



HAL
open science

Ondes internes et mélange turbulent dans le lac du Bourget

Yannis Cuypers, Brigitte Vinçon-Leite, Michel Poulin, Pierre-Emmanuel Bournet, Bruno Tassin

► **To cite this version:**

Yannis Cuypers, Brigitte Vinçon-Leite, Michel Poulin, Pierre-Emmanuel Bournet, Bruno Tassin. Ondes internes et mélange turbulent dans le lac du Bourget. *Autour du lac du Bourget*, May 2006, Université de Savoie - Le Bourget du Lac, France. pp.56-64. hal-00823895

HAL Id: hal-00823895

<https://enpc.hal.science/hal-00823895v1>

Submitted on 19 May 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et Écosystèmes Limniques



Environnements, Dynamiques et Territoires de la Montagne

Rhône Alpes Région



Communauté d'Agglomération
du Lac du Bourget



Autour du Lac du Bourget

15 - 17 mai 2006

Université de Savoie - Le Bourget du Lac

Actes du colloque

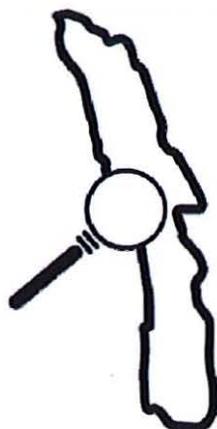
Autour du Lac du Bourget - Université de Savoie - Technolac - 15-17 mai 2006



Edité par Jacquet et al.

Résumé

L'UMR CARTELE (INRA - Université de Savoie), l'UMR EDYTEM (CNRS - Université de Savoie) et le CISALB ont organisé du 15 au 17 mai 2006 le premier colloque national pluridisciplinaire concernant le Lac du Bourget. Cet événement a permis aux scientifiques, gestionnaires, utilisateurs et élus locaux de se rencontrer et de partager ensemble et avec un public plus large, les connaissances actuelles portant sur cet écosystème et son bassin versant. Ces actes reprennent les grands thèmes du colloque « Autour du lac du Bourget » sous la forme d'articles, donnant une photographie au printemps 2006 de l'état d'avancement des connaissances acquises et des travaux scientifiques en cours. Centrés sur l'objet lac, les sujets traitent à la fois de la qualité de l'eau, de la biodiversité, du fonctionnement hydrologique, des relations entre le fonctionnement du lac et l'évolution des facteurs de forçage externes locaux et globaux (changements d'usages sur le bassin versant, changement climatique) mais également de son patrimoine naturel et archéologique. Bonne lecture !



Ondes internes et mélange turbulent dans le lac du Bourget

Internal waves and turbulent mixing in lake Bourget

Yannis Cuypers ^(1*), Brigitte Vinçon-Leite ⁽¹⁾, Michel Poulin ⁽²⁾,
Pierre-Emmanuel Bournet ⁽³⁾, Bruno Tassin ⁽¹⁾

(1) CEREVERE, Centre d'Enseignement et de Recherche Eau-Ville-Environnement, ENPC,
6 av. Blaise Pascal, Champs sur Marne, F-77455, (*) cuyppers@cereve.enpc.fr

(2) CIG, Centre d'informatique géologique, ENSMP, 5 rue Saint Honoré, Fontainebleau, F-77305

(3) INH, SAGAH, Sciences agronomiques appliquées à l'horticulture 2, rue André Le Nôtre - 49045
ANGERS Cedex 01

Résumé. L'évolution du climat des ondes internes dans le lac du Bourget pendant la période de stratification a été caractérisée. Une attention particulière a été portée sur les processus non linéaires survenant pendant l'été 2004 et aboutissant à la génération de fronts internes et d'ondes solitaires susceptibles de produire un mélange important par déferlement sur les rives. Les premières mesures de dispersion turbulente réalisées dans le lac du Bourget à partir d'un microprofileur sont également présentées et mises en corrélation avec la dynamique des ondes internes.

Mots clés : Ondes internes, ondes solitaires, dispersion turbulente, microstructure thermique

Abstract. Internal waves climate during stratification period is characterized. Special focus is given to non linear processes, occurring during the summer 2004 and leading to internal surges and solitary waves, as such non linear waves can lead to important turbulent mixing when shoaling on the lake slopes. First measurements of turbulent dispersion realized using a microprofiler device are also presented and related to the internal wave dynamics.

Key words: internal waves, solitary waves, turbulent dispersion, temperature microstructure

1. Introduction

Dans un lac stratifié, le fort gradient de densité présent dans le métalimnion inhibe les flux verticaux: une particule de fluide située dans cette zone et déplacée verticalement subit une force de rappel et oscille à la fréquence de Brunt-Väisälä (N) autour de sa position d'équilibre. L'existence de ce gradient de densité autorise en revanche la génération d'ondes de gravité stationnaires à l'échelle du lac: les seiches internes. Celles-ci sont initiées lorsque, sous l'action du vent, les surfaces d'isodensité s'inclinent puis relaxent. Typiquement, on estime que 10% de l'énergie transférée par le vent au lac prend la forme de seiches internes, le reste est dissipé sous forme de turbulence dans la couche de surface (Wuest et Lorke 2000).

Plusieurs études ont montré l'importance des ondes internes dans l'équilibre d'un écosystème lacustre. Par exemple, les processus turbulents associés à l'évolution non linéaire des ondes internes accélèrent la dispersion des quantités biogéochimiques à proximité des rives (Macintyre *et al* 1999, Gloor *et al* 2000). De plus, les oscillations verticales et horizontales des masses d'eau modifient l'exposition à la lumière du phytoplancton, entraînant de possibles conséquences sur sa répartition spatiale.

Dès lors, la connaissance du climat des ondes internes apparaît comme un élément nécessaire à la compréhension du fonctionnement écologique d'un lac. Une première étude des ondes internes dans le lac du Bourget, réalisée dans le cadre d'une thèse de doctorat (Bournet, 1996) entre 1994 et 1996 a permis de mettre en évidence la présence quasi permanente des ondes internes, dès que le lac se stratifie. Les résultats présentés ici sont issus des recherches menées en 1994-1996 ainsi que de celles réalisées en 2004-2005 dans le cadre du projet DYLACHEM³. Ils visent à mettre en évidence l'importance des ondes internes dans les processus de mélange, en soulignant l'importance des processus non linéaires.

2. Méthodes et mesures

Deux types de mesures ont été réalisés sur le lac du Bourget:

- Un premier type de mesures consiste en un suivi de la température en continu à différentes profondeurs. Ces mesures qui ont pour but de caractériser la dynamique des seiches internes ont été réalisées au point T situé au sud du lac (90 m de profondeur) entre 1994 et 1996 (Bournet *et al*, 1996) à l'aide d'une chaîne de thermistances Aanderaa avec un pas de temps de 10 mn, à 10 profondeurs entre 0.3 m et 41 m. Entre mai et décembre 2004, ces mesures ont été reprises au point T sur 20 profondeurs entre 1 et 63 m, à un pas de temps de 5 mn. Au cours de la campagne de 2004 des mesures ont également été réalisées au point I (40 m de profondeur) dans la baie de Grésine à l'aide de 10 thermomètres Starmon échelonnés entre 3.5 m et 29 m, avec un pas de temps de 30 s.

- Un second type de mesures réalisées à l'aide d'un microprofileur SCAMP a permis de caractériser la structure thermique à petite échelle (1 mm) de la colonne d'eau. Ces mesures permettent d'estimer la dissipation turbulente par ajustement du spectre du gradient de température à la forme théorique proposée par Batchelor pour le spectre d'un scalaire en écoulement turbulent. Le coefficient de dispersion turbulente K_z est alors estimé par la relation proposée par Osborn (1980): $K_z = \Gamma \epsilon / N^2$, avec ϵ dissipation de l'énergie cinétique turbulente, et N^2 , fréquence de Brunt-Vaisala, en supposant un rapport Γ constant entre la puissance dissipée en chaleur et le flux de flottabilité. Ces mesures ont été réalisées lors de deux campagnes de terrain de deux et trois jours en juin et décembre 2004.

³ DYLACHEM : Dynamique Lacustre et Hétérogénéités Biogéochimiques, programme ECCO, PNRH (2004-2005)

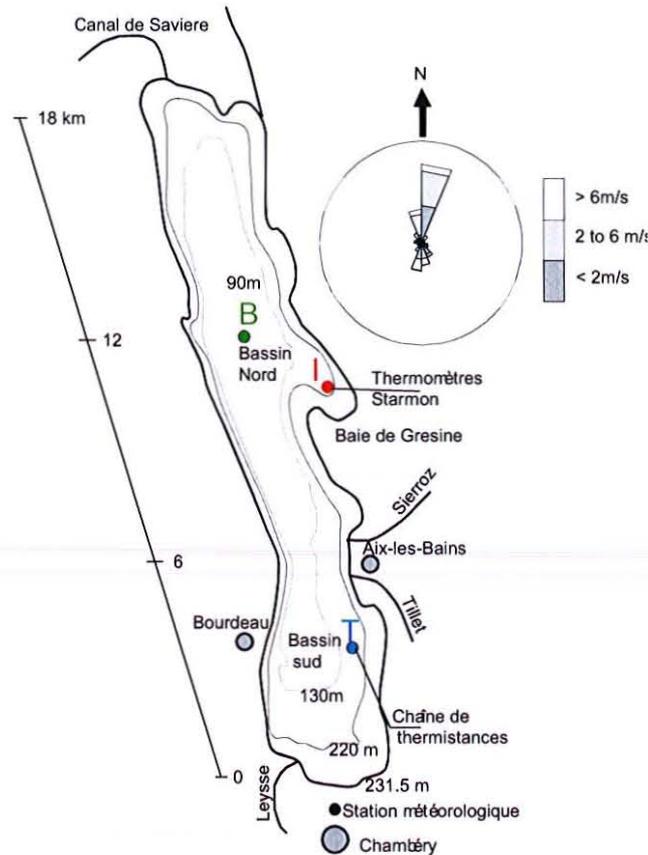


Figure 1. Le lac du Bourget et la rose des vents pour la période mai-novembre 2004.

3. Caractérisation des ondes internes

L'analyse spectrale des variations de l'énergie potentielle moyennée sur la verticale (Cuypers *et al.*, 2006) ou plus directement des fluctuations temporelles de température aux différentes profondeurs (Bournet *et al.*, 1996) permet de caractériser les fréquences dominantes d'oscillation des seiches. Pour les campagnes de 1994 à 1996, comme pour la campagne de 2004, la comparaison de ces fréquences avec un modèle linéaire de seiches internes (Münnich *et al.*, 1992), a permis de mettre en évidence une réponse dominante des seiches internes sous la forme d'un mode stationnaire présentant un nœud horizontal (au milieu du lac) et un nœud vertical (au niveau de la thermocline), le mode V1H1 (Fig.2 et Fig.3). Un exemple d'observation de ce mode en terme d'oscillation des isothermes est donné par la figure 5 b. La période de ce mode décroît au printemps lorsque la stratification s'intensifie et croît en automne lorsque le lac se déstratifie comme le montrent les deux représentations des figures 2 et 3. La période de ce mode est de l'ordre de 80 heures en avril et décembre et descend à une vingtaine d'heures pour les mois de juillet-août de 1994 à 1996, elle est plus proche de 24 heures en juillet-août 2004 en raison d'une stratification moins intense.

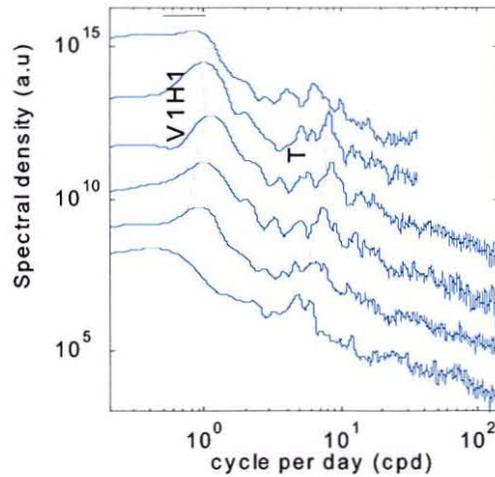


Figure 2. Densité spectrale de l'énergie potentielle (en unités arbitraires de mai à décembre 2004 -de bas en haut) Le trait pointillé rouge correspond aux fréquences déterminées par un modèle linéaire pour les modes V1H1 et T.

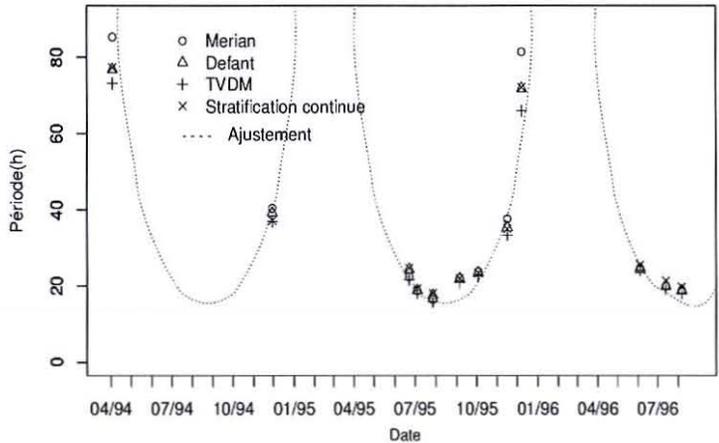


Figure 3. Evolution de la période du mode V1H1 pour différents modèles linéaires pour les années 1994, 95, 96. (d'après Bournet, 1996)

Une seiche interne caractérisée par une période beaucoup plus longue, typiquement trois fois la période du mode V1H1, a également été mise en évidence par l'analyse du spectre de cohérence entre deux isothermes délimitant le métalimnion (Fig 7 en annexe) sur les mesures de 2004. Le pic de cohérence correspondant à cette périodicité est associé à une phase de π caractéristique d'une oscillation en opposition de phase des deux isothermes, et donc à des contractions et dilatations de l'épilimnion (mode vertical 2). L'analyse des spectres de cohérence entre le point I et le point T (données non reproduites), permet en outre de montrer que l'onde tourne, autour d'un point situé au centre du lac, dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, caractérisant ainsi une onde de Kelvin de mode vertical 2.

Lorsque l'amplitude du mode 1 devient grande les effets non linéaires et non hydrostatiques ne sont plus négligeables. Ce seuil de non linéarité est usuellement estimé à l'aide de l'inverse du nombre de Wedderburn ($We^{-1}=\eta_0/h_1$), défini par le rapport entre l'amplitude η_0 du mode V1H1 et l'épaisseur de l'épilimnion h_1 (Boegman *et al* 2005). Ainsi pour une valeur de We^{-1} supérieure à 0.3, la seiche interne stationnaire dégénère sous la forme d'un front propagatif suivi d'un train d'ondes de haute fréquence. Ces ondes haute fréquence ($\sim 10^{-3}$ Hz) observées dans plusieurs lacs prennent généralement la forme d'un train d'ondes solitaires avec un profil dissymétrique résultant d'un équilibre entre effets dispersifs et non linéaires, celles-ci sont généralement suivies d'un train d'ondes dispersives symétriques, sinusoïdales de moindre amplitude.

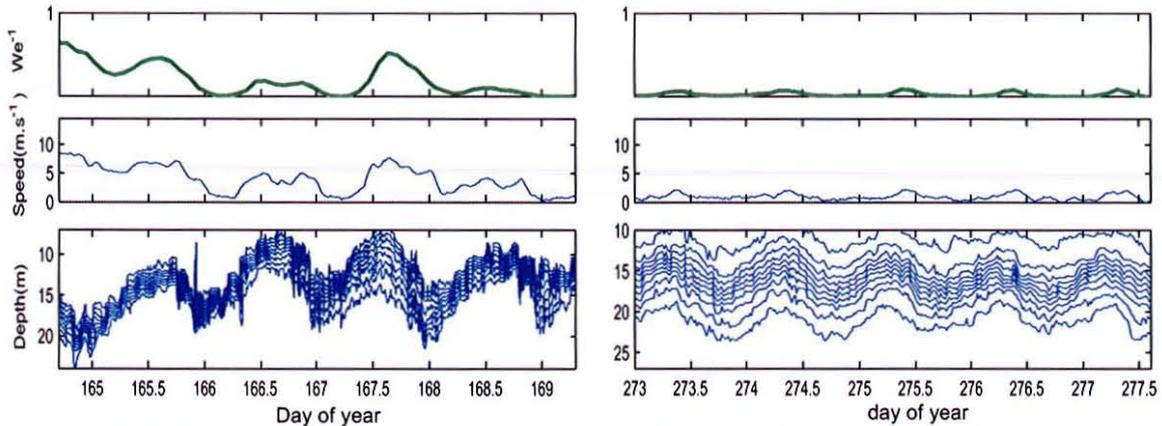


Figure 4. Oscillations des isothermes enregistrées au point T, Evolution du Nombre de Wedderburn et de la Vitesse du vent (a) Enregistrement au cours du mois de juin 2004, les barres verticales marquent la présence d'un front interne. (b) Enregistrement obtenu au cours mois d'octobre 2004, on observe un mode V1H1 linéaire.

Ce type d'ondes solitaire représente une solution particulière de l'équation de Korteweg de Vries (Eq.1) et les phénomènes de dégénérescence non linéaire de seiches ont été interprétés dans les lacs à l'aide de cette équation. En milieu côtier océanique, l'équation de Korteweg de Vries (KDV) a été utilisée avec succès pour modéliser directement des observations de terrain d'ondes solitaires produites par les effets de marée (Holloway *et al* 1997). Dans le cas des lacs, une telle modélisation directe n'a pas encore été réalisée notamment en raison de la complexité de la bathymétrie et/ou des conditions de forçage météorologiques.

Dans le lac du Bourget, au printemps et jusqu'au début de l'été les forts vents du nord et la faible épaisseur de l'épilimnion conduisent à des valeurs de $We^{-1}>3$. Des fronts propagatifs suivis de trains d'ondes haute fréquence sont alors observés (Fig.4 a et Fig.5). Nous avons reproduit ces fronts enregistrés au point T, à l'aide de l'équation de Korteweg de Vries (Eq.1). Cette modélisation inclut le caractère continu de la stratification et les effets dissipatifs provenant du frottement turbulent produit par les courants induits par la seiche sur le fond.

Equation 1 :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + c_0 \frac{\partial \eta}{\partial x} + c_1 \eta \frac{\partial \eta}{\partial x} + c_2 \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \frac{kc_0^2}{c_1} \eta |\eta| = 0$$

Dans l'équation 1, η représente la surface d'isodensité (isotherme) qui présente le déplacement maximum, c_0 la vitesse de phase des onde linéaires, c_1 le coefficient de

non-linéarité, c_2 le coefficient de dispersion et k le coefficient de frottement de Chézy (pour plus de détails on pourra se référer à Holloway *et al* (1997)). Cette région correspond à la thermocline-pycnocline dans le lac. Nous avons considéré comme condition initiale $\eta(0,x)$ une interface inclinée suivant une pente constante. Un tel profil linéaire de l'interface est attendu en régime stationnaire, lorsqu'un vent constant souffle pendant une durée supérieure à $P/4$, avec P la période du mode V1H1. Ce temps est celui de la propagation de la phase sur la longueur du lac pour le mode V1H1.

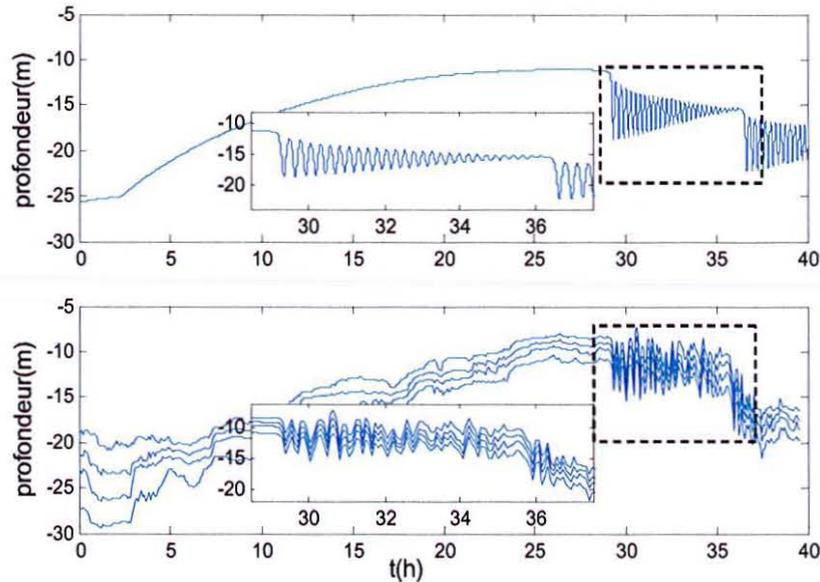


Figure 5. Front interne enregistré au cours du mois de Mai au point T (en bas), comparaison avec la modélisation de l'évolution de η par KDV (en haut). L'insert montre un agrandissement de la zone encadré par des pointillés.

Dans le lac du Bourget, la canalisation du vent le long de l'axe du lac par les montagnes favorise l'apparition de telles conditions. La chute du vent s'accompagne alors par la relaxation de l'interface et l'établissement de la seiche interne. La figure 5 montre l'enregistrement de deux fronts internes au point T, un premier passage à $t=29$ h, puis après réflexion au sud du lac à $t=36$ h et la simulation de cette observation à l'aide de l'équation 1.

On observe un bon accord entre l'observation et la modélisation (Fig.5). Le passage du front et sa réflexion sur la rive sud sont bien reproduits, les ondes haute fréquence observées et simulées ont des fréquences et des amplitudes similaires. Le train d'ondes haute fréquence est composé dans la simulation par des ondes solitaires suivies d'ondes sinusoïdales. La fréquence des ondes haute fréquence (10^{-3} Hz) enregistrée au point T est caractéristique des solitons (Boegman *et al.* 2005), et leur profil est non sinusoïdal.

Les ondes haute fréquence mises en évidence ici peuvent déferler sur les bords car elles atteignent la fréquence critique $f_c=N\beta$ de déferlement (Ivey *et al.* 1994), avec β représentant la pente de la rive. En effet, en considérant la bathymétrie du Bourget et les valeurs caractéristiques de N dans le métalimnion cette fréquence se situe dans la gamme 10^{-4} Hz 10^{-2} Hz. En considérant les ondes solitaires hautes fréquences présentant la plus grande amplitude, et en s'appuyant sur les expériences de laboratoire (Boegman *et al.* 2005), qui donnent le taux d'énergie dissipée lors d'un déferlement en fonction des caractéristiques de la pente et du soliton, on peut estimer un taux ε de dissipation dans le métalimnion dans la gamme $[10^{-6} - 10^{-5} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-3}]$. Ce taux de dissipation est significativement supérieur à la valeur seuil ($\varepsilon_s=15\nu N^2 \sim 10^{-7} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-3}$ avec ν la viscosité cinématique de l'eau) pour l'établissement d'un mélange turbulent dans le métalimnion. Ce mécanisme apparaît

donc susceptible de soutenir un flux induit par un mélange turbulent dans une région pourtant stratifiée comme le métalimnion.

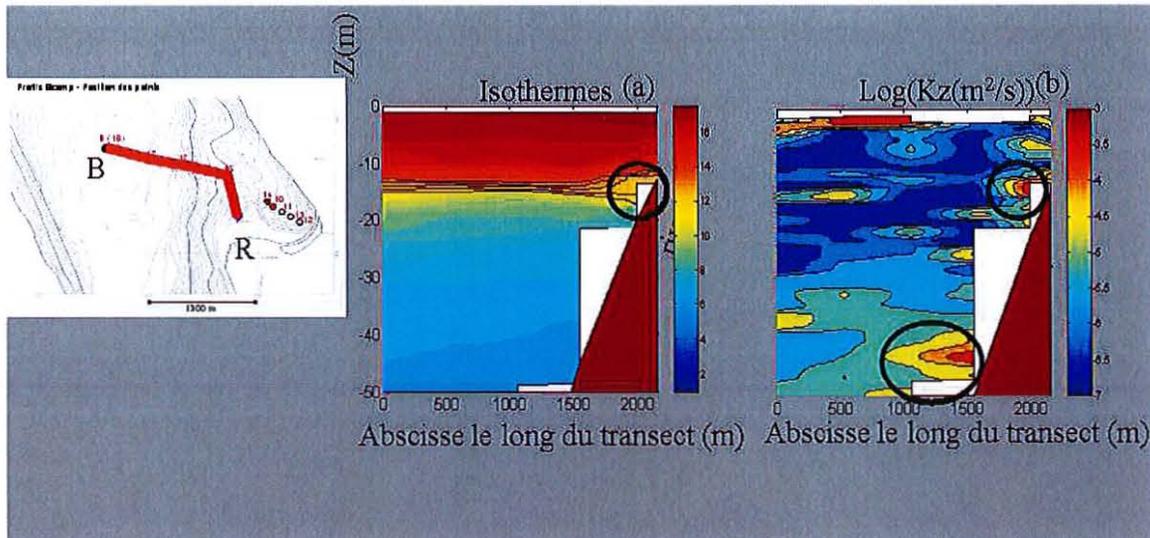


Figure 6. (a) Profil de température le long du transect (B-R). (b) Coefficient de dispersion K_z le long du transect (B-R).

4. Mesures de dispersion turbulente

Une hypothèse à l'origine des recherches entreprises dans le cadre du projet DYLACHEM était la mise en évidence d'une dispersion accrue en zone littorale sous l'action des ondes internes. Les paquets d'ondes haute fréquence mis en évidence par les séries de température et la modélisation, sont à même de soutenir ce mécanisme de mélange. Pour caractériser la variation spatiale de la dispersion, nous avons réalisé un transect de mesures à l'aide du microprofileur SCAMP entre le point B et le point R en baie de Grésine dans la journée du 8 juin 2004 (Fig.6). On observe une dispersion très faible (de l'ordre de la dispersion moléculaire) dans le métalimnion au centre du lac. Cette dispersion augmente de plusieurs ordres de grandeur à mesure que l'on se rapproche du point R (Fig.6.b). Les régions de dispersion maximum sont situées:

- (1) A proximité du fond, on peut supposer là un effet de dispersion turbulente résultant du cisaillement induit par les seiches internes près du fond.
- (2) Dans la région où la thermocline intersecte la rive. Ici la forte dispersion a sans doute pour origine le déferlement d'ondes haute fréquence qui aboutit à une diffusion de la thermocline (Fig.5a).

La région de la baie de Grésine constitue un plateau surélevé par rapport au reste du lac. Le spectre des ondes internes dans cette région laisse supposer une diffraction importante des seiches internes et la génération d'ondes haute fréquence par interaction avec la bathymétrie qui peuvent s'ajouter aux ondes haute fréquence générées par les mécanismes non linéaires précédemment décrits.

5. Conclusion

La caractérisation des ondes internes dans le lac du Bourget a permis de mettre en évidence les modes dominants des seiches. Au printemps, le mode le plus énergétique (V1H1) peut dégénérer et prendre la forme d'un front abrupt suivi d'un train d'ondes haute fréquence. Ce phénomène déjà observé dans certains lacs a été modélisé avec succès par une équation de Korteweg de Vries. Ces ondes haute fréquence sont dans la bande de fréquence critique 10^{-4} Hz 10^{-2} Hz pour laquelle un déferlement sur les rives est attendu. Ce déferlement est alors susceptible de générer une dispersion turbulente importante. Les mesures de dispersion turbulente montrent une forte hétérogénéité de la dispersion et semblent confirmer cette hypothèse.

Ces mécanismes de mélange par les ondes internes en zone littorale peuvent jouer un rôle critique, en générant des flux biogéochimiques verticaux dans une région (le métalimnion) où les autres mécanismes (turbulence de surface, et turbulence dans la couche limite près du fond) deviennent inopérants. Ces flux de nutriments pourraient en particulier permettre de maintenir une production primaire dans l'épilimnion en période estivale, alors qu'il est épuisé en nutriment. Cependant les flux générés par ces mécanismes sont par nature intermittents et difficiles à modéliser. Néanmoins, la modélisation par l'équation de Korteweg de Vries doit permettre une paramétrisation du flux d'énergie transféré de la seiche vers les ondes haute fréquence en fonction de la stratification et des conditions de vent. Cette paramétrisation pourra alors être utilisée pour estimer des flux additionnels générés près des rives et incluse dans un modèle du fonctionnement général du lac déjà développé au CEREVE.

Références bibliographiques

- Boegman, L., Ivey, G.N. et Imberger, J. 2005. The degeneration of internal waves in lakes with sloping topography. *Limnol. Oceanogr.* 50: 1620-1637.
- Bournet, P. E. 1996. Contribution on à l'étude hydrodynamique et thermique du lac du Bourget, courants de densité et ondes internes. Th. Doct. ENGREF, CEREVE, 335p.
- Bournet, P.; E., Dartus, D., Tassin, B et Vinçon Leite B. 1996. Ondes internes du lac du Bourget: analyse des observations par des modèles linéaires. *Rev. Sci. Eau.* 9: 247-266.
- Cuypers, Y., Vinçon Leite B., Tassin, B. et Poulin M. Internal waves climatology in a deep sub-alpine lake. Soumis à *Limnol. Oceanogr.*
- Gloor M., Wüest A., Imboden, D., 2000. Dynamics of mixed bottom boundary layers and its implications for diapycnal transport in a stratified, natural water basin. *J. Geophys. Res.* 105: 8629-8646.
- Horn, D. A, Imberger, J. et Ivey, G. N. 2001. The degeneration of large-scale interfacial gravity waves in lakes. *Jour. of Fluid. Mech.* 434: 181-207
- Holloway, P. E. Pelinovsky, E. Talipova, A. and Barnes, B. 1997. A nonlinear model of internal tide transformation on the Australian north west shelf. *J. Phys. Oceanogr.* 27:871-896.
- Ivey, G. N., De Silva P. et Imberger J. 1995. Internal waves, bottom slopes and boundary mixing. *Eighth proceedings "Aha huliko" a hawaiian winter workshop, flow topography interactions.* pp199-206
- Macintyre, S., Flynn, K. M., Jellison, R. et Romero, J. R. 1999. Boundary mixing and nutrient fluxes in Mono Lake, California. *Limnol. Oceanogr.* 44(3): 512-529.
- Münnich, M., A. Wüest and D.M. Imboden, 1992, Observations of the second vertical mode of the internal seiche in an alpine lake. *Limnol. Oceanogr.* 37: 1705-1719.
- Osborn, T.R. 1980. Estimates of the rate of vertical diffusion from dissipation measurement. *J. Phys. Oceanogr.* 10:83-89.
- Wüest A. et A. Lorke 2003. Small-Scale Hydrodynamics in Lakes. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 35: 373-412.

Annexe. Figure 7. Spectre de cohérence pour les isothermes bornant le métalimnion au point T pour 4 périodes allant de Juin à octobre 2004 (de gauche à droite). Les bandes verticales représentent l'estimation des périodes des modes V1H1 et Kelvin (K2) d'après un modèle linéaire.

