Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 103 (1977)

Heft: 19: SIA spécial, no 4, 1977

Artikel: Les courants dans le Léman en saison froide: une simulation mathématique

Autor: Bauer, Sebastian W. / Graf, Walter H. / Tischer, Evelyn

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-73263

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: 02.07.2025

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

LES COURANTS DANS LE LÉMAN

Avant-propos

Le Laboratoire d'hydraulique de l'EPFL (LHYDREP) entreprend depuis de nombreuses années des recherches de base et appliquées sur le Léman (ports, aménagements divers de rives, effets des dragages, transport littoral, vagues). Dernièrement c'est le problème des courants induits par les vents qui fut abordé. Les deux publications citées ci-après rendent compte des premiers résultats, assez encourageants, que nous avons obtenus. *Les courants dans le Léman en saison froide. Une simulation mathématique* par BAUER, GRAF et TISCHER, fait état d'une technique moderne de représentation des courants en milieu non stratifié (thermiquement homogène). Les résultats, importants par eux-mêmes, ont permis de mettre au point une *Campagne de mesure des courants dans le Léman* telle que décrite au second article par PROST, BAUER, GRAF et GIROD. Cette campagne — qui pourrait durer plusieurs années — fournira des résultats lesquels à leur tour permettront d'améliorer la simulation mathématique du comportement du lac et de l'étendre à la saison chaude caractérisée notamment par une nette stratification (saut thermique).

Le mouvement de l'eau dans un lac — *les courants* — comprend des courants de surface et en profondeur sur lesquels se superpose une circulation verticale. Les types de courants sont déterminés par les conditions météorologiques, les flux entrant et sortant du lac, les gradients de densité, la configuration géomorphologique, les perturbations locales et la rotation de la terre. Ces trois types de mouvements sont liés de manière variable, temporellement et spatialement, et coexistent à divers degrés.

Le LHYDREP se propose d'étudier :

a) Les courants induits par l'action du vent, mais qui sont également influencés par des gradients de densité, la rotation de la terre et la configuration géomorphologique. Nous les nommerons *courants de dérive*.

b) L'influence de ces courants sur les *processus de mélange et de transport*.

c) Les *modèles mathématiques* (numériques) de la dynamique des lacs déjà mis au point et leur adaptation à nos mesures.

Ce travail de recherche sera entrepris expérimentalement (en procédant à des mesures *in situ*) et analytiquement (prévision d'un programme expérimental raisonnable et interprétation de nos mesures).

Notre recherche est actuellement axée sur le Léman — qui servira de laboratoire d'investigations — mais nous nous proposons aussi d'étudier d'autres lacs.

W. H. GRAF.

Les courants dans le Léman en saison froide Une simulation mathématique [1]

par SEBASTIAN W. BAUER, WALTER H. GRAF et EVELYN TISCHER, Lausanne

1. Modèle mathématique

Le système des courants — circulation d'un lac — peut être considéré comme un mouvement d'eau à grande échelle. Il peut être décrit par les trois composantes de l'équation de quantité de mouvement [1] [2] et par l'équation de continuité pour un fluide homogène (non stratifié) et incompressible (*pour le Léman :* probablement valable pendant l'hiver) :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(uv) + \frac{\partial}{\partial z}(uw) - fv = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z}\left(\eta\frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon\frac{\partial u}{\partial y}\right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uv) + \frac{\partial}{\partial y}(v^2) + \frac{\partial}{\partial z}(vw) + fu = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}\left(\eta\frac{\partial v}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon\frac{\partial v}{\partial y}\right) \quad (2)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

Les conditions aux limites sont :

sur les frontières solides

$$u = v = w = 0 \quad (5)$$

et à la surface libre avec $z = 0$

$$\eta\frac{\partial u}{\partial z} = \tau_x; \quad \eta\frac{\partial v}{\partial z} = \tau_y \quad (6)$$

u, v et w sont les composantes de vitesse dans les directions respectives x, y et z ; x est positif dans la direction de l'est ; y est positif dans la direction du nord ; z est positif dans la direction verticale vers le haut (zéro à la surface de l'eau) ; t = temps ; f = paramètre de Coriolis ; ρ = densité du fluide ; p = pression locale ; η = composante verticale de la viscosité des tourbillons ; ε = composante horizontale de la viscosité des tourbillons ; g = accélération de la gravité ; τ_x et τ_y = contraintes tangentielles du vent dans les directions x et y.

L'équation (3) exprime l'équilibre hydrostatique, hypothèse valable pour des lacs peu profonds, i.e. : $D/L \ll 1$,

[1] Une première version de cette étude a été présentée à la Journée d'études (1976) « Le Léman et son avenir », organisée par la Société des ingénieurs civils de France (section suisse), avec la collaboration de l'Association romande pour la protection des eaux et de l'air (ARPEA) et des sections romandes de la Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA).

[2] Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

avec L dimension horizontale caractéristique et avec D profondeur maximale (*pour le Léman* : $D/L \simeq 0{,}03$).

Les équations (1) à (3) peuvent être encore simplifiées avec les hypothèses suivantes : *a)* l'écoulement est stationnaire ou permanent : $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$, $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$; une telle situation peut être imaginée avec un vent constant qui souffle assez longtemps pour avoir une influence sur la circulation établie (*pour le Léman :* une bise qui souffle pendant plusieurs jours) ; *b)* les forces d'inertie sont faibles par rapport aux forces de Coriolis — on appelle ce rapport : nombre de Rossby — et les équations (1) à (3) peuvent être linéarisées : $\frac{\partial}{\partial x}(uv) = 0$, $\frac{\partial}{\partial y}(uv) = 0$, etc. (*pour le Léman :* nombre de Rossby $\simeq 0{,}1$) ; *c)* les diffusions horizontales peuvent être négligées (probablement valable pour des lacs peu profonds) :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon \frac{\partial v}{\partial x}\right) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon \frac{\partial u}{\partial y}\right) = 0, \text{ etc.}$$

(*pour le Léman :* $D/L \simeq 0{,}03$),

d) la composante verticale de la viscosité des tourbillons η peut être considérée comme une remplaçante valable de la viscosité (laminaire) et sa valeur est constante, quelle que soit la profondeur :

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta \frac{\partial v}{\partial z}\right) = \eta \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}, \text{ etc.}$$ (*pour le Léman :* la valeur η et sa variation ne sont pas connues).

Avec les mêmes conditions aux limites, le système des équations (1) à (4) devient alors :

$$-fv = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \tag{7}$$

$$+fu = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \eta \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \tag{8}$$

$$g = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} \tag{9}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{10}$$

Il faut encore signaler que les équations ci-dessus sont écrites pour des conditions restreintes et qu'en conséquence leurs solutions contiendront les mêmes restrictions.

2. Représentation mathématique

La résolution du modèle mathématique décrit ci-dessus est obtenue au moyen d'une méthode par éléments finis développée par GALLAGHER et al. [3] et basée sur une formulation mathématique donnée par LIGGETT et al. [2].

Dans cette formulation les équations (7) à (10) sont rendues adimensionnelles par l'introduction des variables suivantes :

$$x_* = \frac{x}{L}, \quad y_* = \frac{y}{L}, \quad z_* = \frac{z}{D}$$

$$u_* = \frac{fL}{gD}u, \quad v_* = \frac{fL}{gD}v, \quad w_* = \frac{fL^2}{gD^2}w \tag{11a}$$

$$h_* = \frac{h}{D}, \quad p_* = \frac{p}{\rho g D} \tag{11b}$$

où

L = Longueur caractéristique ; par exemple la largeur (*pour le Léman :* $L = 10$ km).

D = Profondeur caractéristique ; par exemple la profondeur maximale (*pour le Léman :* $D = 300$ m).

L'astérisque signifie que la variable est sans dimension. On obtient alors :

$$-v_* = -\frac{\partial p_*}{\partial x_*} + \frac{1}{2m^2}\frac{\partial^2 u_*}{\partial z^2_*} \tag{12}$$

$$u_* = -\frac{\partial p_*}{\partial y_*} + \frac{1}{2m^2}\frac{\partial^2 v_*}{\partial z^2_*} \tag{13}$$

$$\frac{\partial p_*}{\partial z_*} = -1 \tag{14}$$

$$\frac{\partial u_*}{\partial x_*} + \frac{\partial v_*}{\partial y_*} + \frac{\partial w_*}{\partial z_*} = 0 \tag{15}$$

avec $$2m^2 = \frac{fD^2}{\eta}$$

et les conditions aux limites s'écrivent :

$$u_* = v_* = w_* = 0 \text{ sur toutes les frontières solides}$$

et $$\frac{\partial u_*}{\partial z_*} = \Delta, \quad \frac{\partial v_*}{\partial z_*} = \Gamma \quad \text{pour } z_* = 0 \tag{16}$$

avec $$\Delta = \frac{fL\tau_x}{\eta g} \text{ et } \Gamma = \frac{fL\tau_y}{\eta g}.$$

Les équations (12), (13) et (14) forment un système de trois équations à trois inconnues u_*, v_*, p_*. On peut résoudre (12) et (13) par des méthodes de transformation conforme et on obtient (en éliminant les astérisques) :

$$u = -\frac{\partial p}{\partial y} + \cos mz\,(C_2 e^{mz} - C_4 e^{-mz}) - \sin mz\,(C_1 e^{mz} - C_3 e^{-mz}) \tag{17}$$

$$v = \frac{\partial p}{\partial x} + \cos mz\,(C_1 e^{mz} + C_3 e^{-mz}) + \sin mz\,(C_2 e^{mz} + C_4 e^{-mz}) \tag{18}$$

où C_1, C_2, C_3 et C_4 représentent des constantes d'intégration, fonction également de x et y puisqu'on intègre par rapport à z. Ces inconnues C_1, C_2, C_3 et C_4 peuvent être déterminées par substitution des équations (17) et (18) dans celle des conditions aux limites (16).

En substituant ces mêmes équations (17) et (18) dans les équations (19) et (20) ci-dessous et définissant les vitesses moyennes $\bar{u}$ et $\bar{v}$:

$$\bar{u} = \frac{1}{h}\int_{-h}^{0} u\,dz \tag{19}$$

$$\bar{v} = \frac{1}{h}\int_{-h}^{0} v\,dz \tag{20}$$

on obtient le résultat suivant :

$$\bar{u} = h_1 \frac{\partial p}{\partial x} + h_4 \frac{\partial p}{\partial y} + h_2\Gamma + h_3\Delta \tag{21}$$

$$\bar{v} = -h_4 \frac{\partial p}{\partial x} + h_1 \frac{\partial p}{\partial y} + h_3\Gamma - h_2\Delta \tag{22}$$

où h_1, h_2, h_3 et h_4 sont des fonctions de x et y. L'introduction d'une fonction de courant ψ, telle que :

$$\bar{u} = \frac{1}{h}\frac{\partial \psi}{\partial y} \tag{23}$$

$$\bar{v} = -\frac{1}{h}\frac{\partial \psi}{\partial x} \tag{24}$$

permet de réduire en une seule les deux équations (21) et (22) :

$$\nabla^2\psi = \frac{h}{h_1}(h_1^2 + h_4^2)\left[\left(\frac{\partial r}{\partial x} + \frac{\partial s}{\partial y}\right)\frac{\partial \psi}{\partial x} + \left(\frac{\partial r}{\partial y} + \frac{\partial s}{\partial x}\right)\frac{\partial \psi}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(q\Gamma) - \frac{\partial}{\partial y}(q\Delta) + \frac{\partial}{\partial y}(t\Gamma) + \frac{\partial}{\partial x}(t\Delta)\right] \tag{25}$$

avec comme condition aux limites : ψ constant sur les frontières. Les quantités r, s, q et t sont elles-mêmes fonctions de h, h_1, h_2, h_3 et h_4.

GALLAGHER et al. [3] ont résolu l'équation (25) par la méthode des éléments finis. Les termes de l'équation (25) peuvent être ordonnés de la façon suivante :

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + A(x,y)\frac{\partial \psi}{\partial x} + B(x,y)\frac{\partial \psi}{\partial y} + C(x,y) = 0 \tag{26}$$

où les coefficients A, B et C sont fonctions de la topographie du fond, le coefficient C dépendant également de la force de frottement du vent.

Mise au point du programme : le modèle mathématique, dont nous venons d'exposer les grandes lignes, a été aimablement mis à notre disposition par M. le professeur J. A. LIGGETT de l'Université de Cornell (Ithaca, New York). Un premier programme prépare les données géométriques et génère une grille qui servira d'input à la seconde partie.

En plus des résultats de ce premier programme, le second programme lit également tous les paramètres nécessaires tels que la force de frottement du vent, la viscosité turbulente, etc. Puis il résout les équations décrites précédemment et catalogue finalement les résultats. De cette façon, il est alors possible de vérifier l'influence d'une variation d'un quelconque paramètre sur la simulation, sans avoir pour cela à recalculer systématiquement toute la description géométrique préliminaire du lac.

Dans ce programme les éléments finis utilisés sont triangulaires, chacun étant défini par ces trois sommets (nœuds). Tous ces nœuds, pour chaque élément, doivent se suivre séquentiellement toujours dans le même sens de rotation (par exemple celui des aiguilles de la montre). Chaque nœud est défini par ses coordonnées dans un système d'axes rectangulaires de référence, et à chacun est associée une profondeur égale à celle du lac à cet endroit. De cette façon, la préparation et la vérification des données forment à elles seules une très importante partie du travail, particulièrement si le nombre de nœuds et d'éléments est grand. Puisqu'on prévoit d'appliquer ces programmes à d'autres lacs, on a eu recours à des représentations graphiques par ordinateur pour cette préparation et ce contrôle des données. De même pour mieux visualiser les résultats de la simulation, ceux-ci seront dessinés directement par l'ordinateur.

Une suite de programmes fut ainsi développée au LHYDREP permettant de représenter graphiquement à deux ou trois dimensions, aussi bien la figure de la grille d'éléments finis que celle des vecteurs vitesses, résultat de la simulation. Toutes les données et tous les résultats étant pourvus par ordinateur, il n'existe aucune manipulation intermédiaire et ainsi évite-t-on la possibilité d'une quelconque erreur humaine.

3. Application au Léman

La grille : l'exécution d'essais préliminaires a montré qu'avec une grille composée de 579 nœuds (soit à peu près 1 nœud par km^2), 1025 éléments triangulaires et 131 nœuds frontières on obtient une bonne représentation du Léman. Cette grille d'éléments finis est représentée sur la figure 1.

Comme le montre la figure 1 on peut noter que le Léman est vraiment peu profond par rapport à sa largeur ($0{,}01 < D/L < 0{,}03$). Pour les calculs numériques il est nécessaire que la profondeur minimale admissible soit d'environ 3 % de la profondeur maximale ; c'est pourquoi la profondeur associée aux nœuds de bords est toujours supérieure à zéro. Cependant, comme on le constate sur la figure 1, malgré cette restriction on obtient une représentation raisonnable de la géométrie du Léman.

Paramètres : pour obtenir la simulation du Léman, il faut déterminer les paramètres entrant dans le modèle mathématique, c'est-à-dire (voir équations (7), (8) et (9)) :

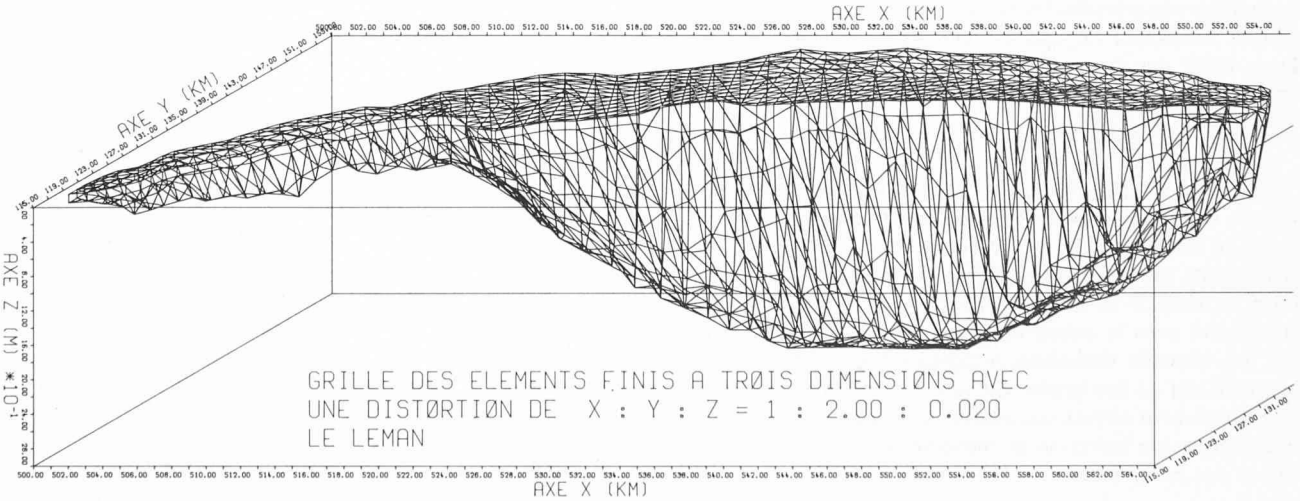

Fig. 1. — Grille à trois dimensions des éléments finis pour le Léman. (N. B. — Echelles distordues.)

la masse volumique de l'eau, ρ, le paramètre de Coriolis, f, l'accélération de la pesanteur, g, et la viscosité turbulente, η.

Afin de remplacer les forces de frottement τ_x et τ_y, définies par l'équation (6), par des vitesses de vent, la version actuelle du programme a été modifiée. En effet, la force de frottement du vent peut s'écrire :

$$\tau = C_f \cdot \rho_a \cdot U^2 \qquad (27)$$

où C_f = coefficient de frottement du vent
ρ_a = masse volumique de l'air
U = vitesse du vent de l'écoulement non perturbé

Les deux paramètres supplémentaires C_f et ρ_a doivent alors être aussi définis quantitativement.

Pour les paramètres, qui varient assez peu, les hypothèses suivantes ont été faites :

Masse volumique de l'air : $\rho_a = 1{,}2$ kg/m^3
Masse volumique de l'eau : $\rho = 997{,}3$ kg/m^3
Accélération de la pesanteur : $g = 9{,}80$ m/s^2

Le paramètre de Coriolis, f, est donné ([4], p. 161) par :

$$f = 2\,\omega \sin \varnothing \qquad (28)$$

où ω = vitesse angulaire de rotation de la terre
$\varnothing$ = latitude

Avec une latitude moyenne de 46°25′ pour le Léman on obtient :

$$f = 0{,}000105 \text{ s}^{-1}$$

Les deux paramètres les moins bien connus sont la viscosité turbulente, η, et le coefficient de frottement du vent, C_f. La viscosité turbulente, η, varie avec la vitesse et la profondeur ; dans le modèle cependant, on a fait l'hypothèse qu'elle reste constante dans tout le lac. Pour calculer cette viscosité en fonction de la vitesse du vent, U, nous avons utilisé la relation empirique suivante ([4], p. 196) :

$$\eta = 0{,}1825 \times 10^{-4}\, U^{5/2}/\rho \qquad (29)$$

où U = vitesse du vent en cm/s
ρ = masse volumique de l'eau en g/cm^3
η = viscosité turbulente (verticale) en cm^2/s

Pour le coefficient de frottement du vent, C_f, de l'équation (27) on rencontre les mêmes difficultés. D'importantes recherches expérimentales (p. ex. [4], p. 209) ont montré que ce coefficient dépend un peu de la vitesse du vent. Dans notre cas il semble suffisant d'admettre qu'il varie entre :

$$0{,}5 \cdot 10^{-3} < C_f < 5 \cdot 10^{-3}$$

Le champ de vitesses : après avoir choisi une grille et des valeurs numériques pour les paramètres, on peut calculer, grâce au modèle, le champ de vitesses à travers tout le lac. Examinons maintenant le résultat de la simulation obtenu pour un vent de 20 km/h soufflant du nord-est (45°, bise) et agissant avec la même intensité sur toute la surface du lac. La viscosité turbulente adoptée est $\eta = 200$ cm^2/s et le coefficient de frottement du vent $C_f = 0{,}003$. Il va sans dire qu'on peut obtenir un champ de vitesses pour un vent quelconque (en direction et intensité) et pour toute autre valeur des paramètres.

[3] Voir planche hors texte p. 244 et 245.

La figure 2[3] représente le champ de vitesses synoptique calculé par l'ordinateur et dessiné par le traceur qui lui est attaché. On remarquera en surface la déviation instantanée vers la droite du vecteur de courant par rapport à la direction du vent, ce qui met mathématiquement en évidence l'effet de Coriolis. Si l'on met maintenant en parallèle le champ de vitesse obtenu pour la surface du lac et ceux des couches sous-jacentes, on note une inversion presque complète de la direction des vitesses. Alors qu'en surface, pour un vent soufflant du nord-est, les vecteurs vitesses s'orientent est-ouest ou nord-est / sud-ouest, nous voyons qu'à une profondeur de 31 m déjà la déviation est de 180° dans le Petit-Lac, alors qu'il faut aller jusqu'à 62 m dans le Grand-Lac pour avoir la même déviation. Celle-ci se maintient ainsi plus ou moins jusque dans les couches les plus basses.

De plus, des mouvements giratoires se dessinent à chaque niveau, le phénomène étant indubitablement amplifié par la géométrie des « deux » lacs (Petit et Grand-Lac) et leur influence mutuelle. Pour illustrer cette argumentation, on a représenté sur la figure 3 la distribution verticale des vitesses en un point du lac. Ce qui apparaît n'est rien d'autre que la « spirale d'Ekman » bien connue.

Remarques : Le champ de vitesses décrit ici ne doit pas être utilisé de manière quantitative ; on ne dispose en effet d'aucune mesure permettant de corroborer nos résultats. Mais quoi qu'il en soit, certaines conclusions qualitatives importantes peuvent en être tirées. Nous rappelons encore une fois que certaines hypothèses ont été faites dans cette simulation et qu'il convient maintenant de les vérifier ; à savoir que *a)* affluents et effluents n'ont pas d'influence, *b)* la force du vent agit d'une façon constante (avec une intensité constante et dans la même direction sur toute la surface du lac), *c)* les paramètres de l'équation sont donnés et prennent des valeurs constantes.

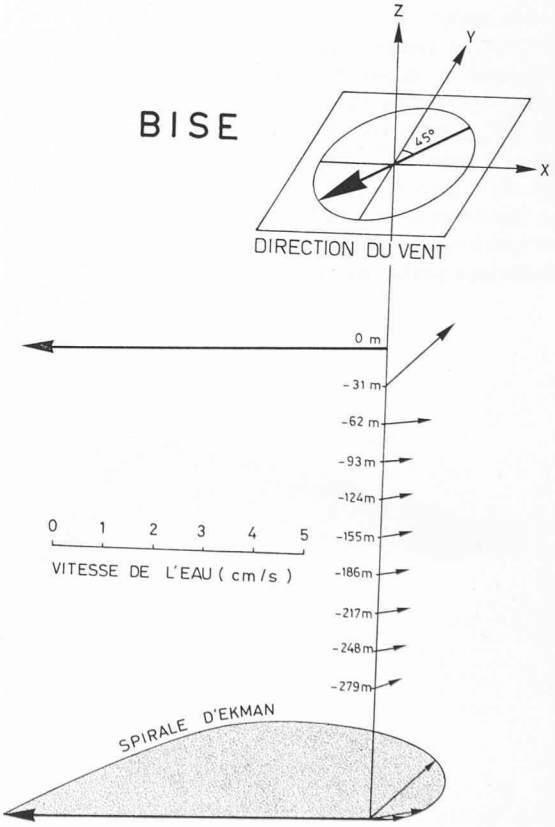

Fig. 3. — Distribution verticale des vitesses : Spirale d'Ekman (nœud 348 de la grille).

Toutes ces hypothèses mais également certains problèmes mathématiques (résultats singuliers près des rives) feront l'objet de nos futures investigations.

4. Conclusions

1) La discussion présentée ici porte sur un modèle mathématique de simulation numérique du champ de vitesse dans le Léman pour la saison (hivernale) non stratifiée.
2) Nous avons utilisé et adopté sous une forme modifiée une méthode par éléments finis proposée par GALLAGHER et al. [3].
3) Pour un ensemble de paramètres donnés un champ de vitesses peut ainsi être obtenu (voir figure 2). Seules des conclusions qualitatives peuvent en être tirées, en attendant que des mesures *in situ* (actuellement en cours) viennent corroborer ces données.

BIBLIOGRAPHIE

[1] LIGGETT J. A. (1970) : *Cell Method for Computing Lake Circulation*, Proc. Am. Soc. Civ. Engs., Vol. 96, No. HY3.

[2] LIGGETT J. A. et HADJITHEODOROU C. (1969) : *Circulation in Shallow Homogeneous Lakes*, Proc. Am. Soc. Civ. Engs., Vol. 95, No. HY2.

[3] GALLAGHER R. H., LIGGETT J. A. et CHAN S. K. T. (1973) : *Finite Element Shallow Lake Circulation*, Proc. Am. Soc. Civ. Engs., Vol. 99, No. HY7.

[4] NEUMANN G. et PIERSON W. J. Jr. (1966) : *Principles of Physical Oceanography*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

Adresse des auteurs :

Sebastian W. Bauer, Walter H. Graf et Evelyn Tischer
Laboratoire d'hydraulique
de l'Ecole polytechnique fédérale
route de Genève 67, 1004 Lausanne

Campagne de mesure des courants dans le Léman

par JEAN-PATRICK PROST, SEBASTIAN W. BAUER, WALTER H. GRAF, HENRI GIROD, Lausanne

1. Le problème

Sous l'action du vent, les différentes couches du lac se mettent lentement en mouvement, créant les courants de dérive. Aussi pour connaître la « circulation » lacustre faut-il étudier la distribution des courants en relation directe avec l'agent générateur de ces mouvements, à savoir le vent et sa distribution verticale au voisinage immédiat de l'interface air-eau.

Nous procéderons donc à des mesures simultanées *in situ*, de la vitesse du vent et de celle du courant, définies par leurs deux caractéristiques vectorielles : intensité et direction. Pour déterminer le degré d'homogénéité du lac au moment des campagnes, nous mesurerons également la température de l'eau et sa distribution.

La station anémométrique sera aussi intéressante pour comparer les mesures de vent obtenues avec celles enregistrées jusqu'à présent à partir des stations terrestres existantes (Genève-Cointrin, Lausanne, Montreux, Thonon, etc.).

L'idéal serait bien sûr de mettre en place un grand nombre d'installations expérimentales enregistrant simultanément, horizontalement et verticalement, les courants et les vents, afin d'obtenir une image synoptique du phénomène. Une telle opération serait cependant utopique, d'une part en raison de son coût — vu le nombre d'instruments dont il faudrait disposer et les moyens techniques à mettre en œuvre — mais d'autre part en raison des problèmes que poserait l'utilisation même momentanée d'une grande partie de ce domaine public lacustre.

Tout en gardant l'idée d'une exploration verticale, nous ne disposerons que d'une seule installation jumelée vent-courant, qui sera déplacée sur des périodes variables, vers un autre site (suivant les cas quelques semaines ou quelques mois). En fonction des résultats obtenus par simulation mathématique (cf. article précédent, figure 2), on choisira les sites d'exploration pour qu'ils soient chacun représentatif d'une certaine zone du Léman.

Pour les développements mathématiques ultérieurs nécessaires à l'étude des échanges de masse au sein du lac, il sera aussi plus simple de ne raisonner d'abord que sur une colonne d'eau verticale isolée (sans tenir compte de l'influence des colonnes voisines) mais représentative, dans certaines conditions, de la masse liquide alentour.

Ces différentes considérations nous dictent à la fois le schéma de l'installation (jumelage de deux stations) et le choix des instruments de mesure qui devront être parfaitement fiables pendant toute la durée des campagnes.

2. Description de l'installation expérimentale

La figure 1 montre l'installation qui se compose de trois unités :

a) *La station des courantomètres :* c'est le cœur de l'installation expérimentale. Elle compte cinq courantomètres (1) [1] fixés à différents niveaux (variables suivant la profondeur du site) à un câble en acier de 5 mm (2). La disposition adoptée (séparation complète de la station anémométrique et du câble des courantomètres) assure des conditions expérimentales optimales, sans aucune influence des mouvements de surface. Cette station est séparée de la station anémométrique et de la balise qui l'encadrent, par une distance d'environ 1,5 fois la profondeur du lac à cet emplacement, pour que leurs mouvements longitudinaux ne viennent pas perturber les mesures de courant. La tension du câble de suspension est assurée par cinq paires de flotteurs (Viny float 2209) (3) supportant chacun 20 kg, placés par couple au-dessus de chaque courantomètre, de poids unitaire 21 kg. La tension globale est donc inférieure à 100 kg. Le flotteur supérieur sera immergé à 4 m sous la surface du lac, afin de ne pas entraver le trafic lacustre dans ce secteur.

b) *La station anémométrique* : répond aux trois objectifs suivants : 1° Servir de support au mât sur lequel seront fixés les bras supportant les instruments de mesure du vent ; 2° protéger l'appareil électronique d'enregistrement des données ; 3° loger la batterie d'alimentation du feu clignotant fixé au sommet du mât.

La station anémométrique [2] est constituée d'un tube hélicoïdal renforcé en PVC (4) de 2,50 m de long

[1] Les chiffres entre parenthèses se réfèrent à la figure 1.

[2] La description qui suit se réfère à la version primitive de la station anémométrique (cf. fig. 2a).