

Zeitschrift: Archives des sciences et compte rendu des séances de la Société
Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
Band: 51 (1998)
Heft: 1

Artikel: Courantologie lémanique
Autor: Lemmin, Ulrich
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-740147>

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: 13.01.2026

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

COURANTOLOGIE LÉMANIQUE

PAR

Ulrich LEMMIN*

ABSTRACT

Currents in the Lake of Geneva. - Water movement in the Lake of Geneva is the result of three different forces: the wind, the solar radiation and the Coriolis force. We describe some of the patterns of water movement that result for the different combinations of these forces on different time scales and length scales. Water movements may be oscillatory or translatory. The picture which emerges is one in which the near shore zone are more active than the center of the lake. During stratification, important water movements are limited to the upper 90 m of the water column.

Key-words: Lacustrine currents, seiches, internal seiches, transportation, mixing.

INTRODUCTION

La limnologie physique traite des processus physiques dans un lac. Ceux-ci incluent les mouvements de l'eau sur différentes échelles et la stratification thermique, et aussi des effets que les uns peuvent produire sur les autres. La compréhension des processus physiques dans un lac a une importance qui va bien au-delà de l'intérêt direct de déterminer et de quantifier la structure fondamentale cause-effet. Les quelques exemples suivants montrent clairement que plusieurs des cycles biogéochimiques dans un lac sont directement affectés ou contrôlés par les processus physiques :

- Des nutriments en provenance du dépôt de sédiment sont apportés vers le haut jusque dans la zone phototrophique près de la surface.
- L'oxygène entre dans le lac à travers la couche superficielle puis il est mélangé dans les couches profondes.
- Des polluants sont écartés de leur point d'origine pour entrer dans des eaux non polluées.
- Des membres de la chaîne alimentaire sont déplacés selon que les conditions d'ensemble sont favorables ou non.
- Des particules sont décantées, puis resuspendues.

Il y a plus de cent ans que certains aspects de la limnologie physique ont été étudiés par Forel, qui avait déjà constaté un lien étroit entre les processus physiques et les autres cycles précités. Pendant les quatre-vingts années suivantes, il n'a pas été effectué beaucoup de recherche systématique sur les processus physiques dans le

* Laboratoire de recherches hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne, CH-1015 Lausanne.

Léman. Dans les années 1970, une nouvelle activité de recherche a été créée à l'EPFL à Lausanne. Un modeste programme de recherche a été maintenu depuis pour étudier les différents aspects des courants et de la dynamique de stratification. Dans l'exposé qui suit, nous présentons certains résultats donnant un aperçu sur le mouvement de l'eau dans le Léman.

LIMNOLOGIE PHYSIQUE

Avant d'entamer une discussion sur les facettes du mouvement de l'eau dans le Léman, nous allons décrire brièvement certaines stratégies appliquées en limnologie physique.

Concepts

Le mouvement des masses d'eau dans les lacs est généré par des forces externes. Parmi ces forces, le vent et l'échange de chaleur avec l'atmosphère sont les plus importantes. Le vent et l'échange de chaleur varient tous deux d'intensité dans une large gamme d'échelles de temps et de longueur. Par conséquent, les mouvements d'eau dans le lac générés par ces forces varieront également à des échelles de longueur allant de quelques centimètres au lac entier et à des échelles de temps allant de la minute à la saison. Cependant, les contraintes du système du lac font que les échelles auxquelles les mouvements dans le lac sont excités ne sont pas nécessairement les mêmes que celles du forcing.

Selon des principes de la physique, il est connu que la réponse d'une masse d'eau à un forcing extérieur peut être soit un mouvement continu, soit un mouvement oscillatoire. Dans un lac, un mouvement continu causera un transport à grande échelle et un mélange turbulent à petite échelle. Un mouvement oscillatoire produira des vagues dans une vaste gamme d'échelles sur les interfaces de densité à la surface et à l'intérieur du lac.

En outre, dans un lac de la dimension du Léman, la rotation de la Terre influencera le mouvement de l'eau sur de grands échelles. Cela génère une force additionnelle, la force de Coriolis, qui dans le Léman détournera vers la droite les mouvements d'eau causés par un forcing extérieur.

Il est donc évident que dans le Léman on peut s'attendre à trouver un large spectre de mouvements d'eau sur différentes échelles. Un certain nombre de ces différents mouvements ont lieu normalement en même temps, générant un modèle complexe de mouvements d'eau.

Dans ce qui suit, nous allons identifier quelques-uns de ces mouvements et examiner leur importance pour la qualité de l'eau du lac. Nous étudierons tout d'abord les mouvements des vagues, puis les mouvements continus.

Méthodes

Pour comprendre et quantifier les processus physiques dans les lacs, on doit connaître le mouvement de l'eau et sa stratification thermique. Pour l'étude du mouvement de l'eau, il est nécessaire de mesurer les courants d'eau. La stratification, elle, est

caractérisée par le profil vertical de la température. Deux méthodes différentes de mesure – le profilage et le mouillage – peuvent être utilisées pour obtenir ces informations.

a. Le profilage

Les renseignements donnés par le profilage se limitent à la structure de la stratification dans la colonne d'eau. Dans ce cas, une sonde est mise à l'eau depuis une embarcation sur un câble spécial au moyen duquel les données mesurées sont transmises au bateau. La sonde mesure simultanément la profondeur et la température et donne généralement des valeurs tous les 5 cm de profondeur environ. Cela conduit à un profil à résolution spatiale élevée, où la température est résolue à 0.001 °C. La position de l'embarcation est déterminée par GPS. La stratégie est de prendre des profils à différents emplacements et époques afin d'obtenir des informations sur la dynamique spatiale et temporelle de la stratification et les processus conduisant à sa modification.

b. Mouillage des instruments

Dans ce cas, on étudie le développement temporel d'un paramètre à un emplacement fixe sur de longues périodes, typiquement une saison ou deux. Les deux paramètres mesurés et enregistrés qui nous intéressent sont la température de l'eau et le vecteur du courant. Il existe des instruments capables de mesurer soit l'un, soit les deux à la fois. La température peut être mesurée en un seul point ou en un certain nombre de points différents dans la verticale au moyen d'une "chaîne thermométrique" dans laquelle sont placées plusieurs résistances thermiques dans un tube flexible, à des distances prédéterminées (entre 1 et 10 mètres chacune). Le vecteur de courant d'eau donne une indication sur le mouvement de l'eau. Il est déterminé par la vitesse et la direction du courant. Ces instruments sont autonomes. Ils sont actionnés par une batterie et préprogrammés pour enregistrer automatiquement les données à intervalles prédéterminés. Ils nous permettent de mesurer par exemple une valeur de données toutes les 10 min pendant une période de six mois. Ces instruments sont placés dans le lac sur un câble suspendu entre un poids au fond et un flotteur près de la surface. La profondeur à laquelle l'instrument est effectivement installé sur ce câble dépend du phénomène qu'on se propose d'étudier (BOHLE & PERRINJAQUET, 1984).

MOUVEMENTS DES VAGUES

Les vagues de surface

Quand le vent agit sur la surface du lac, il entraîne les particules d'eau près de la surface par frottement. Cette même force de frottement agit aussi par la suite à l'intérieur de l'eau, mettant en mouvement les particules d'eau dans les couches inférieures. L'effet le plus manifeste du vent sur un lac est la génération de vagues de surface. Les

vagues de surface sont des vagues dites progressives, ce qui signifie qu'elles voyagent le long de la surface du lac dans la direction du vent. Les vagues de surface sur le Léman ont été étudiées par BRUSCHIN & FALVEY (1975), BRUSCHIN & SCHNEITER (1978) et MERZI *et al.* (1985). Ces derniers ont trouvé que les caractéristiques des vagues de surface sur le Léman sont semblables à celles observées sur l'océan et sur d'autres grands lacs. Dans le Léman, les vagues bien développées ont des périodes de 2 à 3 s et des longueurs de 15 à 20 m. Cela signifie qu'elles peuvent générer un mouvement de l'eau en dessous de la surface jusqu'à une profondeur d'environ 10 m, produisant une resuspension de sédiment et une formation des rides de fond lorsqu'on approche des faibles profondeurs près de la rive. La hauteur caractéristique des vagues est de 1 m environ, mais croît pendant les événements de vent violent et le long du fetch du vent. Cela est apparent lorsqu'on observe le changement de la hauteur des vagues de Morges à Genève pendant un régime de bise.

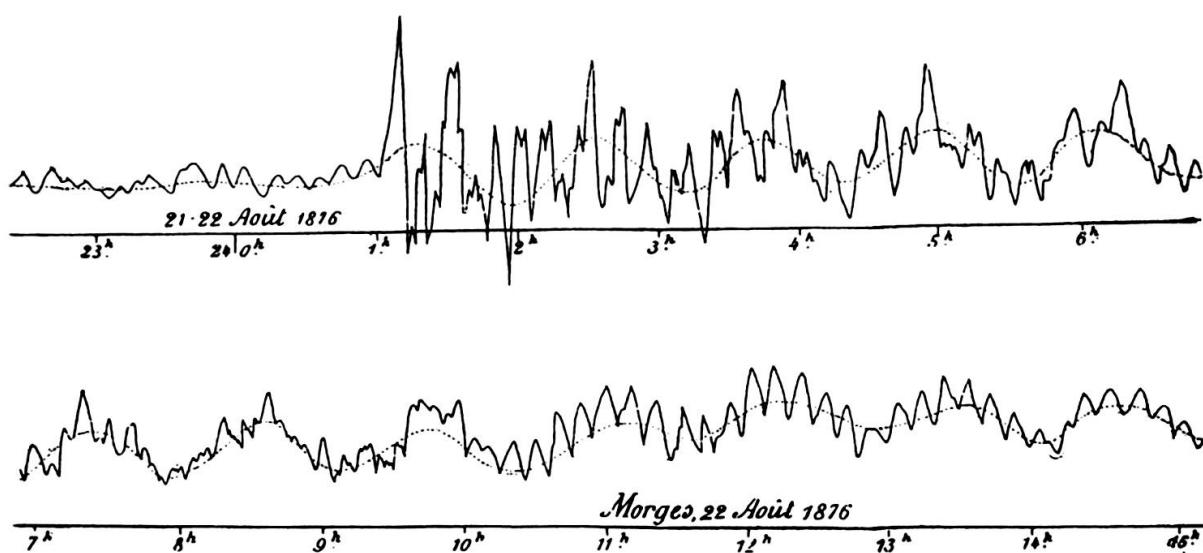
Pendant les événements de vent fort, on observe souvent une déferlement des vagues. Ce processus est important pour les échanges de gaz entre le lac et l'atmosphère. Le déferlement des vagues augmente de beaucoup le taux d'échange comparé à une situation calme.

Les seiches de surface

Contrairement aux vagues de surface progressives étudiées ci-dessus, les seiches de surface sont des vagues stationnaires. L'eau que le vent entraîne par friction circule avec le vent et finit par frapper la rive. Cette eau s'y amoncellera, provoquant une surélévation de la surface du lac. Lorsque le vent cessera, la surface surélevée du lac retournera à son niveau initial, produisant un mouvement de l'eau dans la direction opposée. L'énergie emmagasinée dans ce mouvement produira ensuite une surélévation à l'extrémité opposée, qui s'inversera à son tour. Cette oscillation continuera jusqu'à ce qu'elle soit détruite par le frottement. C'est le modèle type d'une seiche de surface.

Les seiches de surface ont déjà été observées par FOREL (1895) au moyen de limnigraphes. Lesdites seiches, qui sont déclenchées le long du grand axe du Léman entre Genève et Villeneuve, ont des périodes de 73 min et des hauteurs pouvant atteindre 30 cm à Genève, mais le plus souvent elles sont inférieures. D'autres seiches ont été observées sur le lac entre Morges et Evian. Ces seiches en travers du bassin ont des longueurs beaucoup plus courtes avec des périodes également plus courtes (Fig. 1). Une étude très détaillée a été effectuée en 1950 au moyen de douze stations de limnigraphes autour du lac. Quoique l'objet principal de cette étude n'ait pas été d'étudier les seiches de surface, l'analyse des mesures a confirmé les résultats obtenus par Forel et montré plusieurs nouveaux modes de seiches. Les résultats des simulations numériques de BAUER (1979) et BECKERS (1989) montrent également la complexité de la structure des modes de seiches de surface dans le Léman.

A cause de leur faible amplitude, toutes les seiches de surface produisent un mouvement d'eau avec une très faible vitesse de courant. On leur a porté beaucoup d'attention au tournant du siècle dernier (F.-A. Forel a consacré 174 pages à ce sujet).



(Fig. 55.) Seiches de Morges, 21-22 août 1876. Dénivellations 1/3 grandeur naturelle. Vitesse 3 cm. par heure.

FIG. 1.

Enregistrements de seiches de surface à Morges. Deux mouvements de seiches sont superposés: les seiches le long du grand axe du lac avec une période d'environ 73 min. et des seiches transversales avec une période de 10 minutes. (fig. 55 dans F.A. FOREL *tome II*, 1895)

Bien que fascinantes et faciles à observer, elles n'ont en réalité que peu d'importance pour le mouvement de l'eau à l'intérieur du Léman et ne sont par conséquent plus étudiées aujourd'hui.

Les seiches internes

Les seiches internes sont des vagues stationnaires du même type que les seiches de surface, mais elles se produisent à la profondeur de la thermocline à l'intérieur du lac. La thermocline est un phénomène lié à la stratification thermique estivale pendant laquelle l'eau près de la surface est chauffée par le soleil alors que l'eau à une plus grande profondeur n'est pas influencée par le soleil et ne change pas de température. La thermocline est la couche dans laquelle on peut observer le plus fort gradient de stratification entre l'eau chaude de surface et l'eau froide du fond. Dans le Léman, la thermocline se trouve typiquement autour de 20 m de profondeur en été. Des seiches internes ne peuvent par conséquent s'y trouver que pendant la période de stratification. Pour les observer, on doit prendre des mesures dans la couche située autour de la thermocline, c'est-à-dire à environ à 20 m de profondeur.

Comme nous l'avons exposé plus haut, le vent qui souffle sur le lac produit une surélévation de la surface à l'extrême du lac soumise au vent. Dans un lac stratifié, cette surélévation de la surface pousse la thermocline vers le bas, à une plus grande profondeur, à l'extrême du lac. Lorsque le vent cessera, cette dénivellation de la ther-

mocline retournera à son niveau initial et produira une oscillation de la thermocline sur tout le bassin lacustre comme pour les seiches de surface. Dans le Léman, les seiches internes ont cependant de plus longues périodes – autour de 80 heures – du fait que la différence de la densité entre l'eau au-dessus et au-dessous de la thermocline est beaucoup plus petite que celle entre l'air et l'eau à la surface. Comme cette période est beaucoup plus longue que la période d'inertie pour la latitude du Léman, le mouvement interne provoqué par la seiche interne est influencé par la force de Coriolis. Il en résultera une transformation du mouvement des seiches longitudinales le long de l'axe du lac (comme on l'a déjà observé pour les seiches de surface) en une vague connue sous le nom d'onde de Kelvin (LEMMIN, 1995). Les amplitudes maximales et minimales ne se situent plus aux extrémités du bassin, mais se déplacent dans le sens opposé à celui des aiguilles d'une montre autour du bassin durant une période d'oscillation. Alors que la théorie des ondes de Kelvin est connue depuis longtemps, c'est en 1950, dans le Léman, que C.H. MORTIMER (1974) a démontré leur existence pour la première fois dans les milieux aquatiques naturels.

Par la suite, les enregistrements par des instruments mouillés en divers endroits le long de la rive nord du lac nous ont révélé à de nombreuses reprises l'existence des seiches internes sous forme d'ondes de Kelvin. Un exemple typique est montré sur la Fig. 2. On peut voir que le passage d'une onde de Kelvin est caractérisé par un fort déplacement vertical de la stratification. Cependant, pour les seiches internes il n'a pas été relevé de longs enregistrements d'oscillations continues contrairement à ce qu'on a vu pour les seiches de surface. Cela est dû à la longue période d'onde de plus de 3 jours. En effet, avant qu'une onde ait pu terminer un deuxième cycle autour du lac (6 jours environ), une nouvelle perturbation atmosphérique s'est souvent déjà produite au-dessus du lac, détruisant le mouvement d'eau existant et en créant un nouveau. Néanmoins, une analyse statistique sous forme d'analyse spectrale prouve que les ondes de Kelvin passent suffisamment souvent autour du lac pour apporter une contribution significative ou même dominante au mouvement de l'eau dans certaines zones du lac (Fig. 3). Elles peuvent donc être considérées comme une caractéristique importante du mouvement de l'eau dans le Léman.

C'est dans une zone située près de la rive que l'amplitude des seiches internes est la plus élevée, pouvant atteindre 10 m. Elles produisent de grandes vitesses à des profondeurs se situant autour de 30 m. Ces dernières peuvent atteindre 35 cms^{-1} , bien que plus typiquement 20 cms^{-1} . La direction du déplacement de l'eau au-dessus et au-dessous de la thermocline est opposée, produisant en conséquence du cisaillement et du mélange. Les seiches internes sont donc également importantes dans la dynamique du cycle biochimique car, dans les zones près de la rive, elles peuvent temporairement causer une resuspension de sédiment et contribuer ainsi à la redistribution des nutriments de la colonne d'eau. D'autres processus vont porter ces nutriments depuis la zone près de la rive en direction du large. Parmi ces processus figurent les courtes vagues progressives internes dont nous avons établi l'existence dans le Léman pour la première fois (LEMMIN *et al.*, 1998) et que nous sommes en train d'étudier dans le détail.

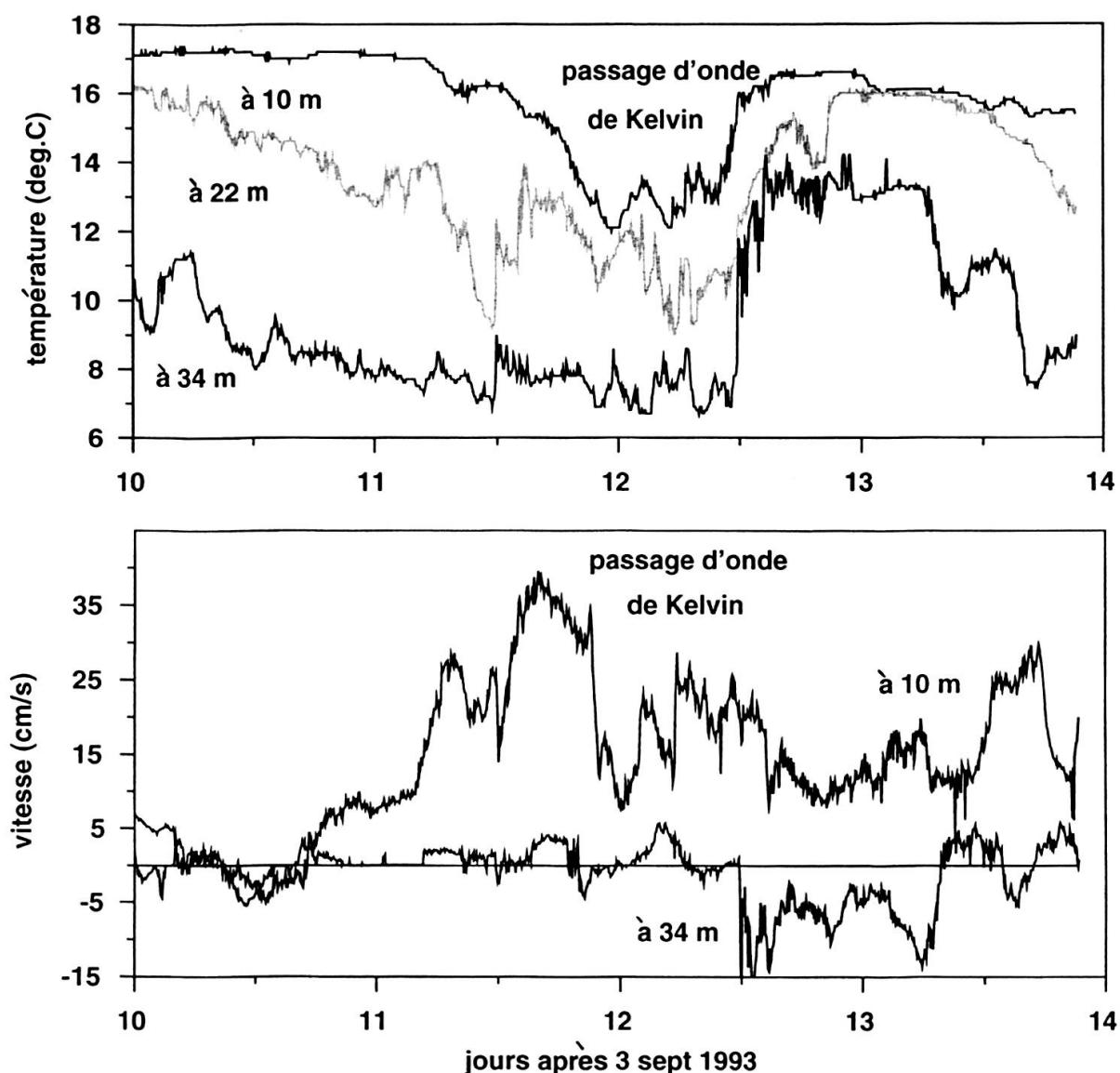


FIG. 2

Le passage d'un onde de Kelvin (seiches internes) enregistrée avec les instruments mouillés devant St.Sulpice en août 1993. En haut: Les températures au-dessus de la thermocline (10 m) et dans la thermocline (22 m) diminuent tandis que celles à 34 m au-dessous de la thermocline augmentent brusquement pendant le passage indiquant que la thermocline descend. En bas: Pendant le passage de l'onde de Kelvin, la vitesse du courant le long de la côte au-dessus de la thermocline (10 m) est ralenti. Dans la thermocline (22m), elle change de direction. D'après THORPE *et al.* (1996).

Il faut cependant rappeler que le front d'une seiche interne passe toutes les 80 h à un même endroit le long de la rive. La dynamique décrite ci-dessus qui se produit pendant son passage est un événement d'une durée de 5 à 6 h environ. Par la suite, l'eau se calme de nouveau et les vitesses du courant redescendent à 5 à 10 cms^{-1} .

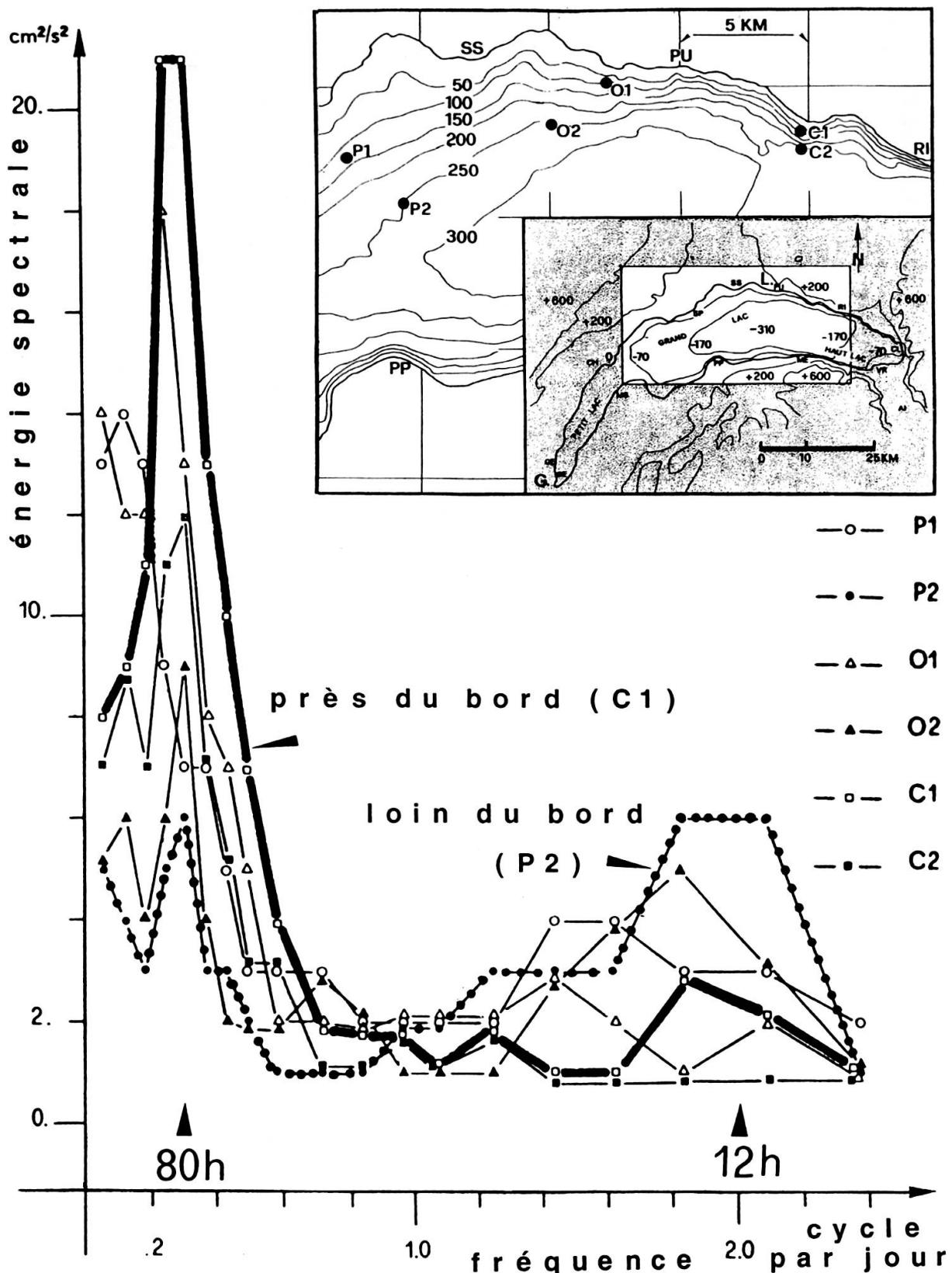


FIG. 3. Analyse spectrale des séries chronologiques de vitesse le long de la côte enregistrée à différents emplacements sur le rivage nord. On note que près du bord, les ondes de Kelvin dominent le spectre tandis que les ondes de Poincaré (avec une période de 12 h) apportent la contribution la plus forte au large. D'après BOHLE-CARBONELL (1986).

TRANSPORT À GRANDE ÉCHELLE

Dans ce qui précède, on a vu que le vent entraîne l'eau du lac dans la direction de sa propagation en générant les vagues que nous venons de décrire. Mais en même temps le vent génère également un mouvement d'eau à grande échelle. Dans le Léman, la rotation de la Terre va à nouveau dévier la direction de ce mouvement d'eau vers la droite. Dans ce qui suit, nous allons étudier deux exemples de mouvements d'eau à grande échelle dans le Léman qui ont certaines conséquences sur les cycles biochimiques dans le lac.

Modèle de transport pendant la stratification estivale

En été, les événements de vent fort de longue durée sont rares. On observe toutefois des orages occasionnels de caractère plutôt local et un champ de vent diurne. Cela est dû à la différence de température entre le lac et le site qui l'entoure. Pendant la journée, le vent souffle du lac vers la terre, qui est plus chaude. La nuit, la direction de ce champ de vent s'inverse (par rapport à celle de la journée). En outre, les inégalités de la topographie autour du lac causent une grande variabilité de la force du champ du vent diurne autour du lac. Les observations montrent que ces vents deviennent plus forts pendant la nuit dans la région de Morges (où souffle le Morget) et plus faibles sur le haut lac. La répétition du champ du vent diurne combinée avec le gradient entre le haut lac et le centre du grand lac génère un mouvement d'eau dans la partie orientale du Léman, qui est influencée par la force de Coriolis. Selon nos observations (LEMMIN & D'ADAMO, 1996), les courants d'eau qui en résultent restent stables pendant toute la période de stratification estivale (Fig. 4). D'après la loi de la continuité, on estime que les autres parties du bassin lacustre sont soumises à un modèle de courant comme l'indiquent les parties pointillées.

Echange entre le grand lac et le petit lac

Contrairement aux bassins lacustres du grand lac et du haut lac, le bassin du petit lac est orienté dans la direction de deux vents dominants, la bise et le vent. Ce sont les vents les plus violents observés sur le lac et également les vents de plus longue durée. On peut par conséquent s'attendre à ce qu'ils produisent un mouvement d'eau important dans le petit lac. Il semble qu'aucune mesure de courant n'ait été faite jusqu'à présent dans le petit lac. Notre campagne de mesures de courant à l'entrée du petit lac peut cependant fournir quelques indications.

Pour ces mesures, des courantomètres d'enregistrement automatique ont été placés sur des mouillages près de la surface et près du fond du lac entre Promenthoux et Nernier pendant une période de quatre mois en automne et en hiver 1987/8. Pendant cette période, le lac n'est pas stratifié jusqu'à la profondeur du petit lac. Comme le bassin du petit lac est fermé à l'autre extrémité à Genève, chaque forcing du vent sur la surface produira par conséquent un courant dans le sens opposé près du fond du lac. Chaque renversement de la direction du vent (de la bise au vent ou l'inverse) provoque un renversement du système de courant.

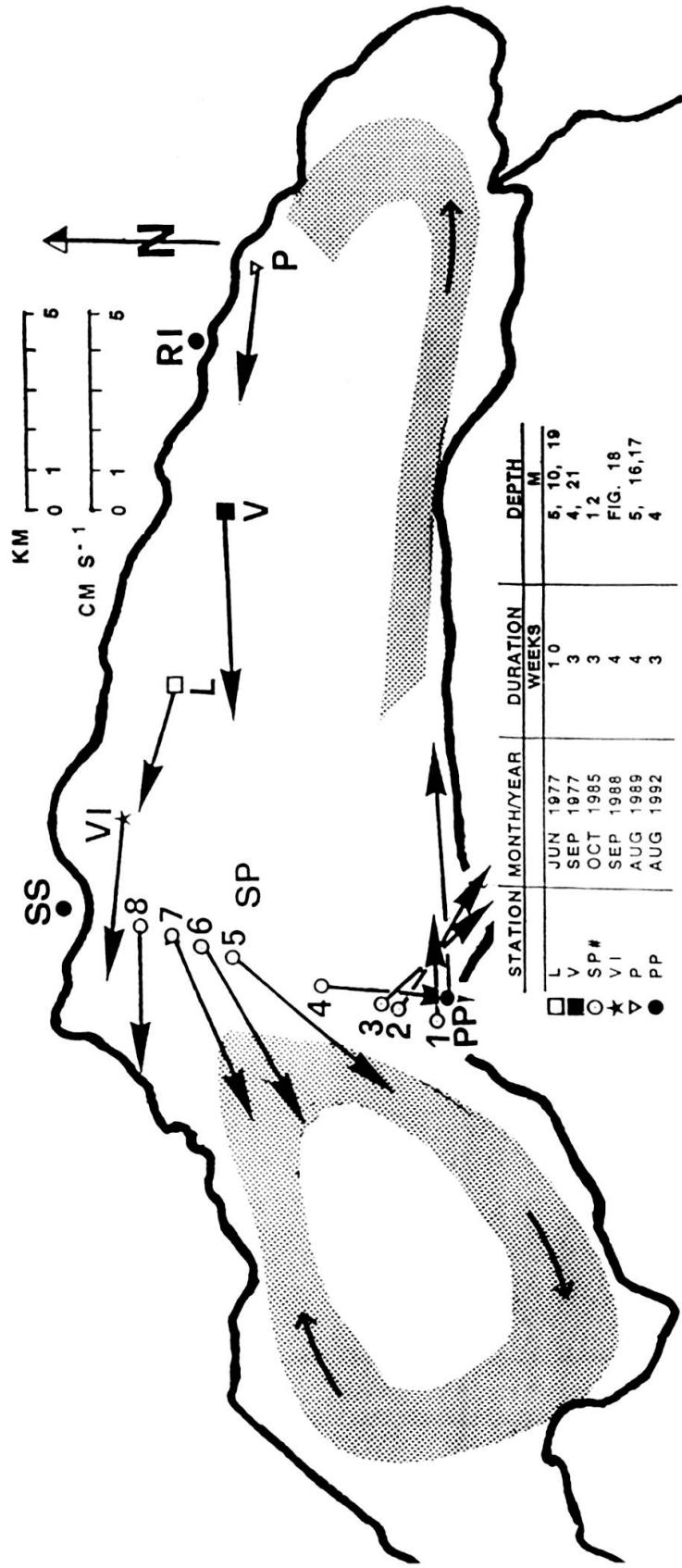


FIG. 4.

Configuration de la circulation dans le grand lac pendant la stratification d'été. Les flèches indiquent les résultats des mesures actuelles des instruments mouillés. Les zones pointillées montrent une configuration de circulation qui est déduite de ces mesures. D'après LEMMIN & D'ADAMO (1996).

Les résultats de nos mesures (Fig. 5) montrent que les courants sont structurés en une séquence d'événements qui suivent de près la structure du vent. Près de la surface, la direction des courants est la même que celle du vent. Près du fond, la direction va dans un sens opposé. Les vecteurs de courant fort sont orientés dans l'axe du bassin

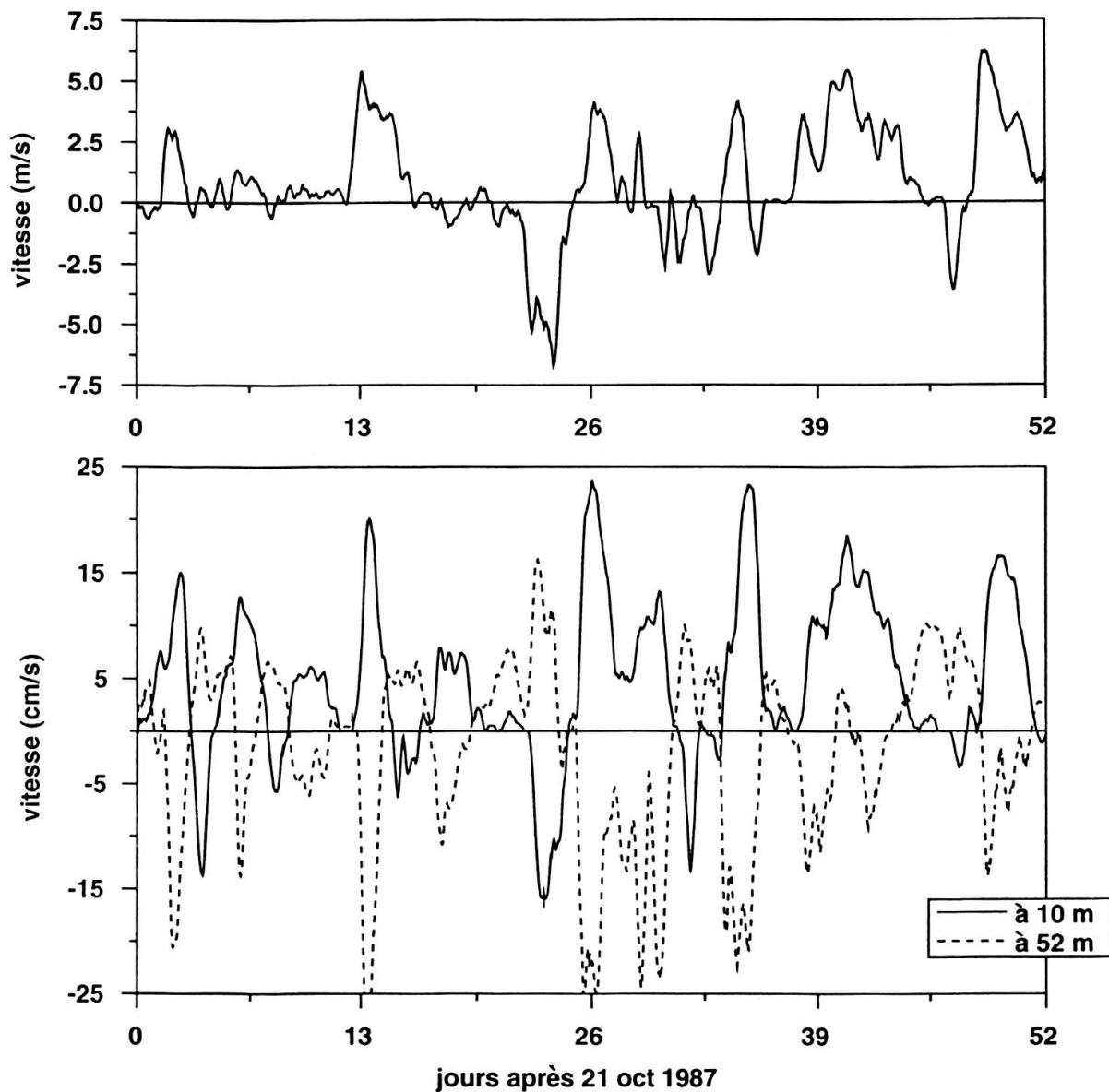


Fig. 5.

Vents à Coitrin (en haut) et courants (en bas) dans la section Promenthoux-Nernier à la profondeur de 10 m et à la profondeur de 52 m (près du fond). Les composantes dans l'axe du lac dans la section (45°) sont tracées. Notez que les courants près de la surface suivent le vent tandis que ceux proches du fond se déplacent dans la direction opposée. Orientation positive vers le Grand Lac.

lacustre. Le cycle complet se renverse chaque fois avec la direction du vent. On a également observé que, à cause de l'inertie du système, les courants continueront encore un certain temps dans la direction où ils sont générés par le vent après arrêt de ce dernier et avant qu'un nouveau forcing (de vent) ne soit activé.

Les courants près du fond atteignent facilement la vitesse de 30 cms^{-1} . Nous n'avons pas observé de vitesses de cette grandeur si près du fond ailleurs dans le lac. Suivant la loi de la continuité, on peut s'attendre à des vitesses semblables près du fond ailleurs dans le petit lac. Ces vitesses peuvent resuspendre du sédiment fin et par conséquent changer le taux de diffusion de certaines espèces chimiques à partir du sédiment jusque dans la colonne d'eau. En outre, comme la masse d'eau échangée entre le grand lac et le petit lac au cours de chaque événement de vent est importante et que la qualité de l'eau est en général meilleure dans le petit lac, on peut s'attendre à ce que cet échange contribue à une amélioration de la qualité de l'eau dans le grand lac.

MÉLANGE À PETITE ÉCHELLE

Le mélange à petite échelle est provoqué par des mouvements irréguliers de particules d'eau. La turbulence est générée par un cisaillement dû à la variation temporelle et spatiale de la vitesse dans les mouvements d'eau à grande échelle. Comme nous avons vu que plusieurs types de mouvements à grande échelle peuvent être actifs à un moment donné dans le Léman, on peut donc s'attendre à ce qu'une turbulence soit présente n'importe où dans le lac. Cela est confirmé par les observations et l'on peut dire que le lac est turbulent à toute époque. L'intensité de cette turbulence – et par conséquent du mélange – n'est cependant pas constante dans le temps et dans l'espace. Il est donc intéressant de déterminer la relation entre le forcing et l'intensité du mélange. Afin d'exprimer l'intensité du mélange, on utilise le concept du coefficient de mélange. Ce concept est utilisé en océanographie aussi bien qu'en ingénierie. Nous allons étudier deux modèles de mélange, le premier concernant le mélange en direction horizontale et le second en direction verticale.

Mélange horizontal

Il existe différentes méthodes pour déterminer le coefficient de mélange. Pour le Léman, nous avons utilisé une méthode basée sur des données de vitesse. Des détails sont donnés dans LEMMIN (1989) et LEMMIN *et al.* (1993). Cette méthode a l'avantage de permettre le calcul du coefficient de mélange à haute résolution basé sur des séries temporelles de vitesses du courant d'eau enregistrées au moyen de courantomètres, comme indiqué ci-dessus. A partir des séries temporelles des données enregistrées, on peut obtenir des séries temporelles des coefficients de mélange. Un résultat typique est montré sur la Fig. 6. Il est évident que le coefficient de mélange est très variable sur deux échelles de temps différentes. Sur l'échelle de temps en jours, des changements de plus d'une décennie ou de 20% de la valeur sont régulièrement observés. Ces changements indiquent que l'intensité du mélange peut beaucoup varier sur de courtes périodes. Ces changements sont liés aux changements du forcing du vent. Des vents violents produisent un mélange important. Sur l'échelle de temps des saisons, on observe un

autre type de changement qui reflète à nouveau le changement d'intensité du forcing atmosphérique entre l'automne et l'hiver. Les vents violents sont particulièrement fréquents pendant la période automnale quand le temps est plutôt instable. Les coefficients de mélange sont généralement élevés. En hiver, quand les vents sont plutôt faibles, les coefficients de mélange sont généralement plus faibles qu'en automne. On

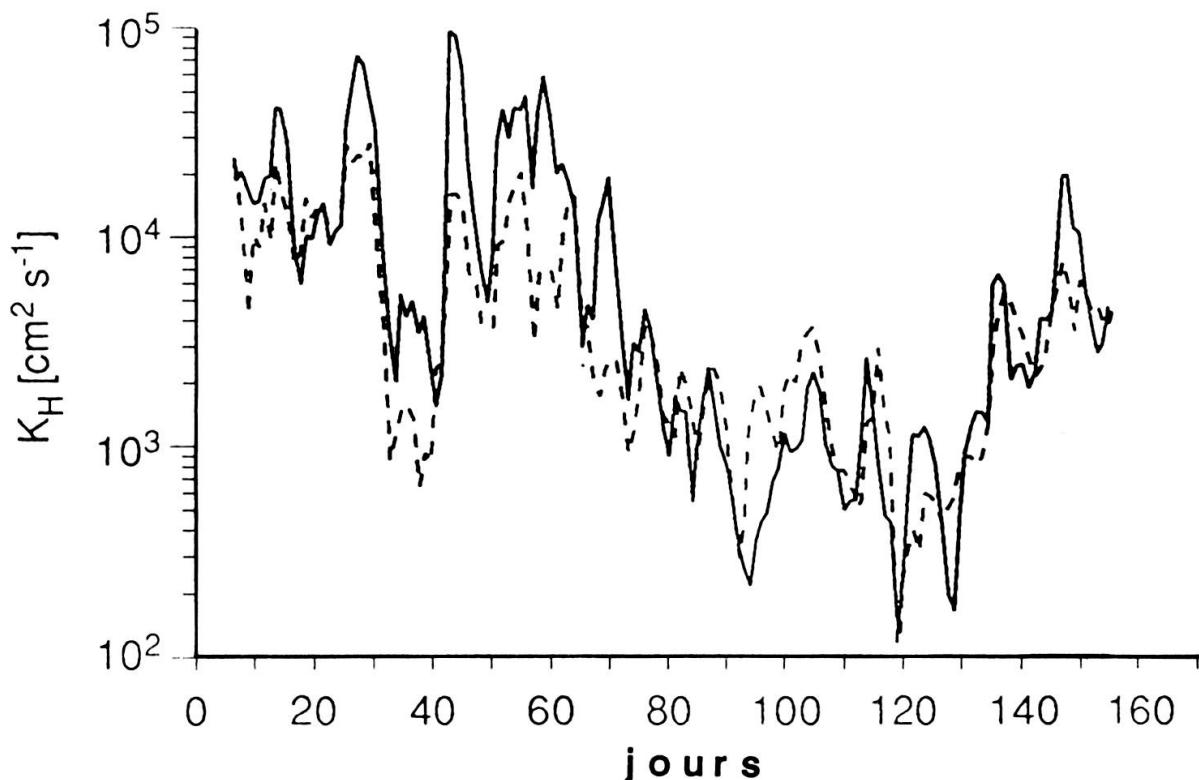


FIG. 6.

Coefficients de mélange turbulents horizontaux K_H calculés à partir des données enregistrées par des courantomètres devant Ouchy. La période des enregistrements débute le 26 octobre 1981. Notez les variations du coefficient de mélange sur l'échelle des jours ainsi que sur l'échelle saisonnière. D'après LEMMIN *et al.* (1993).

relèvera que l'effet de la structure de l'événement de forcing du vent sur la grandeur du coefficient de mélange est égale ou plus grande que la tendance saisonnière.

Par ces résultats, on peut affirmer que le calcul du mélange dans le Léman au moyen de coefficients de mélange constants "typiques" n'est justifié que lorsqu'il s'applique à des processus saisonniers. Lorsque le mélange est calculé sur des jours ou des semaines, l'état du forcing sur ces échelles de temps doit être pris en considération et peut être crucial pour une prédition correcte.

La connaissance du mélange horizontal est importante pour la compréhension de la diffusion des nutriments ou des polluants apportés dans le lac par les rivières. Ces derniers sont amenés dans le lac par les bords et entraînés selon le régime dominant de transport à grande échelle décrit ci-dessus. Ils sont en même temps mélangés à l'eau

ambiant du lac en un mélange turbulent et se répandront ainsi sur des régions toujours plus vastes au cours de leur transport. Le temps écoulé depuis le moment de leur entrée dans le lac par une rivière conduira à une dilution progressive de la concentration. Plus le mélange est fort, plus ces nutriments ou polluants seront dispersés dans les eaux du lac.

Mélange vertical

Il ne semble pas y avoir de courants permanents à grande échelle en direction verticale. Le mélange turbulent en direction verticale est par conséquent un processus important, en particulier pour l'apport de nutriments issus du sédiment jusque dans la couche phototrophique près de la surface. Le coefficient de mélange vertical K_z n'a malheureusement pas encore pu être déterminé jusqu'à présent avec les mêmes résolutions de temps et d'espace que les coefficients de mélange horizontal. Le plus souvent les coefficients de mélange vertical sont estimés à partir des changements dans la stratification pendant des périodes portant sur des semaines ou des mois. Ils sont mesurés par des changements du profil de la température verticale pendant cette période. Cela donnera des résultats intégrant tous les processus qui ont eu lieu pendant ladite période et qui ont contribué au mélange vertical, sans toutefois permettre d'identifier et de quantifier les effets des événements individuels de forcing. Des renseignements importants sur la dynamique lacustre peuvent toutefois être obtenus par les coefficients calculés de cette manière.

Nous avons effectué ces calculs pour la partie centrale du grand lac. Ils sont basés sur les profils de température relevés mensuellement pendant cinq étés consécutifs. Cette méthode est expliquée en détail dans MICHALSKI & LEMMIN (1995). Les résultats typiques sont donnés sur la Fig. 7. On peut observer que les coefficients de mélange vertical K_z sont généralement plus faibles que les coefficients horizontaux étudiés ci-dessus. Cela signifie que le mélange vertical est un processus moins vigoureux que le mélange horizontal. Ce n'est pas surprenant, compte tenu que le mélange vertical doit agir contre le gradient de densité vertical.

Les coefficients de mélange vertical y sont représentés comme une fonction de la fréquence de stabilité N_2 liée au gradient vertical de la température mesurée dans le lac. Nous avons retenu l'hypothèse que les coefficients de mélange vertical sont le résultat du forcing du vent à la surface du lac. Comme il a été développé dans MICHALSKI & LEMMIN (1995), cette hypothèse est représentée par une ligne droite dans le tracé de la Fig. 7. Le long de la courbe des coefficients de mélange vertical, les profondeurs sont indiquées en plusieurs points. On peut voir que cette hypothèse est valable dans les 90 m supérieurs de la colonne d'eau seulement.

Cela signifie que dans le Léman le mélange vertical "forcé" par le vent à la surface peut pénétrer jusqu'à 90 m de profondeur seulement. L'énergie fournie par le vent n'est pas suffisante pour mélanger les eaux dans les couches inférieures. D'autres processus sont sans doute responsables du mélange dans les couches inférieures. Jusqu'à maintenant, on connaît très peu ces processus dans les couches profondes. Comme le

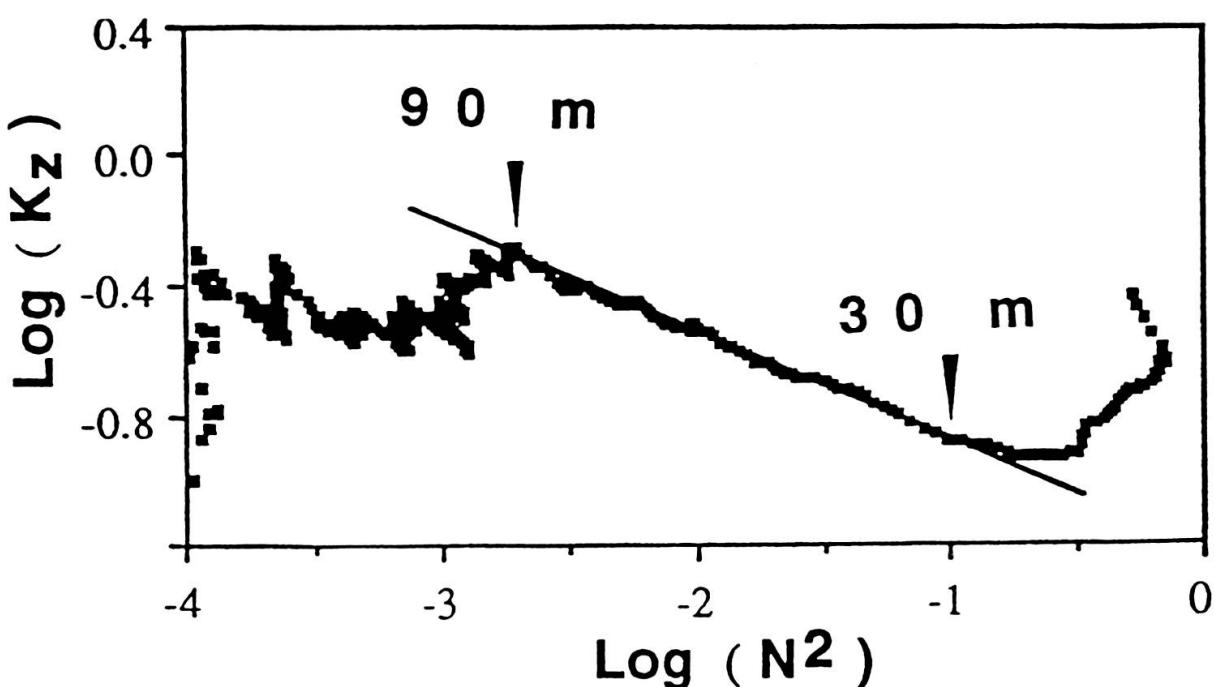


Fig. 7.

Le coefficient de mélange turbulent vertical K_Z en fonction de la stratification pour la période de mai à septembre calculé à partir des données prises sur le plateau central du Léman. Pour des détails voir le texte. D'après MICHALSKI & LEMMIN (1995).

mélange dans les 60% tout en bas de la colonne d'eau n'est pas bien compris, une recherche est actuellement en cours pour tenter de combler cette lacune. Les premières informations recueillies sont que des inversions et des intrusions survenues dans ces couches peuvent être liées aux courants de densité causés par les eaux en provenance de rivières. Il est particulièrement important d'améliorer la compréhension de la dynamique dans ces couches, si l'on considère que les nutriments doivent être transportés au travers de cette colonne d'eau depuis le sédiment jusqu'à la surface.

Au cours de l'étude de la dynamique du mélange vertical, un autre phénomène a été mis en évidence: la tendance multi-annuelle du réchauffement des eaux du lac. Nous avons montré cette tendance dans MICHALSKI & LEMMIN (1995) pendant les années 1987 à 1992 (Fig. 8) et les mesures qui ont été faites ont indiqué qu'elle continue. Alors que les couches supérieures – jusqu'à environ 90 m de profondeur – échangent chaque année de grandes quantités de chaleur avec l'atmosphère, les couches en dessous de 90 m de profondeur ne sont pas touchées et continuent à gagner de la chaleur, qu'elles emmagasinent. Cela est dû à l'absence d'un mélange fort pendant ces derniers hivers. Cette tendance multi-annuelle peut s'expliquer par les hivers dans l'ensemble cléments de la dernière décennie. Une série d'hivers très rigoureux seraient nécessaires pour que les couches du fond du lac approchent de nouveau des 4 °C d'il y a 30 ans. Par contre, si la tendance multi-annuelle continue, le Léman pourrait trouver un nouvel équilibre et un brassage complet autour de 6.5 °C d'ici plusieurs années. Depuis peu nous avons

entrepris des recherches sur les processus du refroidissement hivernal et il ressort des premières mesures que le refroidissement le long des berges du lac joue un grand rôle dans le transport d'eau froide de la surface du lac jusque dans les couches profondes.

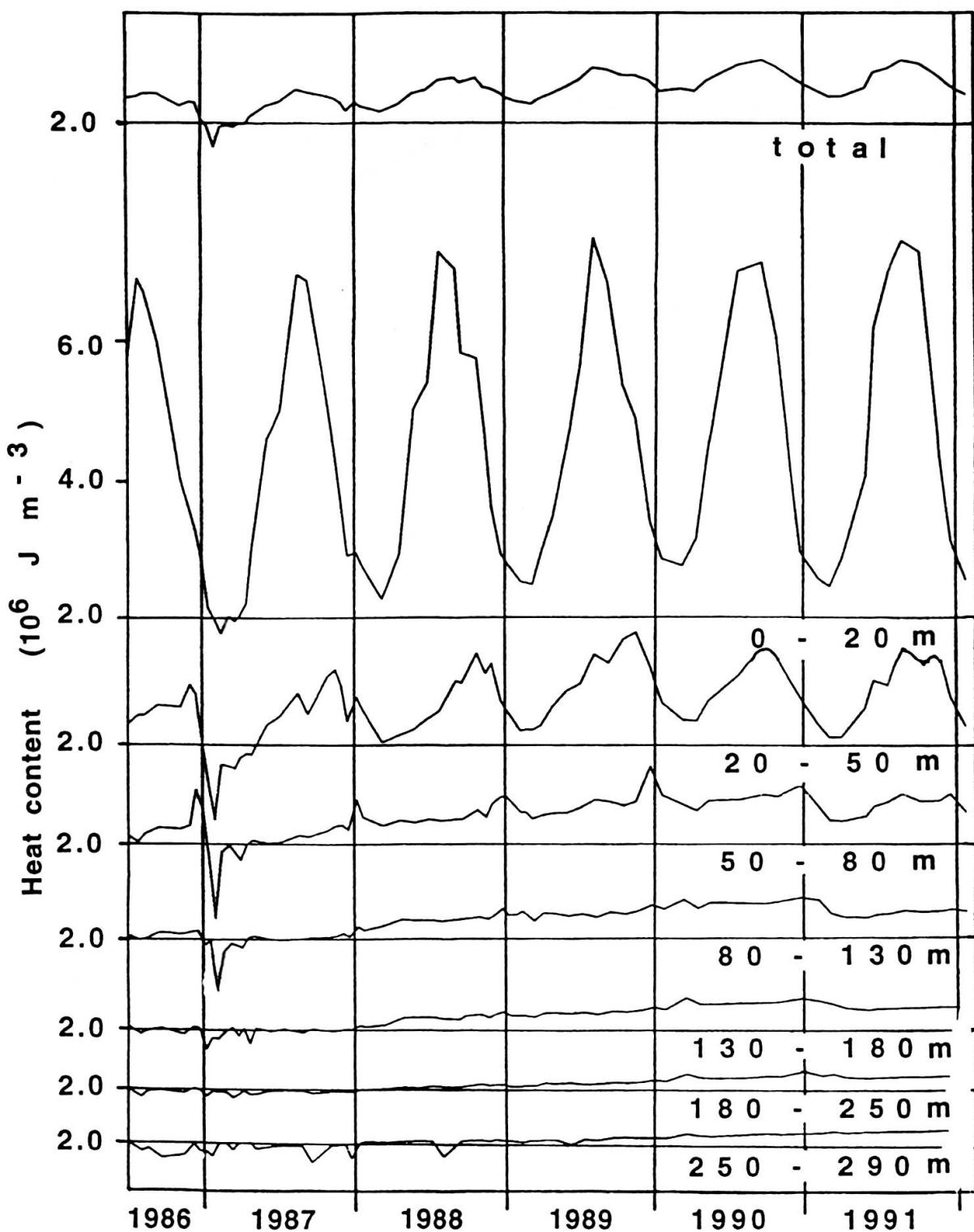


FIG. 8. Teneur en chaleur du Léman. Notez que la teneur en chaleur a augmenté sans interruption pendant la période de l'observation. D'après MICHALSKI & LEMMIN (1995).

CONCLUSIONS

On a vu qu'en réponse au forcing atmosphérique de surface, plusieurs modèles différents, désormais prévisibles, de mouvement d'eau vont être activés dans le lac. Comme ils dépendent des saisons – c'est-à-dire de la stratification thermique dans le lac – certains de ces modèles sont plus probables que d'autres.

La force de Coriolis fera dévier vers la droite les mouvements d'eau à grande échelle dans le Léman, qui interagiront donc avec la pente latérale du bassin lacustre. Dans le petit lac, la largeur du bassin est relativement faible. Par conséquent, l'effet de la force de Coriolis n'y est pas beaucoup ressenti et les mouvements d'eau du petit lac sont généralement semblables à ceux d'un long canal. Dans le grand lac et le haut lac le bassin est cependant assez large pour que, conséquemment à l'effet de la force de Coriolis, le modèle du mouvement d'eau puisse être séparé en deux zones distinctes : la zone côtière et la zone centrale.

Le résultat de la combinaison de la force de Coriolis avec la contrainte aux limites sera que les vitesses à grande échelle vont former des tourbillons ou des seiches internes, qui se déplaceront autour de la limite latérale du grand lac. C'est la raison pour laquelle dans le Léman la zone près de la côte est importante dans la dynamique du mouvement de l'eau à grande échelle. Dans cette zone d'environ 2 km de large, la force et l'orientation du mouvement de l'eau sont variables à cause de la structure de l'événement du forcing atmosphérique à la surface et de la superposition de différents types de mouvement. Ce dernier est cependant toujours orienté le long de la ligne côtière et l'eau est toujours en mouvement. Dans la zone côtière, les vitesses moyennes de longue durée du courant le long de la rive tournent typiquement autour de 5 cms^{-1} , pouvant atteindre 30 cms^{-1} pendant le passage d'événements et tombant rarement en dessous de 3 cms^{-1} . Comme la profondeur est limitée dans cette zone, une resuspension de sédiment par les courants le long de la côte est fort probable. De plus, les vagues de surface se brisent également dans la zone tout près de la côte, causant à nouveau une resuspension de sédiment. En considérant que les nutriments sont amenés dans la colonne d'eau, et donc dans le cycle biochimique, plus rapidement par resuspension de sédiment que par diffusion à partir de sédiment non-perturbé, cette zone est importante dans le cycle de la vie du lac.

Cela contraste avec la partie centrale du bassin lacustre du grand lac. Un mouvement d'eau à grande échelle peut y être généré par le forcing du vent, mais la force de Coriolis le fait se déplacer rapidement vers la zone côtière. Excepté pour des zones limitées où des tourbillons à grande échelle traversent le lac (voir Fig. 4), le mouvement de l'eau dans la partie centrale du lac est principalement dû à de courtes seiches internes (ondes de Poincaré, dont nous ne nous sommes pas occupé ici) ou à des ondes internes progressives. Ces dernières génèrent un mouvement d'eau qui n'est important que sur de courtes échelles de temps. En conséquence, le mouvement de l'eau dans la partie centrale du lac est généralement plus faible et n'a pas d'orientation prédominante. Les courants peuvent tomber à zéro pendant de longues périodes. Comme nous l'avons constaté, dans les couches profondes du bassin central (Fig. 7), aucun modèle précis ou dominant du mouvement de l'eau n'a encore été détecté.

L'étude des mouvements de l'eau dans le Léman a contribué à identifier plusieurs processus importants pour le cycle de la "vie" dans le lac. Avec la poursuite de notre recherche, de nouveaux processus pourront être identifiés et quantifiés, qui nous aideront à compléter l'image de la dynamique du mouvement de l'eau dans le Léman et l'effet de ces mouvements sur le cycle biogéochimique dans le lac.

RÉSUMÉ

Les mouvements de l'eau dans le Léman sont le résultat de trois forces différentes: le vent, le rayonnement solaire et la force de Coriolis. Nous décrivons certaines configurations du mouvement de l'eau qui résultent de différentes combinaisons de ces forces pour différentes échelles de temps et d'espace. Les mouvements de l'eau peuvent être oscillatoires ou continus. L'image qui émerge est que les zones proches du rivage sont plus actives que celles au centre du lac. Pendant la stratification, des mouvements importants de l'eau sont limités aux 90 m supérieurs de la colonne de l'eau.

Mots-clés: courantologie lacustre, seiches, seiches internes, transport, mélange

BIBLIOGRAPHIE

- BAUER, S. 1979. Three-Dimensional Irregular-Grid Finite Difference Model of Wind Induced Water Level Fluctuations and Currents in a Homogeneous Lake with Application to the Lake of Geneva. Thèse No. 335, EPFL, Lausanne.
- BECKERS, P.M. 1989. Modélisation mathématique et numérique des ondes internes du Léman. Thèse No. 819, EPFL, Lausanne.
- BOHLE-CARBONELL, M. 1986. Hydrodynamik des Genfer Sees, Gleichgewichte und charakterisierende Größen. Thèse No. 611, EPFL, Lausanne.
- BOHLE, M. & C. PERRINJAQUET. 1984. Technique de mouillage d'instrument de mesure dans le Léman. *Bul. Tech. Suisse Romand*, 84(4): 45-49.
- BRUSCHIN, J. & H. T. FALVEY. 1975. Vagues de vent sur un plan d'eau confiné. *Bul. Tech. Suisse Romand*, 75(14): 1-12.
- BRUSCHIN, J. & L. SCHNEITER. 1978. Caractéristiques des vagues dans les lacs profonds. *Bul. Tech. Suisse Romand*, 78(19): 269-276.
- FOREL, F. A. 1895. *Le Léman: Monographie Limnologique*. Rouge. Lausanne. 651p.
- LEMMIN, U. 1989. Dynamics of horizontal turbulent mixing in a nearshore zone of Lake Geneva. *Limnol. Oceanogr.*, 34: 420-434.
- LEMMIN, U. 1995. Limnologie physique, (chapitre 2), *dans* Limnologie générale (R. Pourriot et M. Meybeck, eds.) Masson, Paris, p.61-106.
- LEMMIN, U., Z. VECSENYES & W.H. GRAF. 1993. Mixing dynamics in Lake Geneva: On the determination of horizontal turbulent mixing coefficients from Eulerian current data. *Ann. Geophysicae*, 11: 327-339.
- LEMMIN, U. & N. d'ADAMO. 1996. Summertime winds and direct cyclonic circulation: observations from Lake Geneva. *Ann. Geophysicae*, 14: 1207-1220.
- LEMMIN, U., R. JIANG & S.A. THORPE. 1998. Finescale dynamics of stratified waters near a sloping boundary of a lake. *dans* Physical limnology (J. Imberger, ed.) AGU, Washington, in press.
- MERZI, N., W. H. GRAF & C. PERRINJAQUET. 1985. Vagues dues au vent de sud-ouest sur le petit lac (Léman). *Bul. Tech. Suisse Romand*, 85(26): 479-482.
- MICHALSKI, J. & U. LEMMIN. 1995. Dynamics of vertical mixing in the hypolimnion of a deep lake: the Lake of Geneva. *Limnol. Oceanogr.*, 40: 809-816.
- MORTIMER, C. H. 1974. Lake hydrodynamics. *Mitt. Int. Ver. Limnol.*, 20: 124-197.
- THORPE, S.A., J.M. KEEN, R. JIANG, & U. LEMMIN. 1996. High frequency internal waves in Lake Geneva. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A 354: 237-257.