Zeitschrift: Archives des sciences [2004-ff.]

Herausgeber: Société de Physique et d'histoire Naturelle de Genève

Band: 65 (2012)

Heft: 1-2

Artikel: Structure thermique et courantologie du Léman = Thermal structure and circulation patterns of Lake Geneva

Autor: Le Thi, Anh Dao / De Pascalis, Francesca / Umgiesser, Georg

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-738352

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Structure thermique et courantologie du Léman

Thermal structure and circulation patterns of Lake Geneva

Anh Dao LE THI[1,*], Francesca DE PASCALIS[2], Georg UMGIESSER[2] and Walter WILDI[1]

Ms. reçu le 10 août 2012, accepté le 29 novembre 2012

Abstract

Thermal structure and circulation patterns of Lake Geneva. – *Hydrodynamic processes in Lake Geneva (Switzerland and France) have been studied since the pioneering work of F.A. FOREL who initiated the science of limnology as a branch of oceanography. Lake Geneva is characterized by a thermal stratification of the water column from spring to autumn and a homogenization from the end of winter to the beginning of spring. Lake Geneva is a «monomictic» lake according to the classification of Hutchison.*

To obtain a better understanding of the hydrodynamics of Lake Geneva, a three-dimensional finite element model with the ability to simulate the temperature structure and water movement was applied. The finite element grid superimposed on the bathymetric data has a resolution of 8149 triangular elements different size ranging from 10 to 100 meter each side and 4553 nodes, covering the two lake basins: Petit-Lac and Grand-Lac.

The model was run for a period of one year (2005) with continuously updated weather data. The model solves the equations for the conservation of mass transport, dynamics and temperature, which can simulate the water temperature, current velocity and direction.

The annual thermal cycle begins with isothermal conditions in winter, followed by thorough mixing in late winter, and by stratification from May to October. The annual cycle of temperature distribution in the Grand-Lac shows strong seasonal trends. Depending on the difference in volume and morphology of the basin, cooling and warming during the transition periods (spring and fall) are slower in the Grand-Lac than in the Petit-Lac.

Over much of the year, the waters of Grand-Lac circulate in a gyre turning counterclockwise. The size and lifetime of the vortex varies depending on weather conditions. Appendices of the main gyre are found in major bays of the northern shore, in Morges and Vidy (Lausanne). These are less stable than the main gyre and their direction may switch depending on wind direction. In the transitional area between the Grand-Lac and the Petit-Lac a gyre oriented clockwise is established. The western end of the Petit-Lac is characterized by a counterclockwise circulation system. In the Petit-Lac, flow towards the Rhone outlet mainly occurs in surface waters and along the borders of the basin, while the return currents to the Grand-Lac are deeper-water currents and found in the central part of the basin. In the Grand-Lac, the downstream flow from East to West follows the northern edge of the basin, while the return current, from the western to the eastern part of the basin, predominantly follows the southern border.

Results of modelling are generally in good agreement with field data; however systematic current surveys in the different parts of the lake basin are still missing for the model validation.

Keywords: *Lake Geneva, thermal structure, lake currents, gyre, finite elements*

[1] *Institute F.-A. Forel et Institut des Sciences de l'environnement (ISE), Université de Genève, 10 Route de Suisse, CP 416, CH-1290 Versoix, Suisse.*

* Corresponding author: E-mail: anhdao.le@unige.ch

[2] *Institute of Marine Science – National Research Council (ISMAR-CNR), Venice, Italy.*

Résumé

Les processus hydrodynamiques du Léman (Suisse et France) ont été étudiés depuis les travaux fondateurs de F.A. FOREL qui a initié la science de la limnologie comme une branche de l'océanographie. Le Léman est caractérisé par un régime thermique de stratification de la colonne d'eau du printemps à l'automne et une homogénéisation vers la fin de l'hiver soit un régime de lac «monomictique» selon la classification de Hutchison.

Afin d'obtenir une meilleure compréhension de l'hydrodynamique du Léman, un modèle tridimensionnel par éléments finis avec la capacité de simuler la structure de température et les mouvements d'eau a été appliqué. La grille des éléments finis superposée aux données bathymétriques est d'une résolution de 8149 éléments triangulaires de taille variable entre 10 et 100 m chaque côté et 4553 nœuds, couvrant les deux bassins du lac: Petit-Lac et Grand-Lac.

Le modèle a été exécuté pour une période d'un an (année 2005) avec des séries temporelles de données météorologiques et hydrologiques. Le modèle résout les équations de conservation pour le transport de masse, de la dynamique et de la température, ce qui permet de simuler la température de l'eau, la vitesse des courants et leur direction.

Le cycle thermique commence par l'état isotherme en hiver, suivi d'un mélange complet ou partiel vers la fin de l'hiver, puis par la stratification de mai à octobre. Le cycle annuel de la distribution thermique dans le Grand-Lac montre des tendances saisonnières renforcées. En fonction de la différence de volume et de morphologie du bassin, refroidissement et réchauffement au cours des périodes de transition (printemps et automne) sont moins rapides dans le Grand-Lac que dans le Petit-Lac. Sur une grande partie de l'année, les eaux du Grand-Lac constituent une grande gire qui tourne dans le sens antihoraire. La taille et la durée de vie de ce tourbillon varient selon les conditions météorologiques. Des gires annexes s'observent dans les baies majeures de la rive septentrionale, à Morges et à Vidy (Lausanne). Ces gires sont moins stables que la gire principale du Grand-Lac et leurs orientations peuvent basculer en fonction de la direction du vent. Au passage du Grand-Lac au Petit-Lac, une gire orientée dans le sens horaire peut s'installer. La terminaison occidentale du Petit-Lac est caractérisée par un système de circulation antihoraire. Dans le Petit-Lac, les courants descendants vers Genève se font essentiellement dans les eaux de surface et le long des bordures du bassin, alors que les courants de retour vers le Grand-Lac se font plutôt en eau profonde et au centre. Dans le Grand-Lac, les courants descendants suivent la bordure méridionale du bassin, alors que les courants de retour se font de préférence le long de la bordure méridionale.Les résultats des différentes modélisations concordent avec les observations de terrain; toutefois, notamment la validation par des mesures systématiques de la courantologie dans les différentes parties du bassin lacustre reste ouverte.

Mots-clés: *Le Léman, structure thermique, courant lacustre, gire cyclonique, éléments finis*

Introduction

Le Léman (ou: Lac Léman), entre la Suisse et la France, forme le réservoir d'eau douce le plus important d'Europe occidentale (Table 1, CIPEL 2006). Son bassin a été formé au cours du Pléistocène par érosion glaciaire (Wildi et al. 1999).

Le flux thermique ainsi que le vent sont les principaux facteurs extérieurs qui contrôlent la dynamique physique du lac ainsi que sa structure thermique. Les processus physiques à l'intérieur de la colonne d'eau dépendent en conséquence surtout des conditions climatiques, du régime hydrologique, de la topographie et de la morphologie du lac (Kreitmann 1931; Pourriot et Meybeck 1995). Le Léman est situé dans la zone de climat tempéré d'Europe occidentale (46° 27'N 6° 32'E), avec une température moyenne annuelle de l'air de 12 – 13°C. Il est longé par la chaîne alpine au Sud-Est et les montagnes du Jura au Nord-Ouest. Le bassin du lac génère lui-même un microclimat. Les vents dominants soufflent du Nord-Est (*bise*) et du Sud-Ouest, et sont orientés parallèlement aux chaînes de montagnes environnantes (Amberger et al. 1976).

Dans la partie occidentale du lac, la proximité du Jura et des Alpes crée une canalisation et une amplification du vent. Des vents locaux de différentes directions sont principalement liés aux conditions thermiques journalières (Amberger et al. 1976).

Table 1. Données morphométriques du Léman et de ses deux sous-bassins, Petit-Lac et Grand-Lac (CIPEL 2006).

	Petit-Lac	Grand-Lac	Léman
Volume (km³)	3	86	89
Surface (km²)	81.2	498.9	580.1
Profondeur max. (m)	76	309.7	309.7
Profondeur moy. (m)	41	172	152.7
Longueur (km)	23.3	49	72.3
Largeur max. (km)	4.7	13.8	13.8

Les processus naturels du Léman ont été étudiés depuis les travaux fondateurs de Forel (1892, 1895, 1904). Au cours du printemps, les couches d'eau de surface se réchauffent et le lac devient stratifié en température. Par conséquent, le Léman se classe parmi les lacs monomictiques chauds selon la classification de Hutchison (1957).

Les conditions pour le mélange hivernal de la colonne d'eau peuvent être atteintes à la fin de la période de refroidissement au mois de février (Lemmin 1995). Toutefois, le mélange complet ne se produit pas chaque année. Les périodes froides peuvent en effet être trop courtes, ou les vents trop faibles pour mélanger le lac sur toute sa colonne. Le temps de retour moyen pour un mélange complet du Léman était d'environ 8 années au cours des dernières décennies (CIPEL 2006). Entre deux événements de mélange, la température en eau profonde augmente progressivement, année après année, mais diminue rapidement au cours d'un hiver froid et venteux prolongée, comme ce fut le cas en 1981, 1986, 1999 et 2006.

Dienert & Guillerd (1948) ont étudié des mouvements de masses d'eau du Léman à l'aide de flotteurs et ont montré que les courants les plus importants dans le Petit Lac sont très irréguliers puisqu'ils dépendant largement au régime des vents. Bohle-Carbonell (1986) a analysé les profils de température, les champs de vent et les courants en utilisant les données pour les années 1981-1984. Les courants du lac liés à des vents d'été et de la circulation cyclonique dans les conditions de lac stratifiés ont été étudiés par Lemmin et Adamo (1996). Les auteurs ont souligné l'importance de la distribution spatiale et temporelle du vent pendant la période estivale. Oesch et al. (2005) ont estimé des températures de surface à partir de données satellitaires multi-spectrales. Cette méthode élargit considérablement la base de données, mais l'interprétation est restreinte aux couches superficielles de la colonne d'eau.

Ces études fournissent la base pour la compréhension des processus physiques du Léman. Cependant, une vision intégrée du lien entre les facteurs climatiques et le système 3D du lac est toujours manquante. Par conséquent, l'explication des processus physico-chimiques et biologiques reste généralement limitée à des considérations 1D ou 2D et de leur variation dans le temps. C'est aussi le cas pour l'approche actuelle de surveillance du lac (par exemple CIPEL 2009).

Dans le modèle utilisé par Bauer et Graf (1979) et Graf (1983), la méthode des éléments finis a déjà été appliquée, toutefois limitée à la période d'homogénéité thermique de la colonne d'eau au cours des mois d'hiver et un champ de vent uniforme. Par conséquent, l'évolution saisonnière du système hydrodynamique en fonction d'un champ spatio-temporelle variable du vent n'a pas été modélisée jusqu'à présent. Perroud et al. (2009) ont comparé quatre modèles différents de simulation des profils de température des lacs (1D). Par cette démarche en une dimension, l'étude a exploré l'hydrodynamique du lac, sans tenir compte des variations horizontales de la masse d'eau.

[1] Commission Internationale pour la Protection des Eaux du lac Léman: http://www.cipel.org/

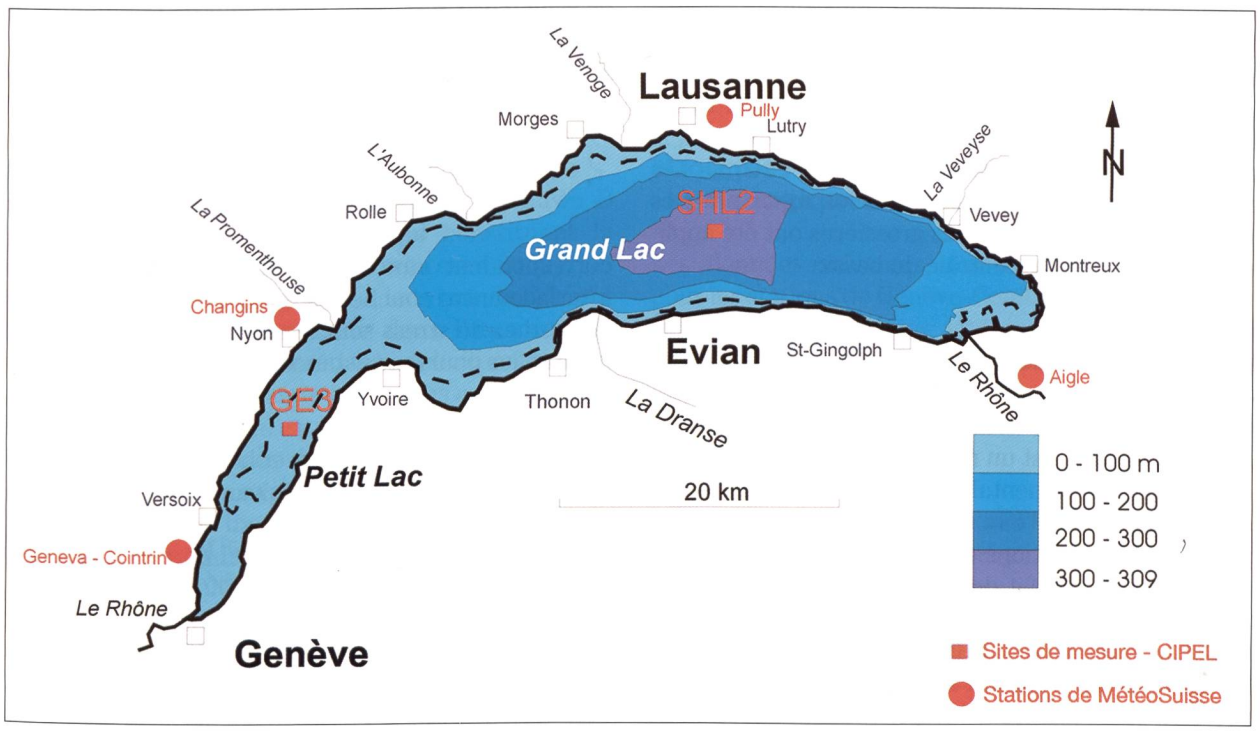

Fig. 1. Cadre d'étude du Léman ; stations météorologiques; sites de mesure de la CIPEL[1].

Pour les grands bassins comme celui du Léman, l'inhomogénéité du champ des vents sur la surface du plan d'eau peut influencer la thermodynamique des masses d'eau (Podsetchine et al. 1999). La connaissance actuelle du système hydrodynamique dans le Léman est encore disparate en raison de l'absence d'observations de terrain à long terme, à l'exception des observations 1D sur le site de surveillance SHL2 et dans une moindre mesure, sur le site GE3 (Fig. 1, CIPEL 2009).

Le modèle SHYFEM

Les modèles numériques offrent une approche intéressante pour une meilleure compréhension de l'évolution thermique et hydrodynamique d'un lac. Dans cette étude, un modèle en trois dimensions (3D) basé sur une simulation en éléments finis a été appliquée au Léman pour analyser l'évolution saisonnière du régime thermique, la stratification thermique, l'accumulation et la libération de la chaleur, le mélange hivernal de la colonne d'eau à l'intérieur et entre les deux sous-bassins du lac ainsi que la courantologie.

Une grille d'éléments finis intégrée à un modèle bathymétrique a été appliquée avec 8149 éléments triangulaires et 4553 nœuds (Fig. 2).

Ce modèle tridimensionnel par éléments finis dispose de 109 couches verticales, distribuées plus étroitement dans la tranche supérieure de 50 m (une couche tous les 1 mètre) pour déterminer plus précisément la stratification estivale et la disparition de la thermocline en hiver (fusion de la partie supérieure de la couche mélangée et la couche inférieure non mélangée en hiver), et moins dense (de 2 à 5 mètres d'épaisseur) dans les couches inférieures du hypolimnion vers le bas du bassin. Dans le sens latéral, la résolution de la grille varie entre 10 m et 100 m. Les mailles fines ont été placées dans les zones proches du rivage, et les mailles plus grossières ont été appliquées pour la partie centrale du bassin.

Formulation du modèle

SHYFEM, ***S**hallow water **HY**drodynamic **F**inite **E**lement **M**odel*, est un modèle basé sur la résolution d'équations fondamentales, appliquées à chaque couche de la colonne d'eau, avec un pas de modélisation variable. Ces variations de pas de temps (inférieur à 300 seconds) permet de diminuer les instabilités du modèle avec l'introduction des termes advectifs, viscosité horizontale et la différence de taille des éléments finis. La diffusion horizontale, le gradient de pression et les termes d'advection dans l'équation de mouvement sont calculés explicitement. La force de Coriolis, les termes des gradients de pression dans l'équation dynamique et le terme de divergence dans l'équation de continuité sont traités de façon semi-implicite (Bellafiore et Umgiesser 2009). Le modèle utilise le «*Général Ocean Turbulence Mode*» GOTM (Burchard et Petersen 1999) pour le paramétrage de la turbulence. GOTM est dérivé de l'équation hydrodynamique avec la possibilité de simuler les processus de transport avec une bonne précision (Goudsmit et al. 2002).

Les équations complètes appliquées pour chaque couche verticale sont les suivantes:

$$\frac{\partial u_l}{\partial t}+u_l\frac{\partial u_l}{\partial x}+v_l\frac{\partial u_l}{\partial y}+w_l\frac{\partial u_l}{\partial z}-fv_l=-g\frac{\partial \zeta}{\partial x}-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial x}-\frac{g}{\rho_0}\frac{\partial}{\partial x}\int_{-H_l}^{\zeta}\rho' dz$$
$$+v_t^H\left(\frac{\partial^2 u_l}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u_l}{\partial y^2}\right)+\frac{1}{\rho_0}(\tau_x^{l-1}-\tau_x^l) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_l}{\partial t}+u_l\frac{\partial v_l}{\partial x}+v_l\frac{\partial v_l}{\partial y}+w_l\frac{\partial v_l}{\partial z}+fu_l=-g\frac{\partial \zeta}{\partial y}-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial y}-\frac{g}{\rho_0}\frac{\partial}{\partial y}\int_{-H_l}^{\zeta}\rho' dz$$
$$+v_t^H\left(\frac{\partial^2 v_l}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v_l}{\partial y^2}\right)+\frac{1}{\rho_0}(\tau_y^{l-1}-\tau_y^l) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(u_l h_l)+\frac{\partial}{\partial y}(v_l h_l)=0 \quad (3)$$

où l est la couche verticale, $\mathbf{u_l}$, $\mathbf{v_l}$, $\mathbf{w_l}$ sont les vitesses selon les directions **x**, **y** et **z**, $\mathbf{p_a}$ est la pression atmosphérique, **g** est l'accélération gravitationnelle, **f** est le paramètre de Coriolis, le niveau d'eau ζ et $\rho = \rho_0 + \rho^l$ densité de l'eau. $\mathbf{H_l}$ correspond à la profondeur de la couche **l**, $\mathbf{h_l}$ désigne l'épaisseur de la couche **l**, $\mathbf{V_t^V}$ correspond à la viscosité turbulente (*eddy viscosity)* verticale, $\mathbf{v_t^H}$ à la viscosité turbulente horizontale, et

$$\tau_x^l=v_t^V\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_l \text{ et } \tau_y^l=v_t^V\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)_l \quad (4)$$

correspondent aux termes de stress pour chaque interface entre couches. Les conditions limites pour les termes de stress sont les équations quadratiques habituelles pour la résistance au vent et le frottement sur le fond.

L'équation pour le transport et la diffusion de la température et la salinité est la suivante:

$$\frac{\partial T_l}{\partial t}+u_l\frac{\partial T_l}{\partial x}+v_l\frac{\partial T_l}{\partial y}+w_l\frac{\partial T_l}{\partial z}=v_s^H\left(\frac{\partial^2 T_l}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_l}{\partial y^2}\right)+v_s^V\frac{\partial^2 T_l}{\partial z^2}+Q \quad (5)$$

où $\mathbf{T_l}$ est la température de la couche **l**, $\mathbf{V_s^H}$ et $\mathbf{V_s^V}$ sont les coefficients de diffusion horizontale et verticale, respectivement, et **Q** représente les sources et les puits pour la température (ou salinité).

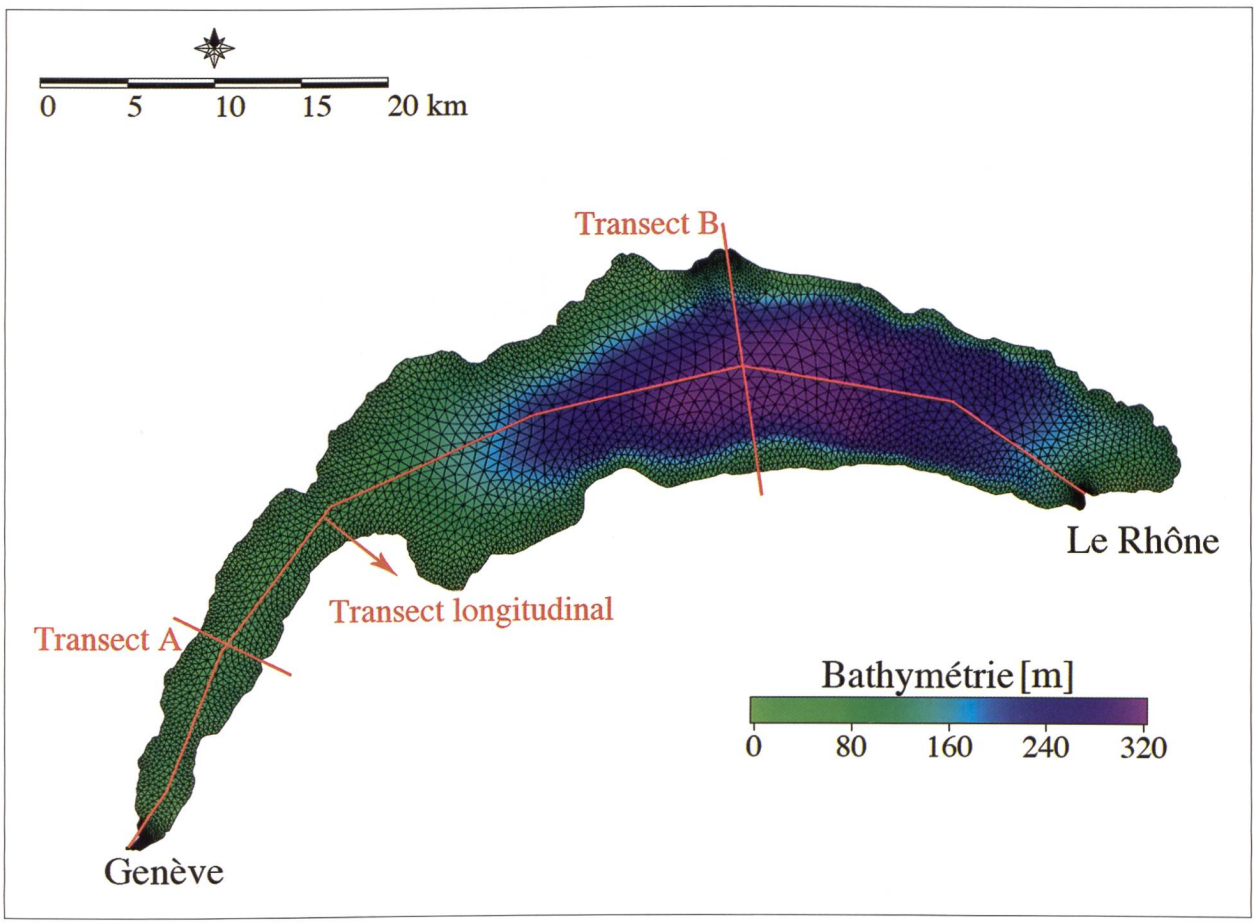

Fig. 2. Eléments finis appliqués sur la bathymétrie du Léman.

Les deux équations cinétiques, l'équation de continuité et les 2 équations de conservation pour la salinité et la température ainsi que l'équation hydrostatique et l'équation d'état, forment un ensemble de 7 équations à 7 inconnues qui sont résolues par la méthode des éléments finis.

Le modèle SHYFEM utilise une grille Arakawa B pour chacune des z couches qui constituent la colonne d'eau (Bellafiore et Umgiesser 2009). Le gradient de pression barotrope, le terme de Coriolis et des termes de divergence dans l'équation de continuité sont semi-discrétisés implicitement, tandis que le frottement sur le fond et les conditions de stress verticaux sont totalement implicite. Les baroclines, des termes de diffusion d'advection et horizontale sont explicitement discrétisés. Le modèle est donc inconditionnellement stable par rapport à des ondes de gravité rapides, ondes de Rossby et de diffusion verticale et le frottement sur le fond. Les conditions aux limites sont libres de friction sur les limites matérielles. Aux embouchures des rivières, les profondeurs d'eau des chenaux fluviatiles doivent être prédéfinies. Pour simplifier les conditions initiales du modèle numérique, une température unique de 6°C a été fixée pour l'initialisation de la simulation le 1er janvier 2005, correspondant à un état isotherme pour toute la masse d'eau du lac.

Données météorologiques et hydrologiques

Les données suivantes, fournies par MétéoSuisse pour les stations de Genève-Cointrin, Changins, Pully et Aigle ont été utilisées: vitesse du vent (m/s) et sa direction, température atmosphérique, le rayonnement solaire (radiation, W/m^2), les précipitations (mm/h), humidité (%) et couverture nuageuse (octa).

Les paramètres météorologiques clef à la station de Pully sont présentés dans la Fig. 3.

Vents: Dans la région de Genève (Petit-Lac), deux vents dominants, la *bise* de Nord-Est et le *vent* de Sud-Ouest (Figs. 3, 4), ont été identifiés; ils sont notamment influencés par les caractéristiques topographiques du bassin du Léman et des chaines mon-

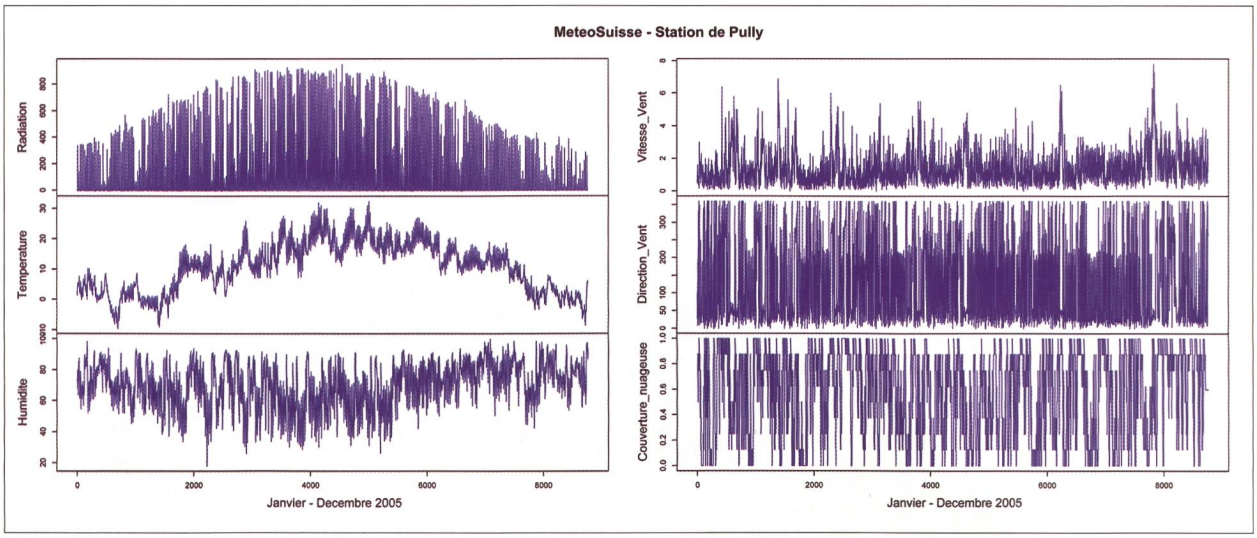

Fig. 3. Rayonnement solaire, température de l'air, humidité, vitesse et direction des vents et couverture nuageuse à la station de Pully – MétéoSuisse pour l'année 2005 (Fig. 1).

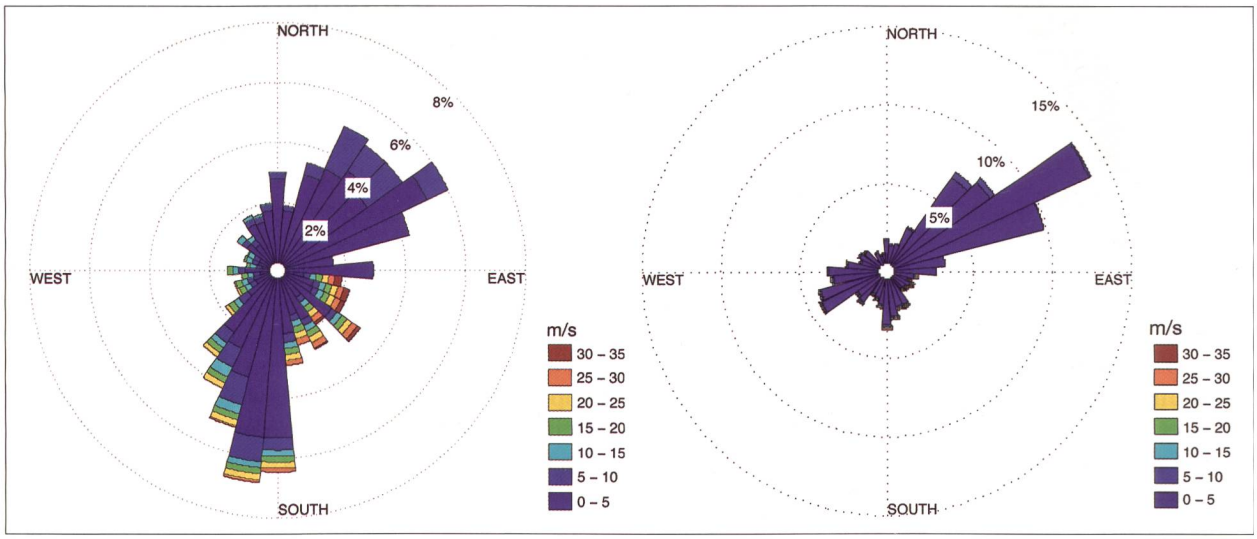

Fig. 4. Rose des vents aux stations MétéoSuisse de Pully (droite) et de Genève-Cointrin (gauche) pour l'année 2005 (% fréquence des vents par direction).

tagneuses qui l'entourent (fig. 5). Les épisodes de vent durent souvent 2 à 3 jours et parfois plus. Pendant ces événements, les vents maintiennent une intensité et une direction stable du cisaillement à la surface du lac (Bauer et Graf 1978).

Les données hydrologiques: Les données de débit (m^3/s) et de la température (°C) du Rhône ont été extraites de la base de données de l'Office fédéral de l'environnement, et celles concernant la Dranse de la «Banque Hydro» de France. Le Rhône fournit le débit d'eau principal dans le lac avec une moyenne annuelle à l'embouchure de la rivière est de 182 m^3/s (OFEV 2008). A la sortie du Léman à Genève le débit moyen est de 252 m^3/s (OFEV 2008). Les autres affluents qui se jettent dans le lac sont la Dranse, la Veveyse, la Venoge, l'Aubonne et la Promenthouse (Fig. 1). En raison de la contribution mineure de ces rivières par rapport au volume total, seules les données concernant le Rhône et la Dranse ont été utilisées ici.

Les taux de précipitation et l'évaporation sont les deux proches d'une valeur moyenne de 1'000 mm / an (Amberger et al. 1976).

Les données de surveillance de la Commission internationale pour la protection des eaux du Léman (CIPEL 2006) ont été utilisées afin de comparer le modèle à des mesures de terrain.

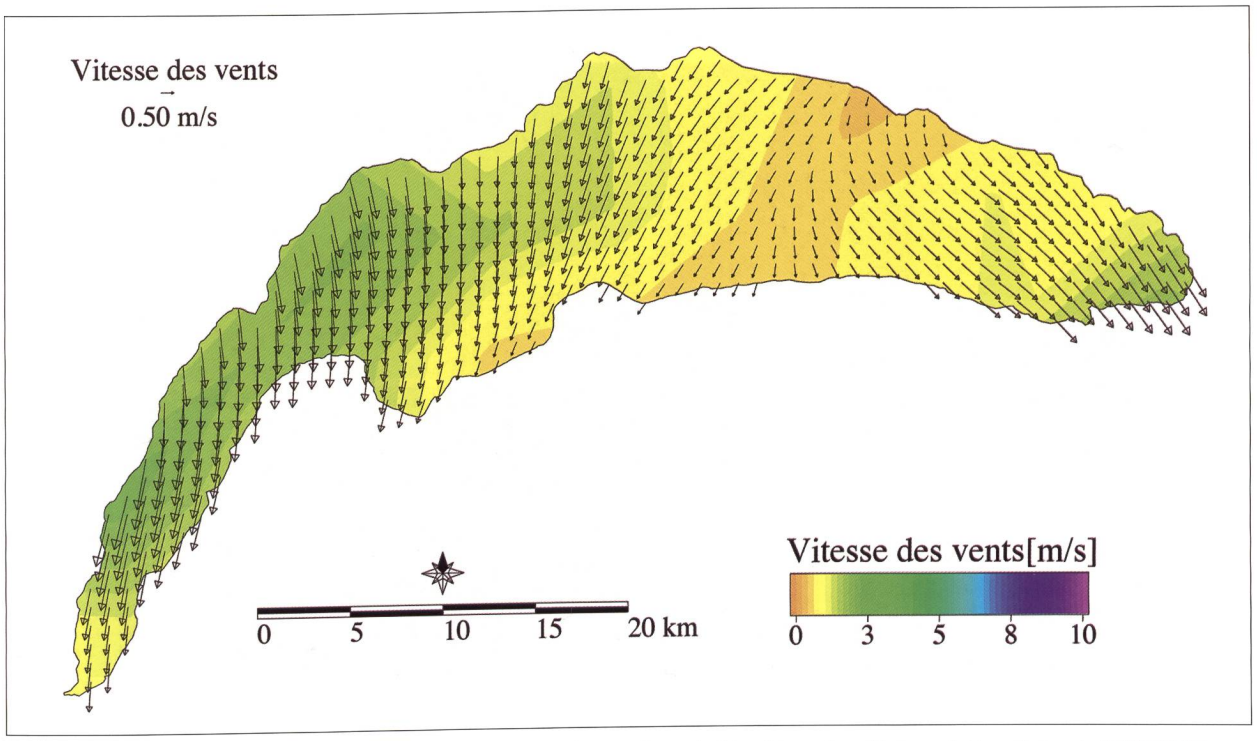

Fig. 5: Champ interpolé des vents, 20 janvier 2005, situation typique de bise (données d'interpolation tirées de COSMO 7[2]).

Résultats

Evolution thermique du Léman au cours d'un cycle annuel

La Fig. 6 montre la distribution de la température de l'eau dans le transect A (Fig. 2), Petit – Lac pour les quatre saisons. Le cycle thermique commence par l'état isotherme en hiver, suivi d'un mélange complet vers la fin de l'hiver, puis par la stratification de mai à octobre. La Fig. 6A montre le processus de refroidissement au cours de la période d'hiver (février 2005) à partir de la rive et l'expansion vers la zone plus profonde. La Fig. 6B montre le début de la formation de la thermocline au début du printemps et de son évolution dans des conditions stables dans la Fig. 6C. Enfin, la Fig. 6D révèle la dé-stratification en fin d'automne et au début de l'hiver.

En raison de sa plus grande taille par rapport au Petit-Lac, le Grand-Lac montre des tendances saisonnières renforcées du cycle annuel de la distribution thermique (Figs. 7, 8). En fonction de la différence de volume et de morphologie du bassin, refroidissement et réchauffement au cours des périodes de transition (printemps et automne) sont moins rapides dans la transversale B que dans la transversale A.

La Fig. 8 met en évidence la situation verticalement homogène de la colonne d'eau en hiver, puis la mise en place d'une stratification complète et d'une thermocline sur l'ensemble du lac du printemps à l'été et le début de l'automne. La réponse au réchauffement est manifestement plus rapide dans le Petit-Lac que dans le Grand-Lac. De la fin de l'automne à l'hiver, le Petit-Lac commence à refroidir en premier, plus rapidement que le bassin du Grand-Lac. Des différences mineures au sein des bassins pourraient être liées aux circulations locales entre les zones côtières et les zones profondes, de même qu'à l'influence des apports des rivières, notamment du Rhône.

Courantologie

Sur l'ensemble de l'année, et en moyennant les courants pour chaque élément de la modélisation, les eaux du Grand-Lac forment une grande gire qui tourne dans le sens antihoraire (Figs. 9, 10). La dimension et l'intensité de ce tourbillon varient selon les conditions météorologiques. La gire se met souvent en place avec un tourbillon de petite taille situé dans la partie centrale du bassin, où le gradient de la bathymétrie du fond est faible (fond plat). Un vent continu de la même direction soutient progressivement le modèle cyclo-

[2] COSMO 7 est un modèle numérique à l'échelle régionale pour la prévision météorologique exploité par MétéoSuisse: http://www.cosmo-model.org/

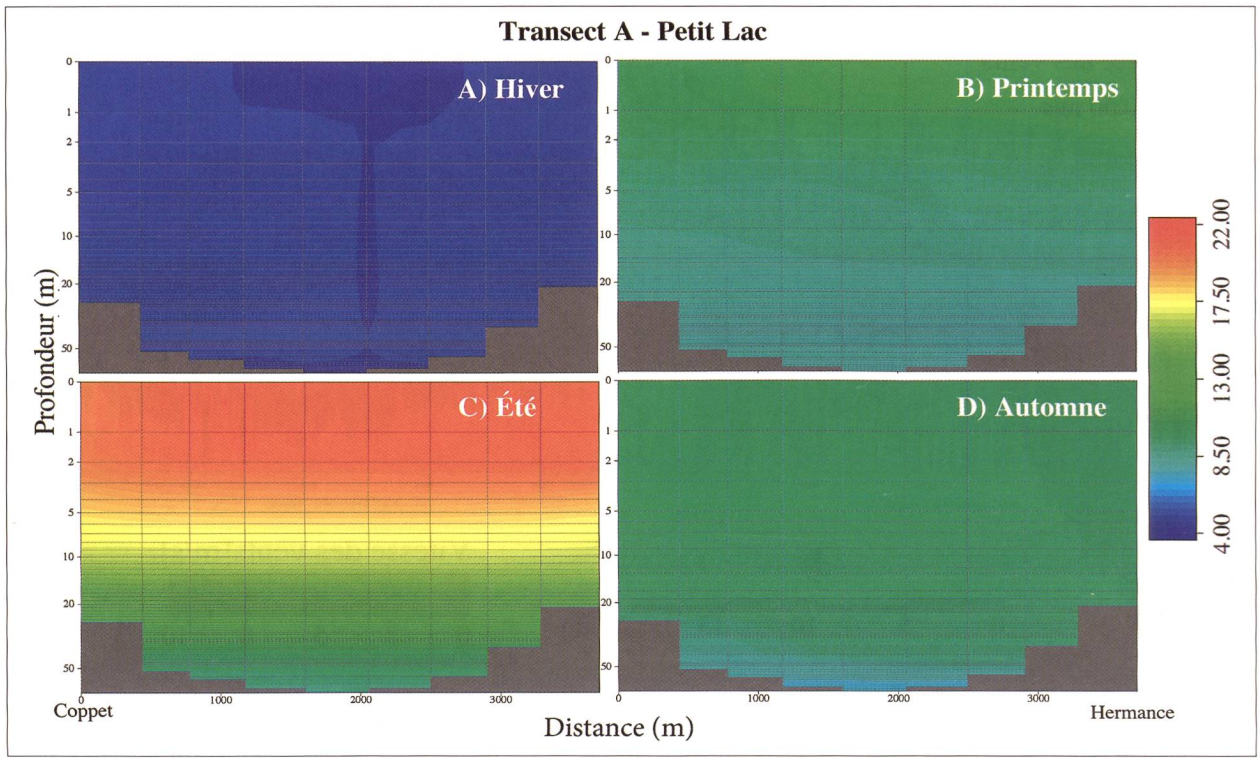

Fig. 6. Distribution verticale de la température de l'eau (°C) dans le transect A (Fig.2), Petit-Lac (Coppet - Hermance): (A) hiver (9 février 2005), (B) printemps (20 avril 2005), (C) été (29 juillet 2005) et (D) automne (26 novembre 2005). L'échelle logarithmique en profondeur est utilisée pour mettre en évidence l'évolution de la thermocline.

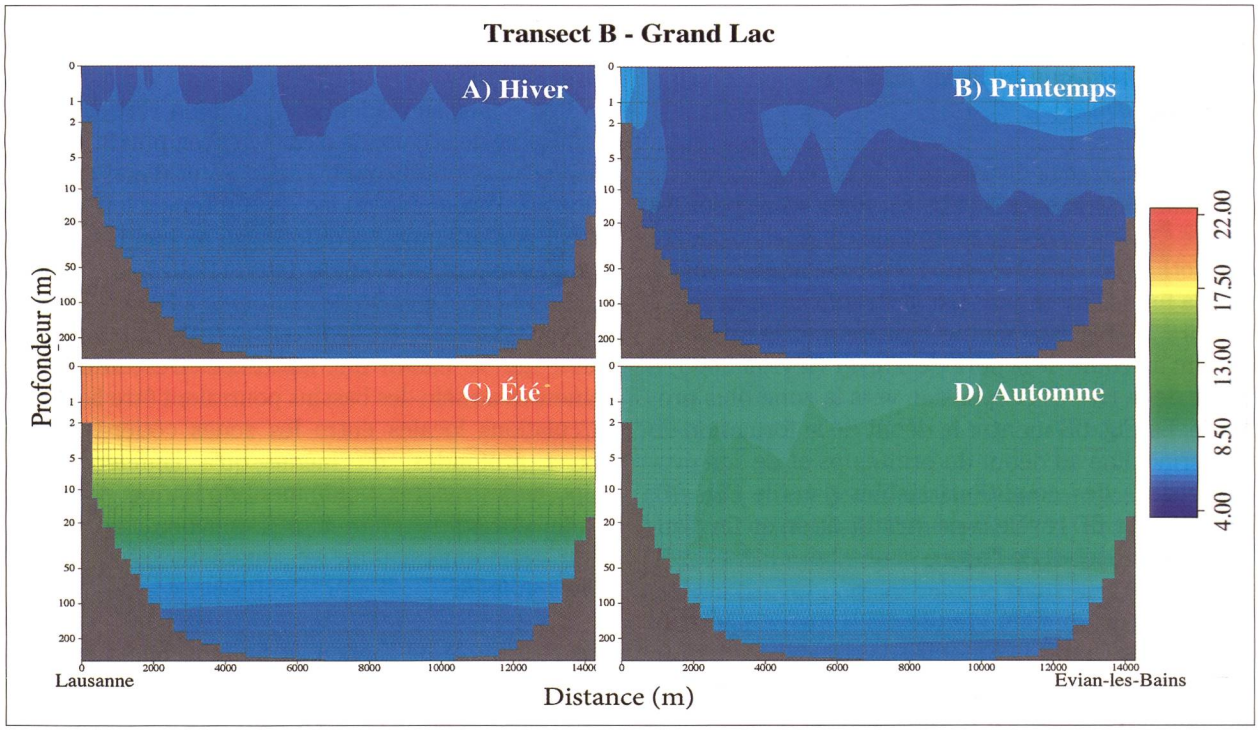

Fig. 7: Répartition des températures (°C) sur la transversale B (Fig.2); mêmes dates que pour la Fig. 6.

nique. Ce tourbillon grandit et couvre finalement une grande partie du bassin du Grand-Lac. Ce phénomène est observé plus fréquemment pendant la saison estivale, à forte stratification thermique, que pendant les autres périodes de l'année (Fig. 9). Cette circulation cyclonique saisonnière est donc générée par la combinaison des champs de vent et de la topographie du bassin (Lemmin et D'Adamo 1996).

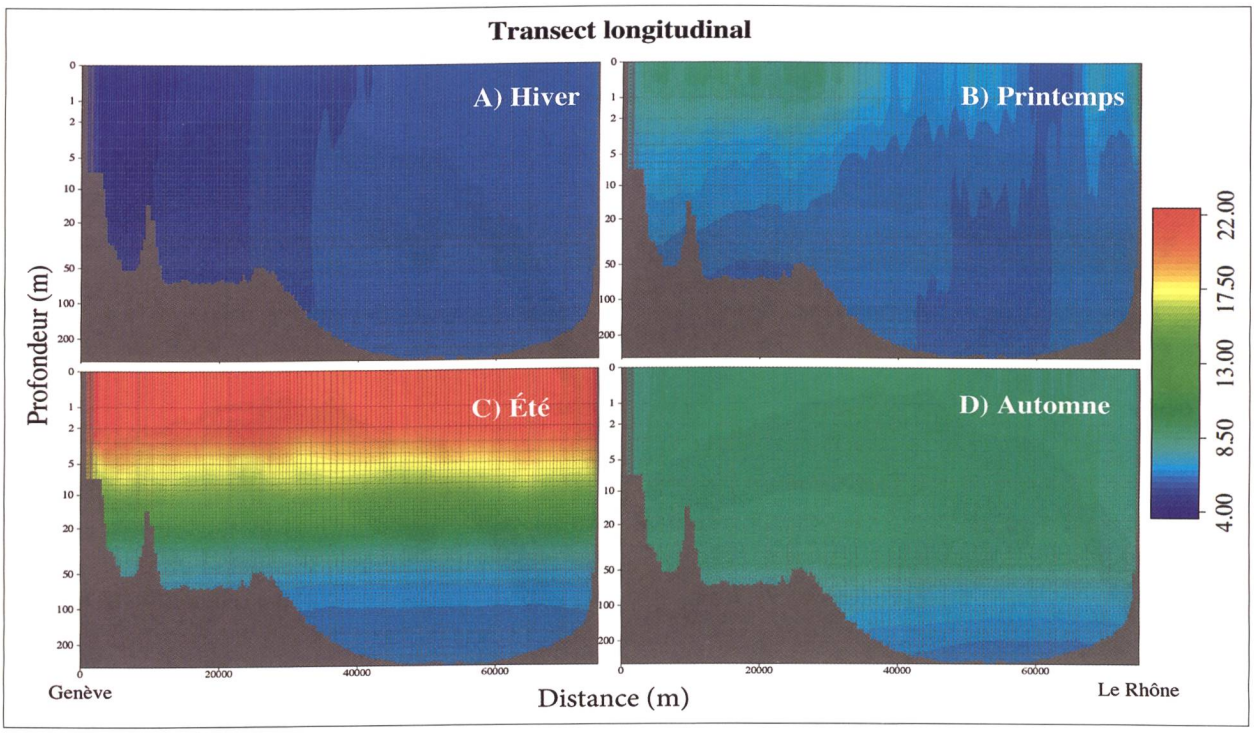

Fig. 8. Répartition des températures (°C) sur une section longitudinale du Léman (Fig.2); mêmes dates que pour la Fig. 6.

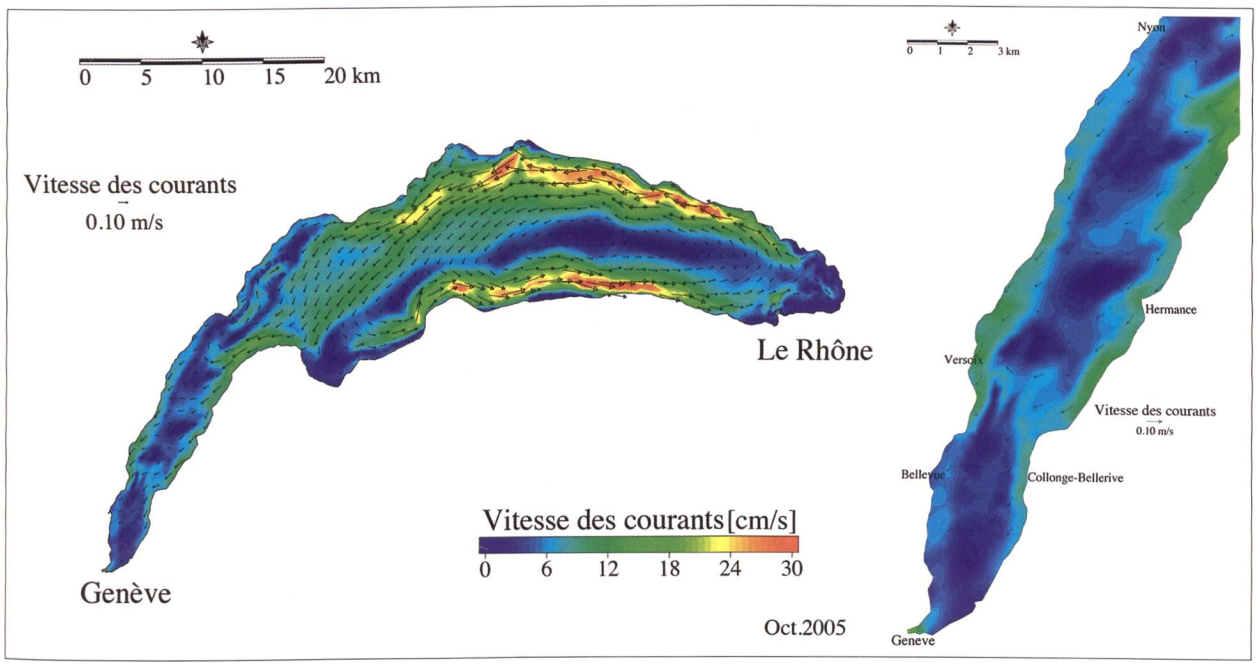

Fig. 9. Courants de surface moyens durant le mois d'octobre 2005, avec une grande gire tournant dans le sens antihoraire dans le Grand-Lac et un schéma de courants complexe dans le Petit-Lac.

Des gires annexes s'observent dans les baies majeures de la rive septentrionale, à Morges et à Vidy (Lausanne). Ces gires sont moins stables que la gire principale du Grand-Lac et leur sens peut basculer en fonction de la direction du vent (Poté et al. 2008) La vitesse des courants modélisés, faible au centre de la gire principale, augmente vers la périphérie et atteint des valeurs moyennes supérieures à 20 cm/s, allant jusqu'à 40 cm/s dans les eaux de surface. En descendant dans la colonne d'eau, la vitesse des courants diminue rapidement tout en gardant la même orientation générale. Notons toutefois que la présente étude ne tient pas compte des ondes internes (ondes de Kelvin et de Poincaré, seiches).

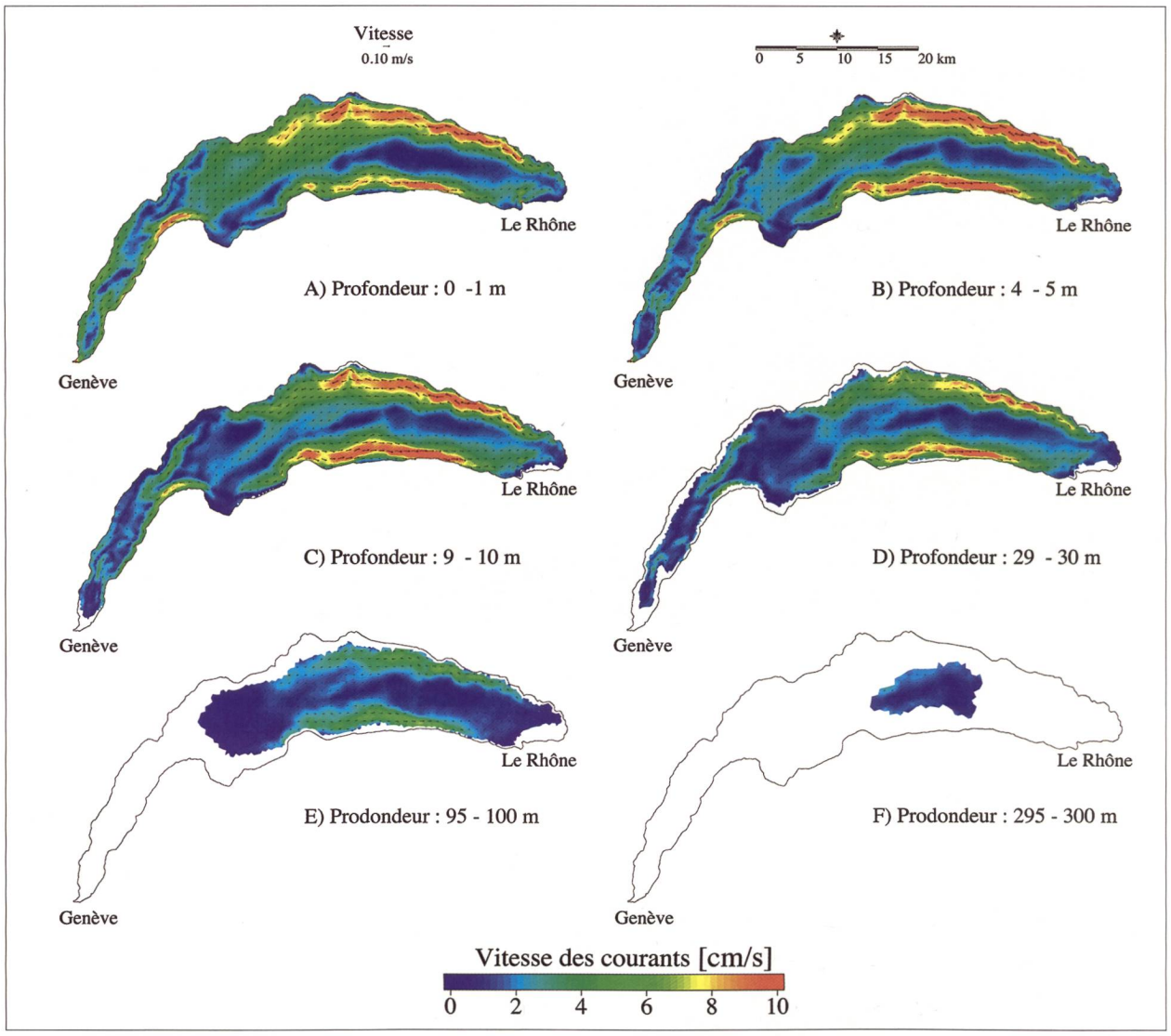

Fig. 10. Orientation et vitesse moyenne des courants lacustres en 2005 (A) surface, (B) profondeur 5m (C) 10m, (D) 30m, (E) 100m (F) 300m.

Au passage du Grand-Lac au Petit-Lac une gire orientée dans le sens horaire peut s'installer. Les vitesses des courants de cette gire sont souvent maximales sur la rive méridionale (courants descendants, Figs. 10 à 12). Les courants de retour vers le Grand-Lac s'organisent soit dans la région de Nyon, à hauteur de Versoix, en fonction de la topographie du bassin.

La terminaison occidentale du Léman, entre Versoix et la Rade de Genève est occupée par une ultime gire, tournant dans le sens antihoraire. Une partie substantielle de l'eau qui participe à cette gire alimente l'exutoire du lac vers le Rhône.

La Fig. 12 présente la circulation des eaux descendantes vers Genève et des courants de retour dans le transect A du Petit-Lac (Fig. 2). La descente se fait essentiellement dans les eaux de surface alors que les courants de retour sont localisés dans les zones profondes, de préférence au centre du bassin. Cette situation traduit, du moins en régime de bise, un refroidissement des eaux à l'extrémité occidentale du Petit-Lac et dans la Rade de Genève.

Dans le Grand-Lac (Fig. 13) l'échange des masses d'eau se fait le long des deux bordures du bassin. En cas d'événement (annexe 1 et 2), la réaction des courants en profondeur est rapide. Les sections des Figs. 12 et 13 (échelle verticale logarithmique!) mettent en évidence une activité de courants bien plus importante dans les 30 premiers mètres de la tranche d'eau que dans les eaux profondes.

Les courants traversant le bassin entre les rives méridionales et septentrionales sont représentés dans la Fig. 14. Cette section montre une certaine complexité au sein de la colonne d'eau. A l'occasion d'événements, les courants forts peuvent entrer en

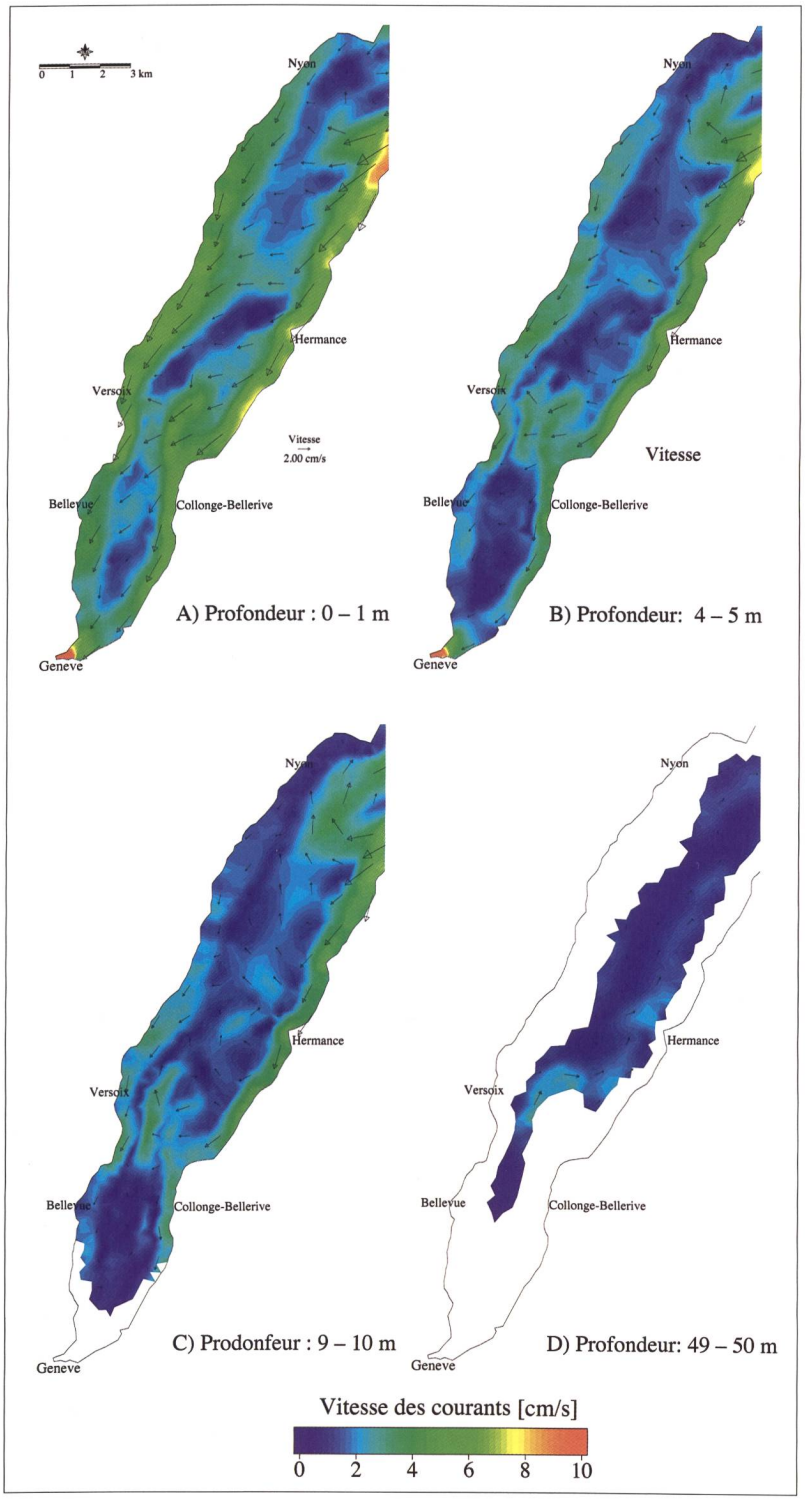

Fig. 11. Orientation et vitesse moyenne des courants lacustres dans la partie de Petit-Lac en 2005 (A) surface, (B) profondeur 4 – 5 m (C) 9 – 10 m, (D) 49 – 50 m.

contact avec les reliefs du fond, notamment au passage du Petit au Grand Lac, dans la région de Versoix au sein du Petit-Lac et au passage du Petit-Lac à la Rade de Genève.

Discussion et conclusions

L'étude de modélisation présentée ici permet d'apprécier l'évolution des masses d'eau du Léman du point de vue thermique et de leur circulation. La méthode choisie s'appuie sur une approche physique déterministe basique permettant, avec un nombre limité de paramètres, de simuler l'état du lac sur une année calendaire complète. Les conditions de départ sont fixées arbitrairement à un état où la température de l'eau est considérée quasi-homogène sur toute la profondeur et où les courants sont considérés comme faibles. Les conditions d'évolution thermique et de dynamique de la colonne d'eau dépendent ensuite avant tout des paramètres météorologiques et de leur influence sur la colonne d'eau. Cette approche présente cependant également des faiblesses, parmi lesquelles on peut mentionner:

- la faible couverture par des stations météorologiques et (surtout) l'absence de station de mesure sur le lac même (imprécision concernant surtout les paramètres de vent, de couverture nuageuse et de radiation),
- l'absence de prise en compte des vagues (effet de brassage de la couche de surface),
- le manque de prise en compte de l'évaporation et de l'effet direct de la température des précipitations à la surface du plan d'eau (température des premiers centimètres de la colonne d'eau),
- le manque de données de calibration et de validation au sein de la colonne d'eau par des mesures systématiques de la courantologie dans les différentes parties du bassin lacustre.

A titre de comparaison des résultats de notre modélisation avec la situation réelle, la figure 15 compare les résultats de modélisation thermique avec les mesures effectuées par la CIPEL sur le point SHL2 au cours de l'année 2005 (Fig. 1). La simulation présentée ci-dessus commence avec un état initial d'une colonne d'eau à température homogène. Par conséquent, les données initiales du modèle et de la température mesurée pour la période de janvier montrent des

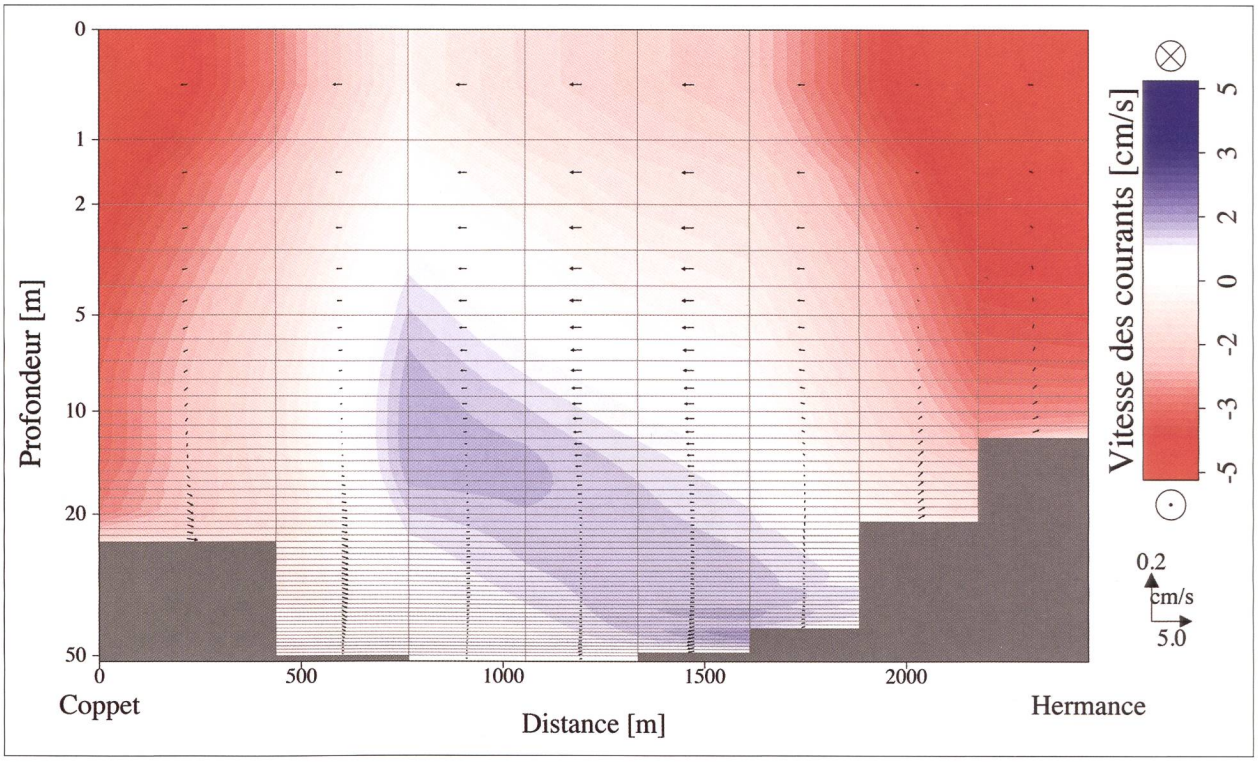

Fig. 12. Courants moyens à travers le transect A (Fig. 2) du Petit-Lac en 2005. Les valeurs négatives (rouge) indiquent des courants descendant en direction de Genève (Ouest), les valeurs positives (bleu) concernent des courants remontants vers le Grand-Lac. Les flèches représentent la vitesse des courants projetés sur le plan du transect.

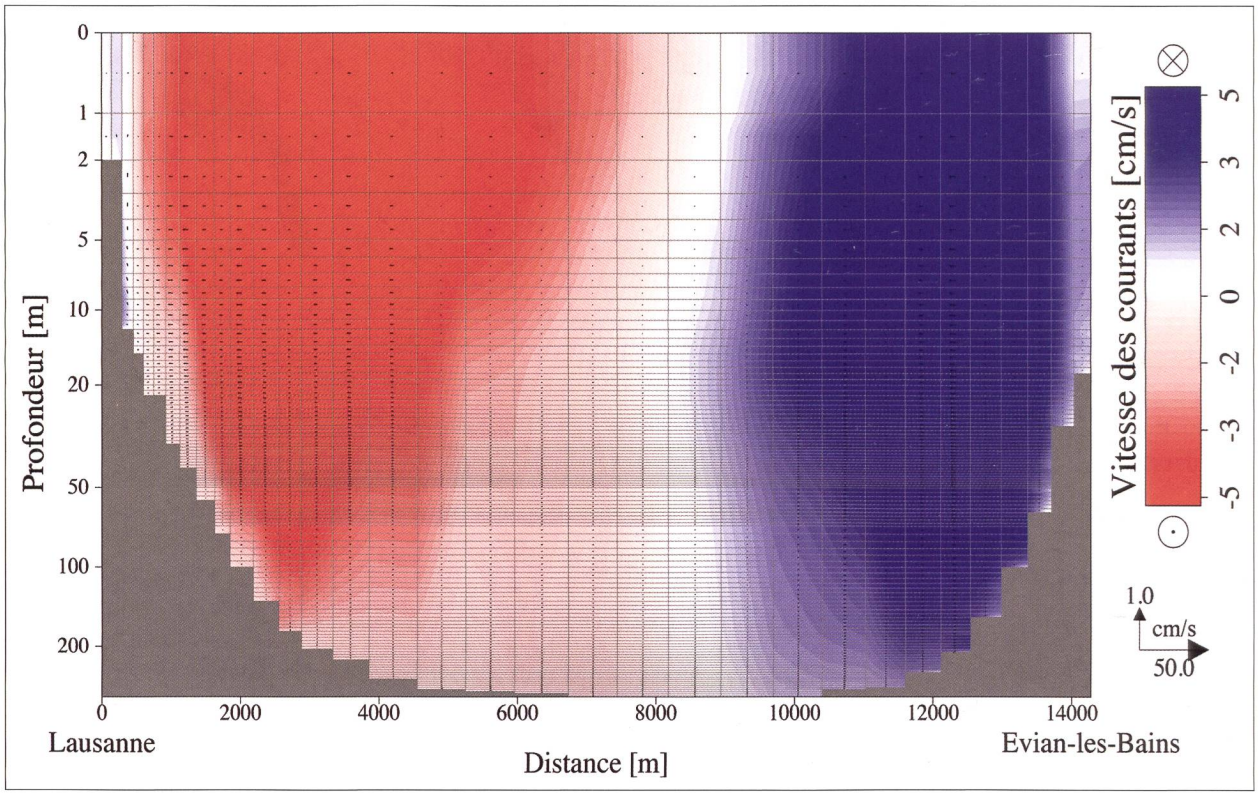

Fig. 13. Courants moyens à travers le transect B (Fig. 2) du Grand-Lac en 2005. Les valeurs négatives (rouge) indiquent des courants descendant en direction du Petit-Lac, les valeurs positives concernent des courants remontants vers l'embouchure du Rhône. Les flèches représentent la vitesse des courants projetés sur le plan du transect.

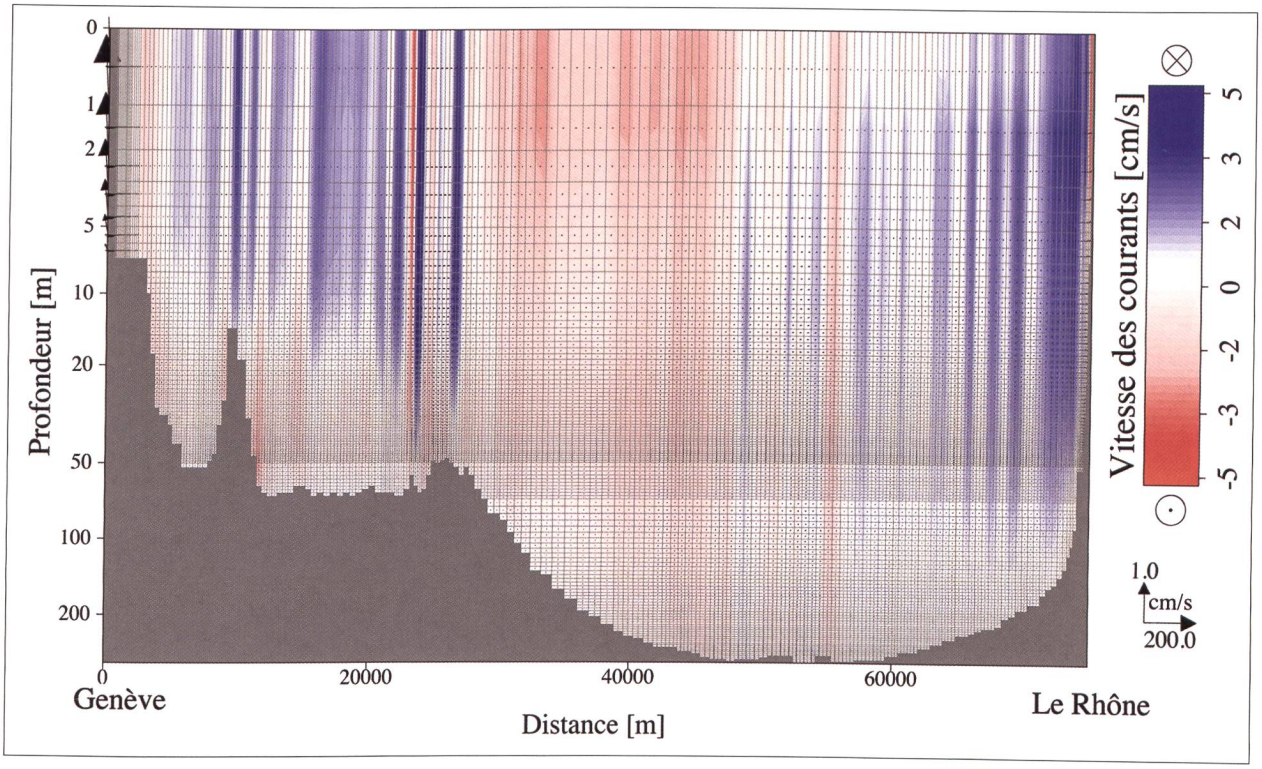

Fig. 14. Courants moyens à travers la section longitudinale du Léman (Fig. 2) en 2005. Les valeurs négatives (rouge) indiquent des courants traversant la section orographiquement de la droite (secteur Nord) vers la gauche (Sud), les valeurs positives concernent des courants traversant la section de la gauche vers la droite.

valeurs quasi identiques. Le réchauffement de la couche de surface démarre à mi-mars et une thermocline est clairement établi à mi-avril; elle va ensuite évoluer et atteindre autour de 30 m de profondeur au cours de l'été, avec des caractéristiques très similaires pour les données observées et les résultats du modèle. Les différences suivantes méritent néanmoins d'être mentionnées:

- Au cours de la période de stratification, les données observées montrent plus de réchauffement à la surface de l'eau que dans les résultats de modélisation. Ceci est probablement dû à des causes telles que la différence de vent réel sur la surface de l'eau par rapport au vent mesuré à la station terrestre.
- La couche d'eau mixte mesurée est plus épaisse que la couche indiquée par la modélisation. Cela signifie que la quantité de chaleur absorbée dans les cinq premiers mètres est plus élevée dans les données mesurées que dans les données calculées. Ceci pourrait notamment être lié aux vents locaux et aux vagues.

La profondeur et l'épaisseur de la thermocline peuvent également varier en fonction d'autres facteurs, tels que la topographie du littoral environnant, les conditions de réchauffement temporelle (cycle de chauffage diurne), l'agitation par le vent local ou encore les seiches (ondes internes). La stratification thermique pendant l'été empêche le mélange dans la colonne d'eau entre les couches d'eau différentes.

Les données de courantologie ne sont pas validées pour l'année 2005 et une telle validation reste à l'ordre du jour. Néanmoins, d'autres données permettent de confirmer les renseignements fournis par la modélisation:

- Ulmann et al. (2003) ont mis en évidence le rapport entre la circulation des eaux de surface qui descendent en direction de Genève sur la rive droite du Petit-Lac et les eaux profondes qui remontent en direction du Grand-Lac.
- Viquerat (2012) présente une étude concernant les conditions de circulation à proximité de Genève, en relation avec un projet d'utilisation géothermique. Cette étude démontre le mécanisme de retour des eaux à la terminaison méridionale de la gire du Petit-Lac et confirme d'autres études par rapport aux phénomènes d'*upwelling* et *downwelling* de masses d'eau lacustres (Li et al. 1975).
- Au niveau du Grand-Lac, Poté et al. (2008) ont démontré les relations entre la circulation de la gire principale du Grand-Lac et la gire annexe dans la Baie de Vidy (Lausanne).

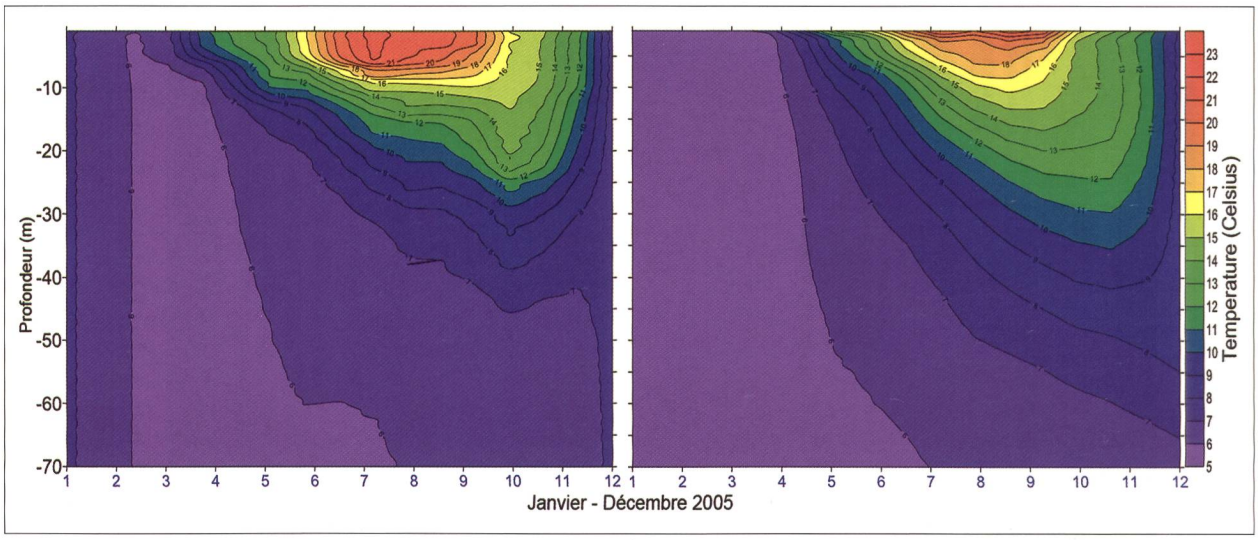

Fig. 15. Contours de température de données mensuelles observées (panneau de gauche) et les données modélisées (panneau de droite) sur le site de surveillance SHL2 (CIPEL 2006).

Les conclusions principales sont les suivantes:

- La modélisation par éléments finis, utilisant un modèle physique basique et un nombre de paramètres limité permet de simuler pour une année calendaire l'évolution thermique et la courantologie du Léman.
- Les résultats mettent en évidence l'évolution thermique des deux bassins du Léman, soit le Petit-Lac et le Grand-Lac. Le premier répond de façon plus rapide aux variations saisonnières que le second. En conséquence, il existe souvent une différence dans la structure thermique entre les deux bassins.
- La simulation courantologique indique la présence permanente d'une grande gire de circulation antihoraire dans le bassin du Grand-Lac. Cette gire est particulièrement active pendant la période estivale, dans un régime de stratification thermique prononcée. Néanmoins les courants liés aux ondes internes sont négligés.
- Une gire de circulation dans le sens horaire se localise au passage entre Grand- et Petit-Lac et un dernier système complexe, d'orientation antihoraire dans le Petit-Lac.
- La séparation entre courants descendants et courants remontants (ou courants de retour) se fait essentiellement entre les rives septentrionale et méridionale dans le Grand-Lac, et entre eaux de surface et eaux profondes dans le Petit-Lac, suite à un *downwelling* des eaux de surface refroidies.
- Actuellement, ce modèle n'est validé que par un seul point de monitoring continu au sein du Grand-Lac et par des études plus limitées et sectorielles. Une validation plus générale est en cours pour l'année 2010.

Remerciements

Les auteurs remercient le Fonds national suisse de la recherche scientifique pour son soutien à cette étude (projet n° PDFMP2-123034/1). Nous remercions le Dr. Jean-Luc Loizeau pour la coordination du projet et Philippe Arpagaus qui a conduit le bateau de recherche La Licorne pendant les campagnes d'observation. Le manuscrit a par ailleurs profité de nombreuses suggestions de la part du Dr. Damien Bouffard.

Bibliographie

- **Amberger G, Berger J-F, Geroudet P, Monod D, Pittard J-J, Revaclier R, Sauter M-R.** 1976. Leman, un lac a decouvrir. Office du livre, Fribourg, 233pp.
- **Bauer SW, Graf WH.** 1979. Wind Induced water circulation in Lake Geneva. Marine Forecasting - Predictability and Modelling in Ocean Hydrogynamics, (Proceedings of The 10th International Liège Colloquium on Ocean Hydrodynamics), 25: 219 – 233.
- **Beletsky D, Schwab DJ.** 2001. Modeling circulation and thermal structure in Lake Michigan: Annual cycle and interannual variability. Journal of Geophysical Research, 106: 19745-19771.
- **Bellafiore D, Umgiesser G.** 2009. Hydrodynamic coastal processes in the North Adriatic investigated with a 3D finite element model. Ocean Dynamics, 60: 255-273.
- **Bohle-Carbonell M.** 1986. Currents in Lake Geneva. Limnology and Oceanography, 31: 1255-1266.
- **Burchard H, Petersen O.** 1999. Models of turbulence in the marine environment – a comparative study of two-equation turbulence models. Journal of Marine Systems, 21: 29-53.
- **CIPEL** 2006. Rapports sur les études et recherches entreprises dans le bassin lémanique. Programme Quinquennal 2001 - 2005 - Campagne 2005.
- **CIPEL** 2009. Rapports sur les études et recherches entreprises dans le bassin lémanique. Programme Quinquennal 2006 - 2010 - Campagne 2008.
- **Dienert F, Guillerd A.** 1948. Mouvement de l'eau dans les lacs. Union Géodésique et géophysique internationale Oslo, 379 - 385.
- **Forel F-A.** 1892, 1895, 1904. Le Léman: Monographie limnologique. Slatkine reprints, Genève, 1969.
- **Goudsmit, G-hein, Burchard H, Peeters F, Wüest A.** 2002. Application of k-ε turbulence models to enclosed basins: The role of internal seiches. Journal of Geophysical Research, 107: 1-13.
- **Graf WH.** 1983. Hydrodynamics of the Lake of Geneva. Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie, 45: 62-100.
- **Hutchinson GE.** 1957. A treatise on limnology, J.W.S. Inc [ed.]. John Wiley & Sons. New-York.
- **Kreitmann L.** 1931. Etude des courants du lac Léman. Les Études rhodaniennes, 7: 109-130.
- **Lemmin U, D'Adamo N.** 1996. Summertime winds and direct cyclonic circulation: observations from Lake Geneva. Annales Geophysicae, 14: 1207-1220.
- **Li C-Y, Kiser KM, Rumer RR.** 1975. Physical model study of circulation patterns in Lake Ontario. Limnology and Oceanography, 20: 323-337.
- **Oesch DC, Jaquet J-M, Hauser A, Wunderle S.** 2005. Lake surface water temperature retrieval using advanced very high resolution radiometer and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data: Validation and feasibility study. Journal of Geophysical Research, 110: 1-17.
- **OFEV.** 2008. Annuaire hydrologique de la Suisse 2007. Office fédéral de l'environnement, Berne.
- **Perroud M, Goyette S, Martynov A, Beniston M, Anneville O.** 2009. Simulation of multiannual thermal profiles in deep Lake Geneva: A comparison of one-dimensional lake models. Limnology and Oceanography, 54: 1574–1594.
- **Podsetchine V, Huttula T, Savijärvi H.** 1999. A three dimensional-circulation model of Lake Tanganyika. Hydrobiologia, 407: 25–35.
- **Pollard RT, Rhines PB, Thompson RORY.** 1972. The deepening of the wind-Mixed layer. Geophysical Astrophysical Fluid Dynamics, 4: 381-404.
- **Poté J, Goldscheider N, Haller L, Zopfi J, Khajehnouri F, Wildi W.** 2008: Origin and spatial-temporal distribution of fecal bacteria in a bay of Lake Geneva, Switzerland. Environ. Monit. Assess. 154: 337–348.
- **Pourriot R, Meybeck M** (eds.). 1995: Limnologie Générale, Masson, Paris, 956 pp.
- **Lemmin U.** 1995. Chapitre 2: Limnologie physique. Collection d'écologie 125. Limnologie générale, Masson, Paris, p. 61-113.
- **Ulmann M, Wildi W, Lemmin U.** 2003. Sediment distribution on a current-dominated lake delta (Versoix delta, Lake Geneva, Switzerland). Eclogae geol. Helv. 96(S1): S91-S97.
- **Umgiesser G.** 1997. Modelling the Venice Lagoon. International Journal of Salt Lake Research, 6: 175-199, doi:10.1007/BF02441892
- **Viquerat PA.** 2012. Utilisation de réseaux d'eau lacustre profonde pour la climatisation et le chauffage des bâtiments: bilan énergétique et impacts environnementaux. Etude de cas: le projet GLN (Genève-Lac-Nations) à Genève, Thèse Univ. Genève, 244 pp.
- **Wildi W, Moscariello A, Pugin A.** 1999. Histoire glaciaire du Léman. *In*: Découvrir le Léman. 100 ans après François-Alphonse Forel (Ed. by Musée du Léman & Slatkine), Slatkine, Genève p. 400-414.