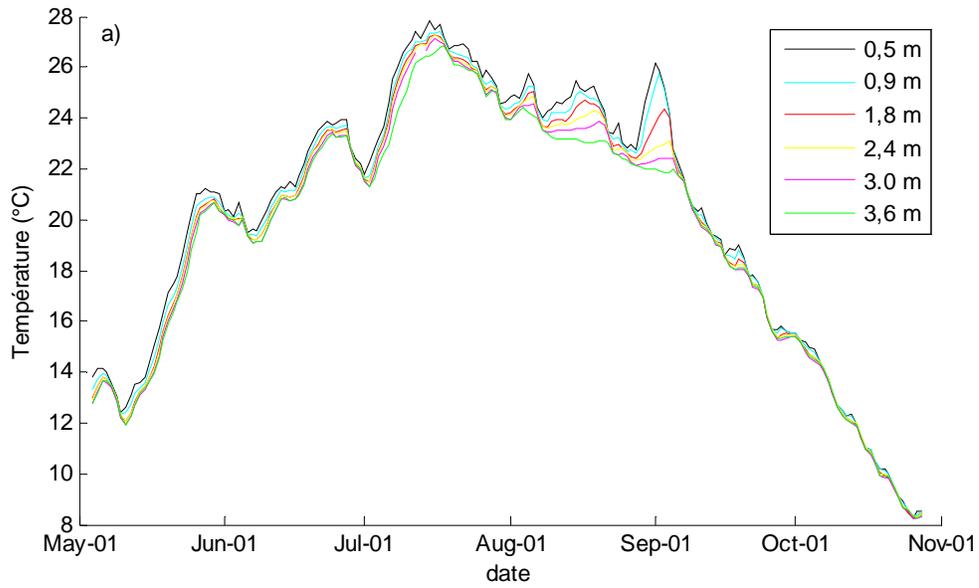
Les moyennes journalières de températures enregistrées par les chaînes de thermographes (A, B et D) et par les sondes déployées en berge sont présentées dans les figures 2 et 3.

On constate qu'au site A, qui est moins profond que les sites B et D, la stratification verticale est demeurée très faible ( $< 0,5^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ) durant la majeure partie de la période d'échantillonnage. Un gradient thermique plus prononcé que durant les périodes précédente et subséquente a été observé durant deux épisodes chauds en août et en septembre à cette station. Le gradient thermique maximal à la station A (écart maximum entre la température près de la surface et au fond) a une valeur de  $1.15^{\circ}\text{C}/\text{m}$  et a été mesuré le 1<sup>er</sup> septembre.

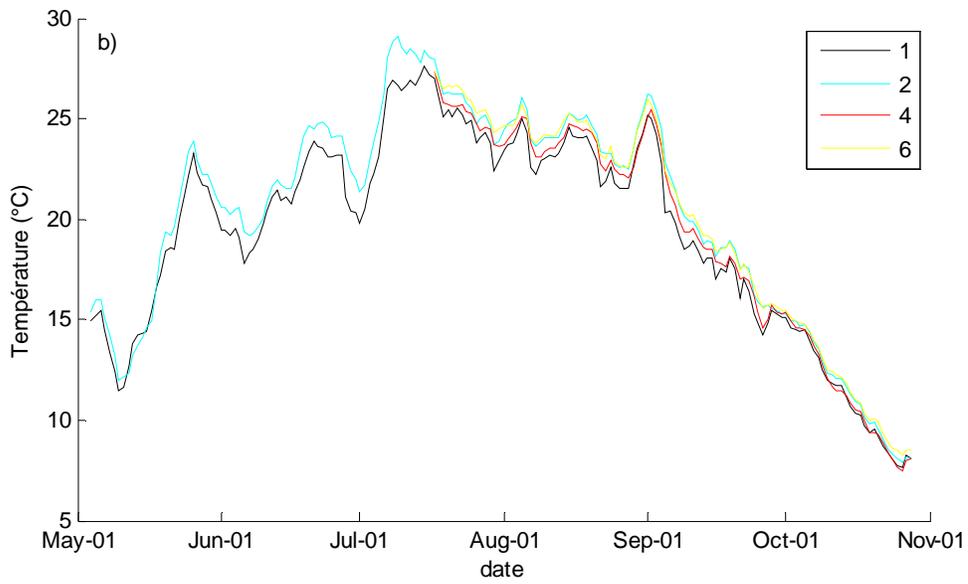
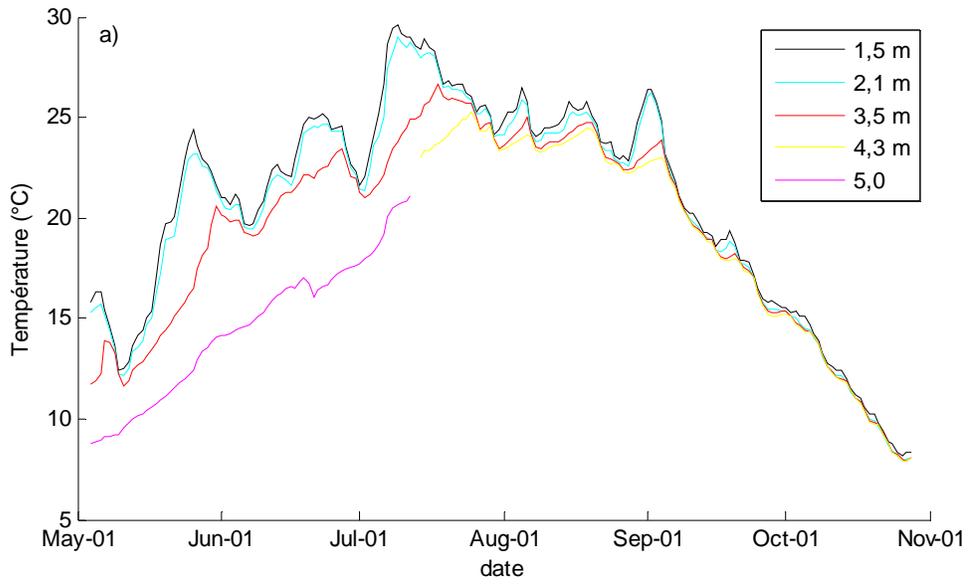
La chaîne de thermographes déployée à la station B a mesuré une stratification verticale plus importante qu'à la station A et ce, jusqu'au début du mois de septembre. Le gradient thermique maximal à la station B était  $2,9^{\circ}\text{C}/\text{m}$  et a été mesuré le 7 juillet. C'est aussi à cette station que les températures les plus froides ont été enregistrées. Les minima y sont généralement  $0,6^{\circ}\text{C}$  inférieurs à ceux des deux autres mouillages (tableau 2).

Il est plus difficile de décrire la variation temporelle de la stratification au site D car les deux thermographes les plus profonds n'ont que des séries partielles. Une forte stratification (maximum de  $3,4^{\circ}\text{C}/\text{m}$ , le 26 mai) a été mesurée dès le début de la période d'échantillonnage. Il semble qu'à partir du mois de septembre, les trois premiers mètres de la colonne d'eau étaient assez bien mélangés (gradient vertical  $<0,6^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ).

Les thermographes placés en berge montrent des séries chronologiques de température similaires. La température maximale a été atteinte entre le 7 et le 15 juillet, selon les sites. Les maximums atteints aux sites 1 et 2 étaient de l'ordre de  $30^{\circ}\text{C}$  (tableau 2). Une analyse de variance a permis de tester l'hypothèse d'égalité des températures moyennes, maximums et minimums entre les sites en berge. Ces statistiques ne sont pas significativement différentes ( $F > 1,2$ ,  $P > 0,09$ ,  $\alpha = 0.05$ ).



**Figure 2. Températures de l'eau journalières, mouillages A et B.**



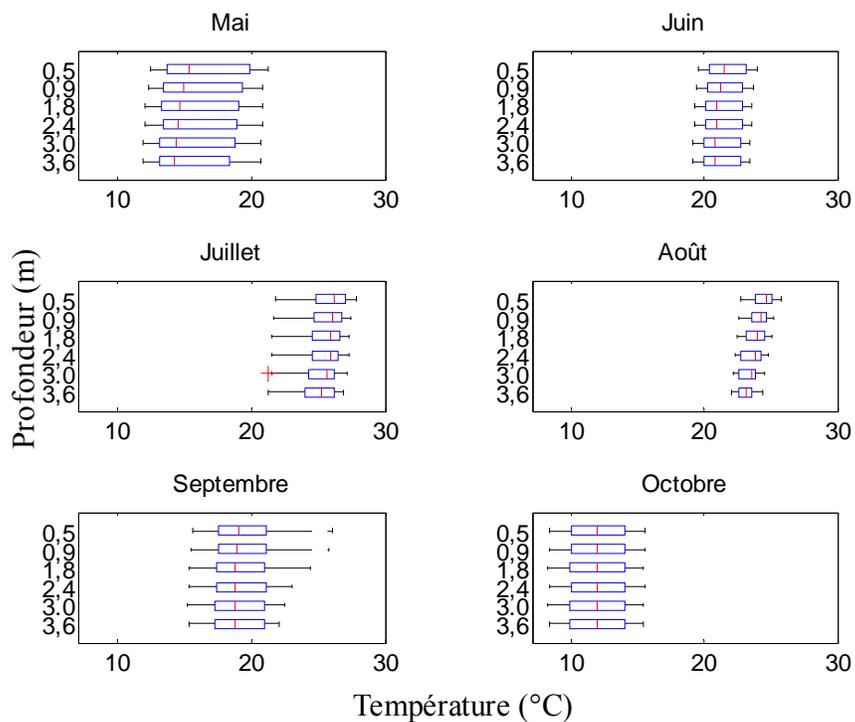
**Figure 3. Températures journalières a) au mouillage D et b) pour les thermographes en berge.**

**Tableau 2. Statistiques descriptives des températures journalières pour la période d'échantillonnage.**

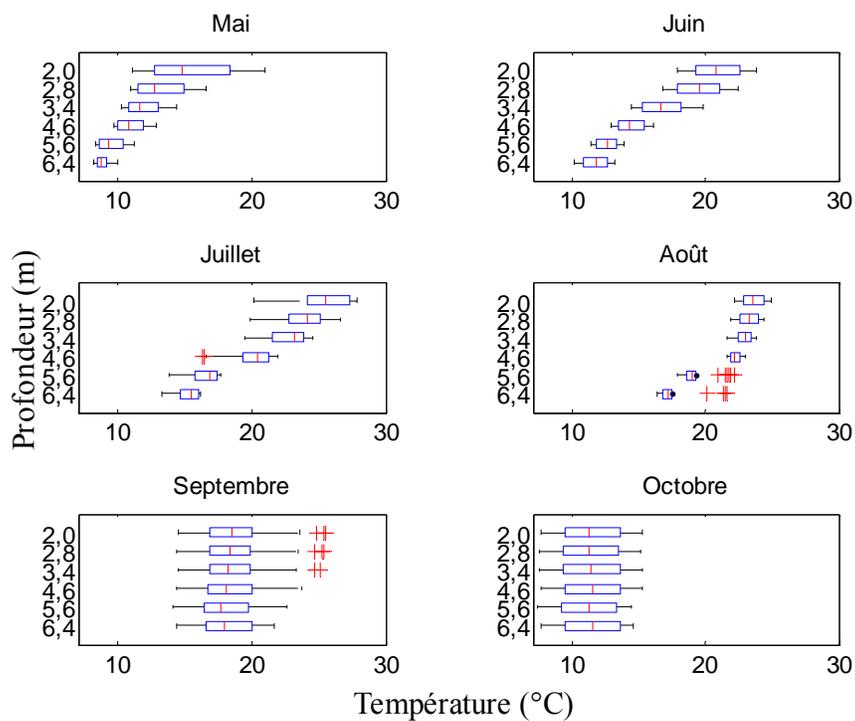
Site	Profondeur (m)	Minimum (°C)	Moyenne (°C)	Maximum (°C)
Mouillage A	0,5	8,2	20,2	29,4
	0,9	8,2	20,0	28,2
	1,8	8,2	19,8	27,7
	2,4	8,2	19,7	27,4
	3,0	8,2	19,5	27,3
	3,6	8,2	19,5	27,0
Mouillage B	2,0	7,5	19,4	28,8
	2,8	7,5	18,5	27,0
	3,4	7,5	17,5	25,3
	4,6	7,6	16,4	24,4
	5,6	7,4	14,6	23,2
	6,4	7,6	14,0	22,1
Mouillage D	1,5	8,2	20,8	31,1
	2,1	8,2	20,4	30,4
	3,5	8,2	19,3	27,2
	4,3	8,2	19,3	25,9
	5,0	8,2	14,6	22,3
Berge	1	7,4	19,5	29,5
	2	7,7	20,4	30,3
	4	7,3	19,2	28,0
	6	8,2	19,8	28,9

L'évolution saisonnière de la stratification est présentée dans les figures 4 à 6. Dans ces figures, les diagrammes de hamac (« box plots ») des températures journalières sont présentées pour chaque profondeur et chaque mois. Chaque diagramme de hamac présente la médiane mensuelle (ligne rouge), les 25<sup>e</sup> et 75<sup>e</sup> centiles (extrémités du rectangle), les 10<sup>e</sup> et 90<sup>e</sup> centiles (extrémités des lignes) et les valeurs singulières (croix rouges) pour l'ensemble des températures mesurées à une profondeur donnée.

Au mouillage A (figure 3), ces diagrammes confirment la faible stratification. Les températures médianes étaient maximales en juillet et août. Le mois d'août est aussi caractérisé par une faible variabilité thermique sur toute la colonne d'eau. Le mouillage B (figure 4) est au contraire caractérisé par une stratification verticale de mai à août. Une thermocline plus profonde (> 4m) et plus prononcée est visible durant les mois de juillet et août à ce site. La colonne d'eau est plus homogène en septembre et octobre.

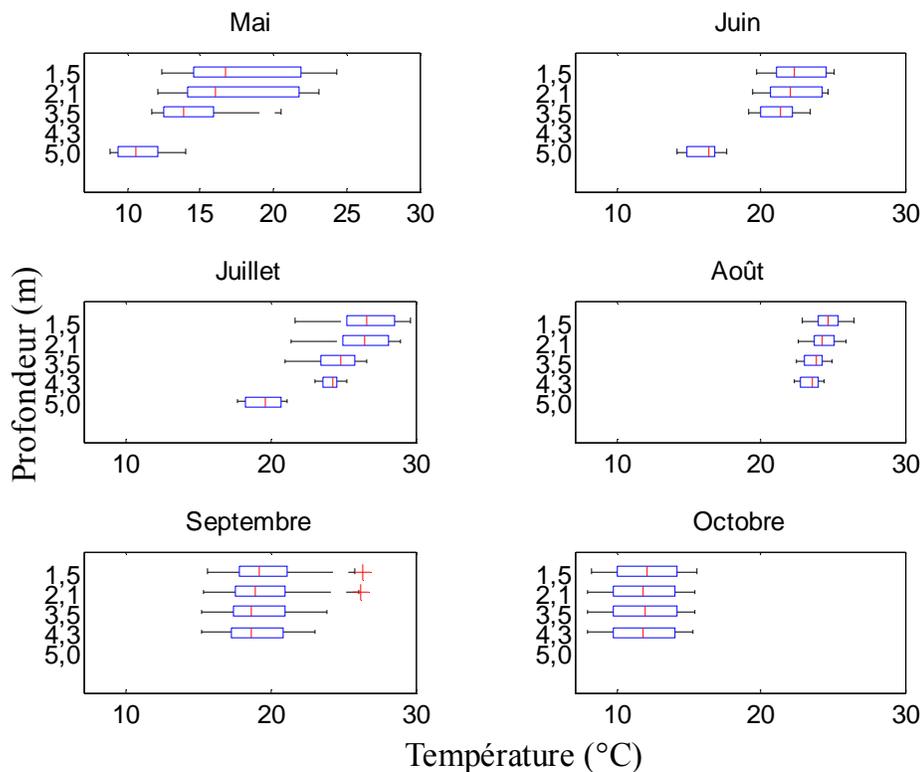


**Figure 4. Diagrammes de hamac des températures journalières au mouillage A.**



**Figure 5. Diagrammes de hamac des températures journalières au mouillage B.**

La figure 6 décrit l'évolution de la stratification du mouillage D. Dès le mois de mai, les températures en profondeur sont plus faibles que dans les trois premiers mètres de la colonne d'eau. La thermocline reste en place jusqu'en juillet. Le gradient vertical et la variabilité de la température en haut de la thermocline s'estompent en août. Les mois de septembre et octobre sont caractérisés par une plus grande variabilité qu'en août (à cause du refroidissement saisonnier) et par une colonne d'eau relativement bien mélangée.

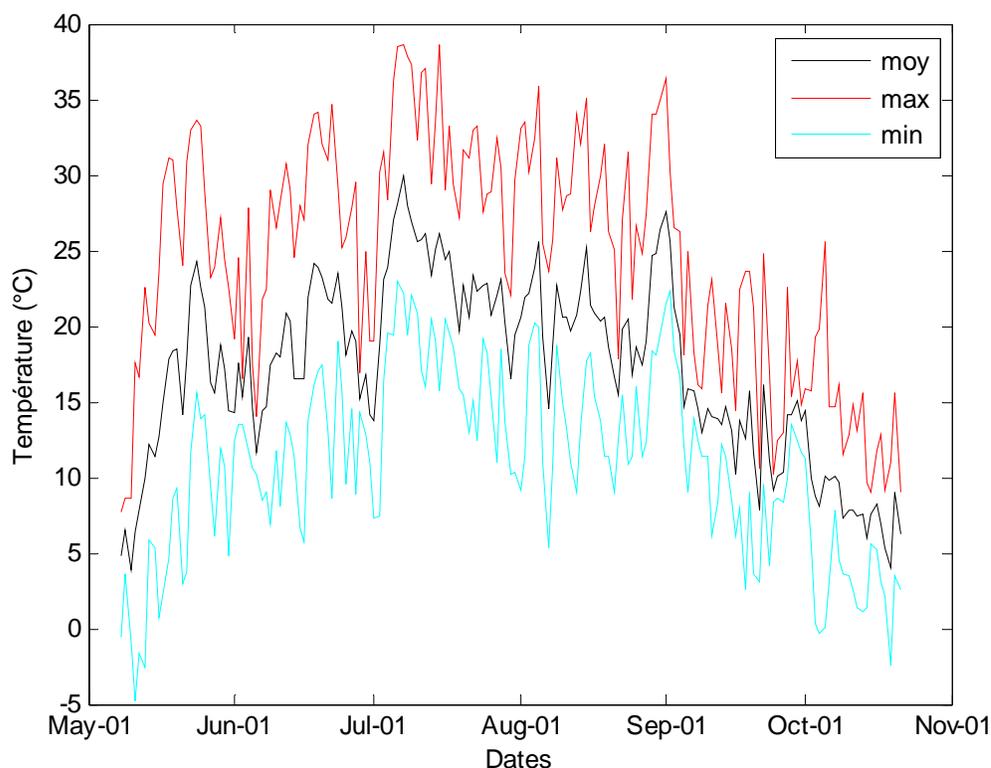


**Figure 6. Diagrammes de hamac des températures journalières au mouillage D.**

### 3.2 Autres variables

Les températures de l'air ont été mesurées durant la période de déploiement des thermographes. La figure 7 montre la chronique des températures minimales, moyennes et maximales. On peut identifier quatre périodes chaudes durant lesquelles les maximums journaliers ont dépassé 29 °C pendant plusieurs jours. Un premier pic se produit tôt dans la saison (24-26 mai). Le second se

produit les 18 et 19 juin. Le début du mois de juillet (5 au 13) a été la période la plus chaude enregistrée. Un autre événement chaud s'est produit du 29 août au premier septembre. La température moyenne la plus chaude enregistrée était 28,3 °C (7 juillet). Une comparaison entre la figure 6 et les figures 2 et 3 montre que les pics de température de l'air sont évidemment répliqués dans les chroniques de température de l'eau (surtout près de la surface). Le dernier événement chaud, à la fin août, a causé une nouvelle stratification de la colonne d'eau aux trois mouillages, après un bref épisode de mélange (figures 2 et 3).

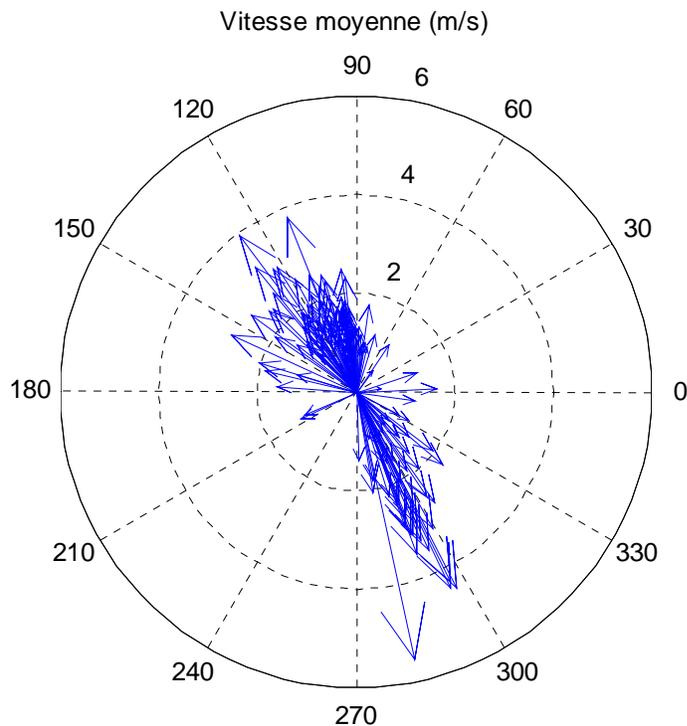


**Figure 7. Températures de l'air minimales, moyennes et maximales journalières mesurées à la station météorologique déployée sur la rive nord du lac Laberge pour la période du 7 mai au 28 octobre 2010.**

Le vent est un agent de mélange de la colonne d'eau. La figure 8 présente les vecteurs de vent mesurés à la station météorologique locale. Les données sont manquantes entre le 14 juillet et le 10 août. Alors que la direction principale du vent mesurée en 2009 à l'aéroport Jean-Lesage était du secteur sud-est à sud-ouest, les mesures prises sur place en 2010 montrent plutôt une

---

alternance entre le secteur sud-est et nord-ouest. La majorité des vitesses moyennes journalières étaient inférieures à 3,0 m/s (10,8 km/h).

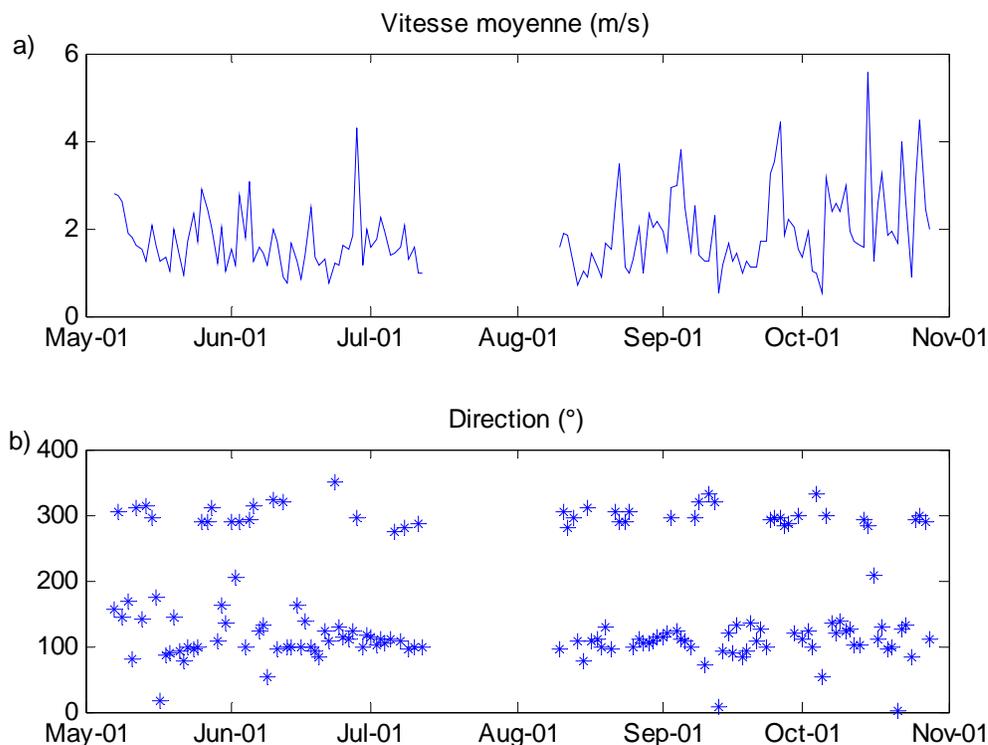


**Figure 8. Vecteurs de vents mesurés par l'anémomètre déployé sur la rive nord du lac Laberge pour la période du 7 mai au 28 octobre 2010. Les flèches pointent dans la direction du vent et la longueur des vecteurs donne la vitesse.**

Les séries chronologiques des vitesses et directions du vent sont présentées à la figure 9. On peut y observer que les vents demeurent relativement faibles au début de la saison, ce qui aide à l'établissement d'une stratification dans la colonne d'eau. Le 29 juin, la vitesse moyenne du vent a dépassé 4 m/s (14,4 km/h) et le maximum horaire enregistré était de 11 m/s (39,6 km/h). Ces vitesses élevées associées à une baisse importante de la température de l'air (voir figure 7) ont contribué à mélanger la colonne d'eau, comme en témoignent le rapprochement des valeurs de

---

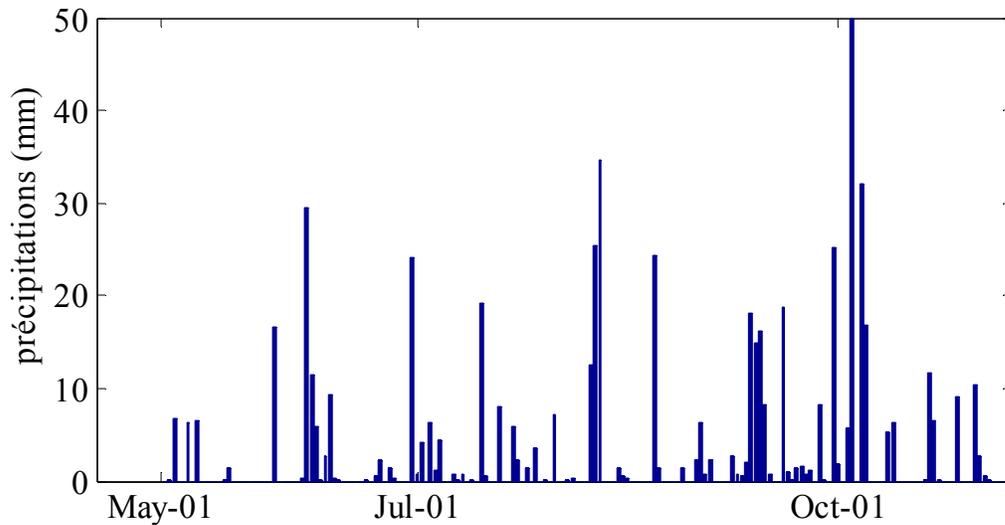
températures mesurées dans le premier 2,5 m durant la dernière semaine de juin et la première de juillet (figures 2 et 3).



**Figure 9. Séries chronologique de a) la vitesse et b) la direction du vent.**

La figure 9 montre aussi que les pointes de vitesses moyennes supérieures à 3,5 m/s (12,6 km/h) sont plus fréquentes à partir de la mi-août. Neuf des douze dépassements de ce seuil se sont produits dans les 40 derniers jours de suivi. Les figures 4 à 6 confirment que les températures de l'air plus faibles et des vitesses de vent plus élevées correspondent à des températures de l'eau médianes relativement homogènes sur toute la colonne d'eau durant les 40 derniers jours d'échantillonnage.

Une autre variable ayant pu jouer un rôle dans les variations du régime thermique du lac est la précipitation (figure 10).



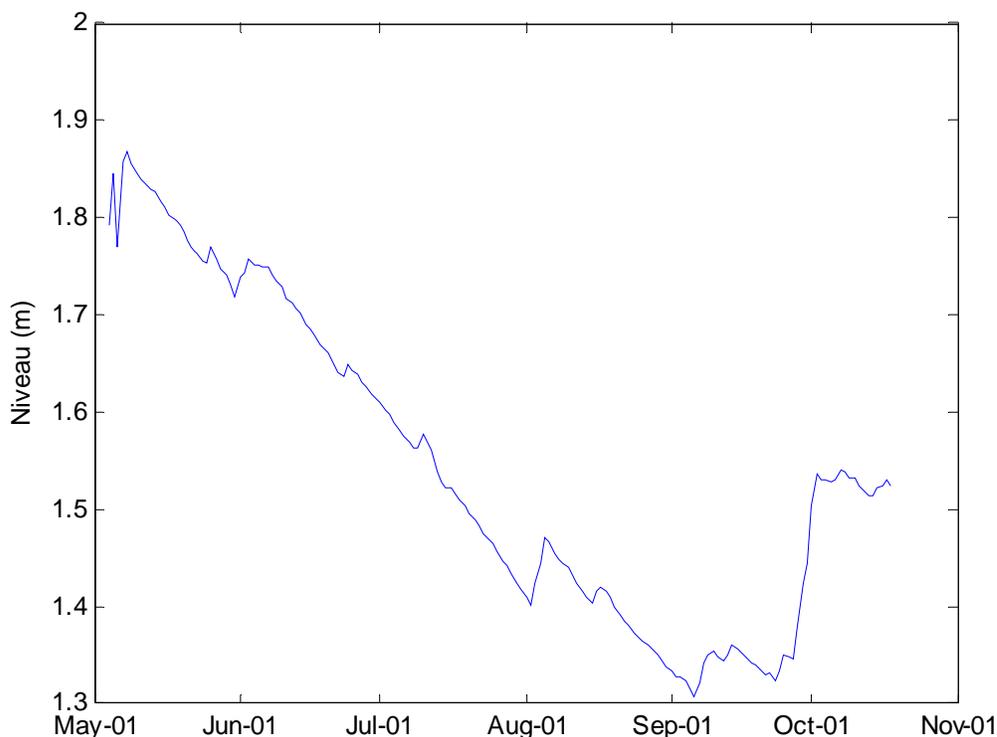
**Figure 10. Précipitations totales journalières.**

La figure 10 montre quelques événements pluvieux importants durant la période d'échantillonnage. Un total de 589,2 mm de pluie est tombé durant cette période. Une première période pluvieuse est survenue au début du mois de juin. Durant les dix premiers jours de ce mois, 60 mm de pluie sont tombés. Cette période pluvieuse est associée à une diminution de la température de l'eau près de la surface aux trois mouillages et en berge (figures 2 et 3). Entre le 2 et le 5 août, 72,6 mm de pluie ont été enregistrés. La baisse de température associée à cette courte période de pluie semble moins importante que celle de juin (figures 2 et 3). Du 8 au 19 septembre, le lac a reçu près de 83 mm de pluie. Les figures 2 et 3 montrent que la température du lac a chuté de 3 à 4 °C et que la colonne d'eau s'est mélangée durant cette période. La pluie la plus importante (49 mm) a été enregistrée le 4 octobre. L'impact de cet événement sur la thermie du lac semble minime, dans la mesure où la colonne d'eau était déjà pleinement mélangée et que le cycle saisonnier de la température de l'eau était déjà dans sa phase décroissante.

La quantité de pluie nécessaire à un refroidissement du lac est importante, ce qui fait qu'elle est rarement considérée comme la source directe de refroidissement. Par contre, les événements pluvieux importants sont associés à un temps couvert, ce qui implique une baisse de la radiation solaire incidente sur le lac comparativement à celle associée aux jours de faible nébulosité.

---

Finalement, les niveaux d'eau souterraine enregistrés sont présentés à la figure 10. On peut y voir une baisse continue de ce niveau de mai jusqu'au 6 septembre (différence de 0,5 m), suivie par une stabilisation et une hausse relativement rapide de plus de 0,25 m vers la fin de la période de suivi. Entre août et septembre 2010, la baisse du niveau de la nappe a été de l'ordre de 20 cm, alors qu'en 2009, elle était presque le double pour cette même période (St-Hilaire et Daigle, 2010).



**Figure 11. Moyennes journalières des niveaux d'eau souterraine enregistrés en bordure du lac.**

### 3.3 Nombre de Richardson.

La méthode décrite dans l'annexe a été utilisée afin de calculer la série chronologique des nombres de Richardson aux mouillages A et B durant la période de suivi (figure 12). Les données relatives aux vents, manquantes en juillet et août, sont la cause du trou dans la série de la figure 12.

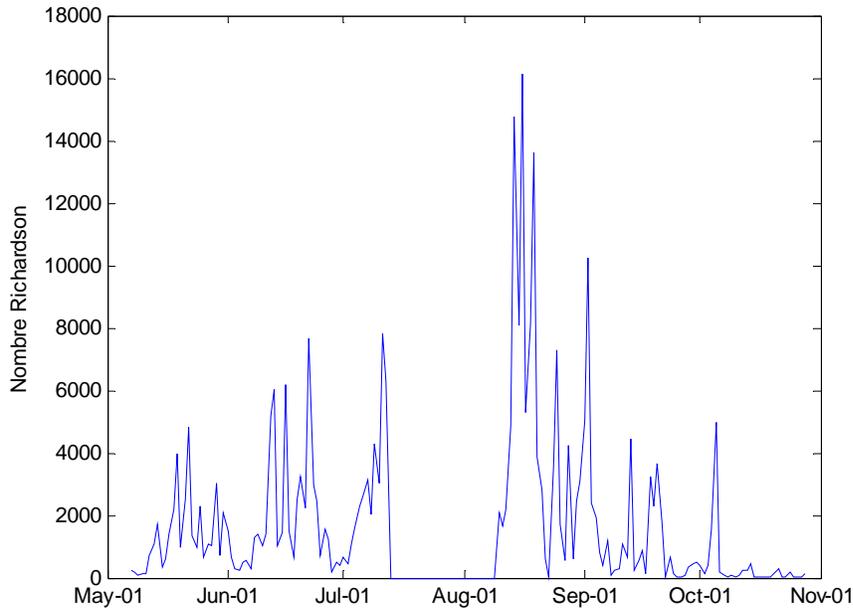
---

Au mouillage A, les valeurs de  $R_{ib}$  ont varié entre 0 et 16 119. La moyenne et la médiane de  $R_{ib}$  à ce mouillage sont respectivement de 1642 et 625. Le mouillage A est caractérisé par une faible stratification pendant presque toute la période de suivi, ce qui se traduit par une moyenne de  $R_{ib}$  du même ordre de grandeur que celle de l'année précédente (St-Hilaire et Daigle, 2010). À la mi-août, les valeurs de  $R_{ib}$  calculées à partir des données du mouillage A ont augmenté de manière synchrone avec les deux événements de stratification observés à la figure 2a.

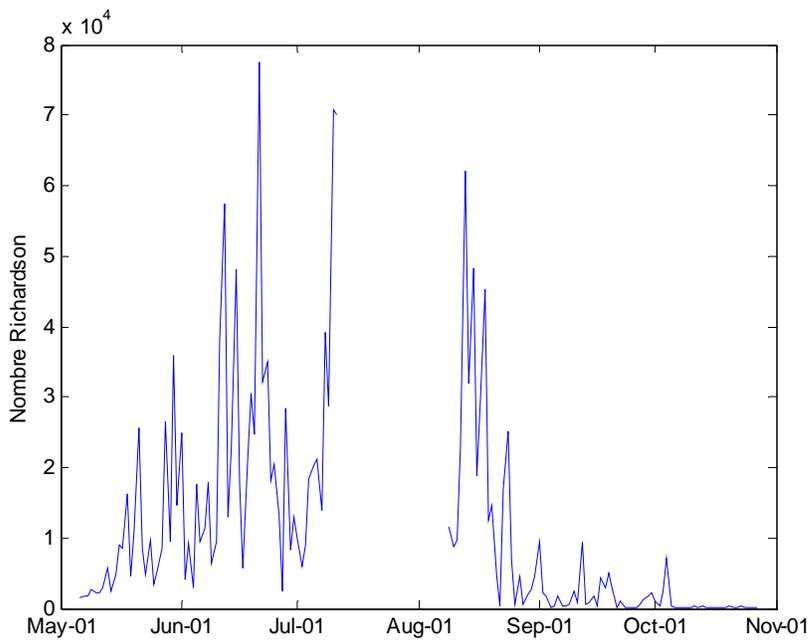
Au mouillage B, les valeurs de  $R_{ib}$  ont varié entre 0,72 et 77 628 avec une moyenne de 11 107 et une médiane de 4629. Les valeurs de  $R_{ib}$  sont très variables et systématiquement plus élevées qu'au mouillage A durant les mois de mai à juillet. Sept des 10 valeurs les plus faibles de  $R_{ib}$  se sont produites entre la fin de mois d'août et la fin de la période de suivi. Cela coïncide avec la période de vents plus forts.

Les valeurs de  $R_{ib}$  inférieures à 100 semblent être une bonne indication d'une colonne d'eau presque entièrement homogène aux deux stations ( $\Delta T < 0,2^\circ\text{C}$ ). Bien que faibles, ces valeurs de  $R_{ib}$  sont majoritairement au-dessus des seuils critiques trouvés dans la littérature (entre 0,25 et 1) qui signalent le mélange de la colonne d'eau. Les stratifications épisodiques prononcées au mouillage A et celle qui demeure en place de mai à septembre au mouillage B sont associées à des valeurs de  $R_{ib}$  qui dépassent 1000.

a)



b)



**Figure 12. Nombres de Richardson calculés pour a) le mouillage A et b) le mouillage B à partir des séries chronologiques de température et de vent.**

---

### 3.4. Analyse des corrélations

Les tableaux 3 et 4 donnent les valeurs de coefficients de corrélation entre les températures de l'eau et les variables hydrométéorologiques. Les séries de données partielles ont dû être éliminées de l'analyse. Les coefficients de corrélations entre les valeurs du nombre de Richardson ( $R_{ib}$ ) et ces mêmes variables hydrométéorologiques sont aussi rapportés.

Alors qu'en 2009, la température de l'air était la seule variable climatique fortement corrélée avec les températures de l'eau, les corrélations calculées à partir des données de 2010 sont significatives pour toutes les variables, sauf la direction du vent et la pluie. Cette différence s'explique en grande partie par le fait que la série chronologique de 2010 est plus longue que celle de 2009. Les données de 2010 sont caractérisées par une saisonnalité que la courte série de 2009 n'avait pas pu capturer. La température de l'air maximum est la statistique de température la moins fortement corrélée avec les températures de l'eau mesurées aux mouillages (tableau 3). Par contre, les corrélations entre les températures maximums en berge et les variables hydrométéorologiques sont égales ou parfois légèrement plus élevées que celles entre les températures moyennes en berge et ces mêmes variables hydrométéorologiques.

La corrélation entre le niveau de la nappe souterraine et les températures de l'eau est variable. Elle est négative pour l'ensemble des températures mesurées aux mouillages A et D, alors qu'elle est positive pour les séries provenant des thermographes les plus profonds au mouillage B. Bien que le rehaussement des températures profondes observé dans la figure 2 précède celui des niveaux de la nappe dans la figure 11, il est possible que ces phénomènes soient liés et que l'augmentation du niveau de la nappe ait contribué à modifier la thermie du lac en profondeur.

Comme prévu, le nombre de Richardson est positivement corrélé avec les températures de l'air (qui contribuent à stratifier la colonne d'eau) et négativement corrélé avec les vitesses du vent (qui contribuent au mélange).

**Tableau 3. Coefficients de corrélation entre les températures de l'eau mesurées aux mouillages A, B et D et les variables hydrométéorologiques. Les corrélations significatives ( $p < 0,05$ ) sont en gras.**

	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Niveau	<b>-0,30</b>	<b>-0,290</b>	<b>-0,29</b>	<b>-0,30</b>	<b>-0,31</b>	<b>-0,30</b>
Tair min	<b>0,73</b>	<b>0,73</b>	<b>0,726</b>	<b>0,73</b>	<b>0,73</b>	<b>0,72</b>
Tair moy	<b>0,73</b>	<b>0,72</b>	<b>0,722</b>	<b>0,73</b>	<b>0,73</b>	<b>0,72</b>
Tair max	<b>0,61</b>	<b>0,60</b>	<b>0,601</b>	<b>0,61</b>	<b>0,61</b>	<b>0,60</b>
Vitesse vent	<b>-0,26</b>	<b>-0,26</b>	<b>-0,265</b>	<b>-0,28</b>	<b>-0,28</b>	<b>-0,28</b>
Direction vent	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Niveau	<b>-0,30</b>	<b>-0,14</b>	0,03	<b>0,21</b>	<b>0,42</b>	<b>0,53</b>
Tair min	<b>0,72</b>	<b>0,68</b>	<b>0,63</b>	<b>0,54</b>	<b>0,44</b>	<b>0,36</b>
Tair moy	<b>0,71</b>	<b>0,66</b>	<b>0,59</b>	<b>0,47</b>	<b>0,32</b>	<b>0,21</b>
Tair max	<b>0,59</b>	<b>0,54</b>	<b>0,47</b>	<b>0,36</b>	<b>0,20</b>	0,09
Vitesse vent	<b>-0,26</b>	<b>-0,23</b>	<b>-0,19</b>	-0,152	<b>-0,10</b>	<b>-0,06</b>
Direction vent	-0,027	-0,034	-0,023	-0,004	-0,017	-0,03
	D1	D2	D4			
Niveau	<b>-0,38</b>	<b>-0,36</b>	<b>-0,22</b>			
Tair min	<b>0,73</b>	<b>0,73</b>	<b>0,70</b>			
Tair moy	<b>0,74</b>	<b>0,73</b>	<b>0,69</b>			
Tair max	<b>0,62</b>	<b>0,61</b>	<b>0,57</b>			
Vitesse vent	<b>-0,26</b>	<b>-0,26</b>	<b>-0,26</b>			
Direction vent	-0,01	-0,01	-0,02			

**Tableau 4. Coefficients de corrélation entre les températures de l'eau moyennes et maximum journalières en berge, le nombre de Richardson ( $R_{ib}$ ) et les variables hydroclimatiques. Les corrélations significatives ( $p < 0,05$ ) sont en gras.**

	Niveau	Tair min	Tair moy	Tair max	Vitesse	Direction
Site 1 Moy	<b>-0,37</b>	<b>0,73</b>	<b>0,85</b>	<b>0,79</b>	<b>-0,30</b>	0,01
Site 2 Moy	<b>-0,38</b>	<b>0,74</b>	<b>0,84</b>	<b>0,78</b>	<b>-0,29</b>	0,01
Site 4 Moy	<b>-0,38</b>	<b>0,73</b>	<b>0,84</b>	<b>0,795</b>	<b>-0,29</b>	0,01
Site 6 Moy	<b>-0,38</b>	<b>0,74</b>	<b>0,85</b>	<b>0,79</b>	<b>-0,29</b>	0,02
	Niveau	Tair min	Tair moy	Tair max	Vitesse	Direction
Site 1 Max	<b>-0,44</b>	<b>0,74</b>	<b>0,85</b>	<b>0,78</b>	<b>-0,33</b>	0,00
Site 2 Max	<b>-0,45</b>	<b>0,75</b>	<b>0,85</b>	<b>0,77</b>	<b>-0,30</b>	0,00
Site 4 Max	<b>-0,45</b>	<b>0,74</b>	<b>0,85</b>	<b>0,79</b>	<b>-0,30</b>	0,02
Site 6 Max	<b>-0,44</b>	<b>0,75</b>	<b>0,86</b>	<b>0,79</b>	<b>-0,31</b>	0,01
$R_{ib}$	<b>0,10</b>	<b>0,38</b>	<b>0,49</b>	<b>0,52</b>	<b>-0,41</b>	-0,019

---

## 4. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

---

Le suivi de la température de l'eau en 2010 a couvert la presque totalité de la saison sans glace, ce qui est une nette amélioration par rapport à 2009. L'été 2010 a été caractérisé par de nombreuses canicules. Ces événements chauds ont eu un impact sur la thermie du lac Laberge. Les températures à la surface du lac ont fréquemment dépassé 25 °C et ont même atteint 30 °C par endroits.

La stratification de la colonne d'eau s'est établie très tôt au mouillage B et est restée en place jusqu'à la fin du mois d'août. Il est donc clair que la partie profonde du lac n'a pas bénéficié des échanges d'air avec la surface.

La prise de données météorologiques sur le site a permis de procéder à un calcul du nombre de Richardson qui est probablement plus réaliste que les valeurs calculées à partir des données de vent provenant d'une station située à quelques kilomètres du lac, comme ce fut le cas en 2009.

De plus, les mesures météorologiques locales sont fortement corrélées avec les températures de l'eau mesurées. Il a entre autres été observé que le signe de la corrélation entre le niveau de la nappe souterraine et les températures du lac en eaux plus profondes n'est pas le même que pour les températures plus près de la surface. Il est difficile d'établir la cause de ce phénomène avec une série courte de mesures, mais il est possible que l'entrée d'eau souterraine par le fond du lac tempère la variabilité thermique en profondeur. Il faudra voir si ce phénomène se reproduit dans les prochaines années.

Bien qu'un thermographe ait été déployé du côté du lac où le couvert forestier est plus dense (site en berge #4), l'analyse de variance n'a pas révélé une différence significative entre la température moyenne à ce site et celle aux autres sites. Plusieurs raisons peuvent expliquer cette constatation : 1) il est possible que la profondeur à laquelle les thermographes étaient déployés près des berges ait varié suffisamment pour que la micro-stratification près de la surface biaise certaines mesures et 2) chaque site en berge était orienté différemment et conséquemment, l'exposition à la radiation solaire incidente n'était pas la même.

---

Les mouillages en berge devront être repensés :

- Plutôt que d'installer les thermographes sur des blocs de ciment (qui peuvent rouler ou caler en eau plus profonde), il serait préférable de les attacher à des tiges métalliques plantées dans le fond du lac. Il serait ainsi plus facile de contrôler la profondeur à laquelle les thermographes sont déployés et d'en assurer la constance. Il est aussi proposé d'utiliser des appareils qui mesurent de manière concomitante la température et la lumière incidente à chaque site en berge. Ainsi, les mesures indirectes de la radiation solaire incidente à chaque site pourraient être comparées.
- La méthodologie actuelle permet de faire un suivi de la thermie en des points choisis du lac et avec une grande résolution temporelle (une mesure toutes les 15 minutes). Cependant, bien que les sites de mesure en berge aient été sélectionnés de façon à représenter des berges boisées/naturelles et d'autres plus aménagées, il reste que la couverture spatiale du suivi est actuellement très grossière. Le nombre de stations en berge aurait dû être plus élevé en 2010, mais la perte de thermographes a rendu impossible d'étendre le réseau à plus de quatre stations. Considérant que l'une des motivations de ce suivi est de mesurer l'impact d'éventuels aménagements et de la renaturalisation des berges, il serait intéressant de pouvoir mesurer la température de l'eau non pas en quatre ou six points seulement, mais partout en bordure du lac, voire sur toute l'étendue du lac.

Des mesures de la température de l'eau à très haute résolution spatiale peuvent être obtenues par imagerie thermique. Il s'agit de photographie infrarouge, soit l'enregistrement d'une partie de la lumière émise par la matière et dont l'intensité dépend de la température de la matière émettrice. Les valeurs des pixels des images infrarouges peuvent être ainsi être traduites en températures et ces images consistent donc en des cartes de température pratiquement continues.

L'imagerie thermique est notamment utilisée pour la mesure de la température de l'eau en rivière et pourrait facilement servir à cartographier la température de la surface du lac Laberge. Deux méthodologies peuvent être envisagées :

---

1. Cartographier, à partir de la berge, cinq ou six tronçons de 20 m à 40 m en bord du lac. Cette cartographie pourrait être répétée à intervalle régulier durant l'été (toutes les 2 semaines), ou pour des conditions météorologiques particulières (e.g. durant une canicule, après un orage, pour un niveau bas des lacs).

2. Produire une carte de l'ensemble du lac lors d'une séance de photographie aéroportée. Ceci nécessiterait la location d'un hélicoptère (~1000\$) et l'emploi de personnel pour l'expédition elle-même et pour la production de la carte de températures (~1000\$).

Nous collaborons déjà avec l'équipe du professeur Normand Bergeron, de l'INRS, qui dispose du matériel, de l'expérience et de l'expertise en imagerie thermique. Des échanges informels ont confirmé l'intérêt de N. Bergeron pour une éventuelle collaboration.

---

## 5. RÉFÉRENCES

---

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

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.

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. Saunders College Publishing, 767 pages.

---

## ANNEXE 1. METHODE DE CALCUL DU NOMBRE DE RICHARDSON.

---

Le nombre de Richardson ( $R_i$ ) est un rapport entre le travail qui doit être fait pour mélanger une colonne d'eau stratifiée et l'énergie turbulente disponible. L'énergie turbulente provient du cisaillement entre la couche d'air déplacée par le vent et la surface de l'eau.

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,  $\rho$  est la densité de l'eau en  $\text{kg/m}^3$ ,  $z$  est la profondeur (m) et  $u$  est la vitesse du vent (m/s). Les chaînes de thermographes avaient entre quatre et six sondes, selon les périodes. Une seule vitesse de vent a été obtenue (à environ 5 m d'altitude). Comme en 2009, il a été décidé d'utiliser le « Bulk Richardson number » ( $R_{ib}$ , Padisak et Reynolds, 2003) qui peut être utilisée pour un réservoir initialement fortement stratifié qui subit un mélange causé par le vent :

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

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

---

$\Delta\rho$  a pu être calculé à partir des moyennes de densité provenant des mesures de température dans le métalimnion et l'épilimnion. La profondeur  $h_m$  a été estimée à partir des mesures de température dans la colonne d'eau. L'algorithme de Tanaka et al. (2001) a été utilisé pour convertir les températures en densité :

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

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 2 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 profil de densité, mais le nombre de thermographes étant plus élevé en 2010 qu'en 2009, l'estimation de  $h_m$  devrait être meilleure.

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).