

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 103 (1977)
Heft: 19: SIA spécial, no 4, 1977

Artikel: Campagne de mesure des courants dans le Léman
Autor: Prost, Jean-Patrick / Bauer, Sebastian W. / Graf, Walter H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-73264>

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: 17.02.2026

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

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'in-

fluence 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^o Servir de support au mât sur lequel seront fixés les bras supportant les instruments de mesure du vent ; 2^o protéger l'appareil électronique d'enregistrement des données ; 3^o loger la batterie d'alimentation du feu clignotant fixé au sommet du mât.

La station anémométrique² 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).

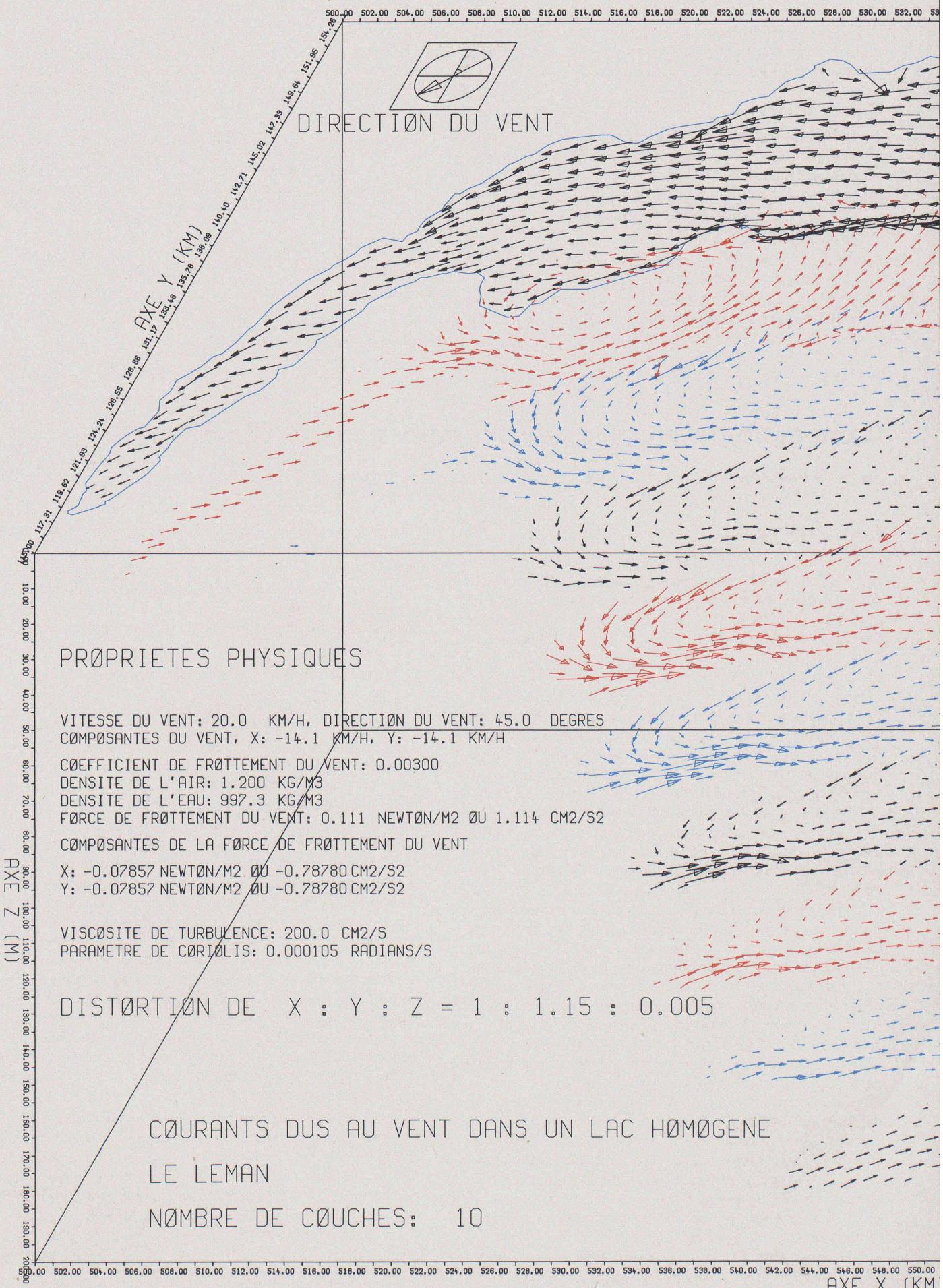
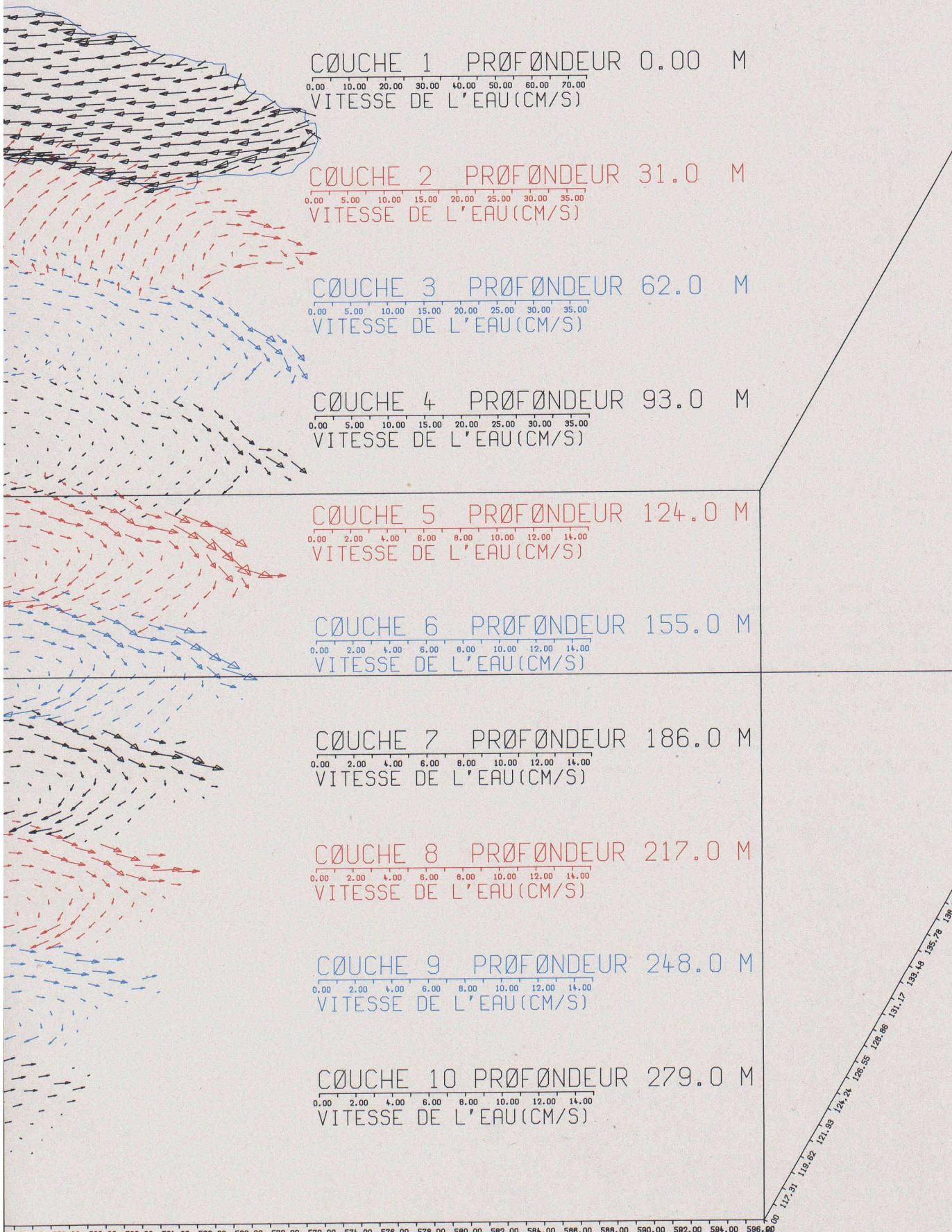


Fig. 2. — Vue synoptique tridimensionnelle du champ de vitesses

AXE X (KM)

6.00 540.00 542.00 544.00 546.00 548.00 550.00 552.00 554.00 556.00 558.00 560.00 562.00 564.00 566.00 568.00 570.00 572.00 574.00 576.00 578.00 580.00 582.00 584.00 586.00 588.00



éman. (N. B. — Echelles de vitesses différentes suivant les niveaux.)

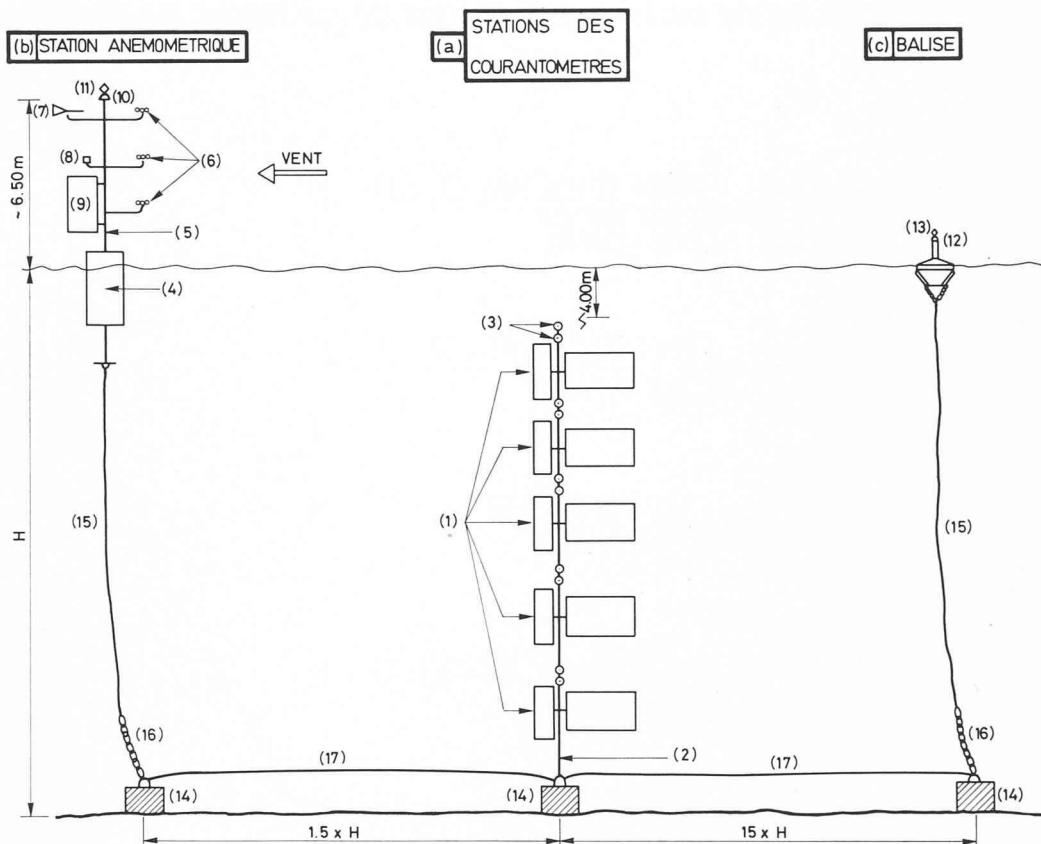


Fig. 1. — Schéma de l'installation expérimentale.

et 0,75 m de diamètre extérieur. Celui-ci est traversé par un tube en aluminium de 50 mm de diamètre et 5 m de long, à l'extrémité inférieure duquel sont empilés les lests d'équilibrage en plomb. A son extrémité supérieure vient se fixer un mât identique (5), support des anémomètres (6), de la girouette (7) et du compas magnétique (8). Une tôle en aluminium (9), fixée au mât, sert d'empennage à la station et l'oriente dans la direction du vent. Les anémomètres sont ainsi directement contre le vent et ne sont pas influencés par l'effet de sillage dû au mât. La station anémométrique, d'un poids total de 600 kg environ, a été calculée pour que son tirant

d'eau soit de 3,50 m environ. Ainsi le feu clignotant (10) et l'écho radar (11), culminant à plus de 6,50 m au-dessus du plan d'eau, signaleront efficacement la station aux navigateurs. Son amarrage au câble d'ancrage se fait au crochet soudé sous la plaque circulaire, support des lests d'équilibrage.

c) *La balise* : en aluminium, de forme conventionnelle (0,70 m de haut et 1,15 m de diamètre) est surmontée d'un cylindre, muni au sommet (à 1 m environ du plan d'eau) d'un feu clignotant (12) et d'un écho radar (13). La batterie d'alimentation du feu est logée dans le fond de la balise, qui n'a d'autre utilité que de signaler l'installation et per-

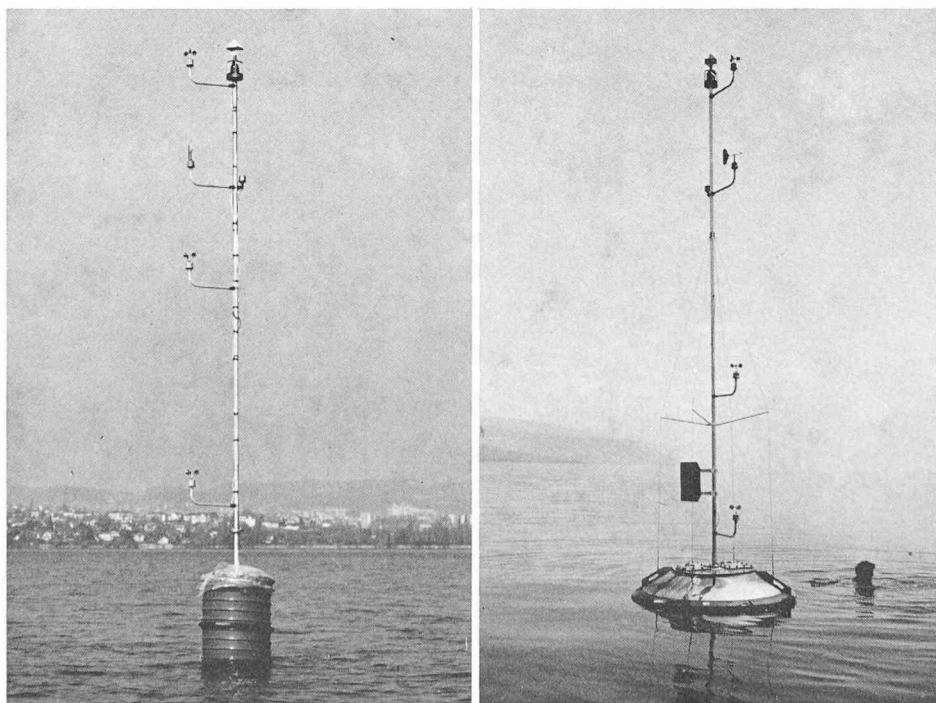


Fig. 2. — Station anémométrique : a) version primitive (à gauche), b) version actuelle (à droite).

mettre de localiser l'emplacement des courantomètres immergés.

Les corps morts, cubes en béton (14) ou chaînes de plomb, de 500 kg sont reliés à la station anémométrique et à la balise par des câbles d'acier de 9 mm (15). Sur les derniers mètres, le câble est remplacé par une chaîne à gros maillons droits de 12 mm (16), qui donne le mou nécessaire et évite de trop brutales tensions sur le câble résultant de mouvements verticaux de forte amplitude en surface. Grâce aux câbles de fond (17), on assure une liaison entre les corps morts qui facilite leur récupération et celle des courantomètres, si jamais la station anémométrique ou la balise venait à rompre ses amarres (ce qui est arrivé avec la station lors de notre première campagne). Comme nous le verrons, ces câbles sont également indispensables pour immerger les corps morts des deux stations. Pour éviter toute torsion des câbles due aux rotations de la station anémométrique et de la balise, des émerillons (pièces de jonction rotatives montées sur roulement à billes) réalisent les différentes connexions.

3. Description des instruments de mesure

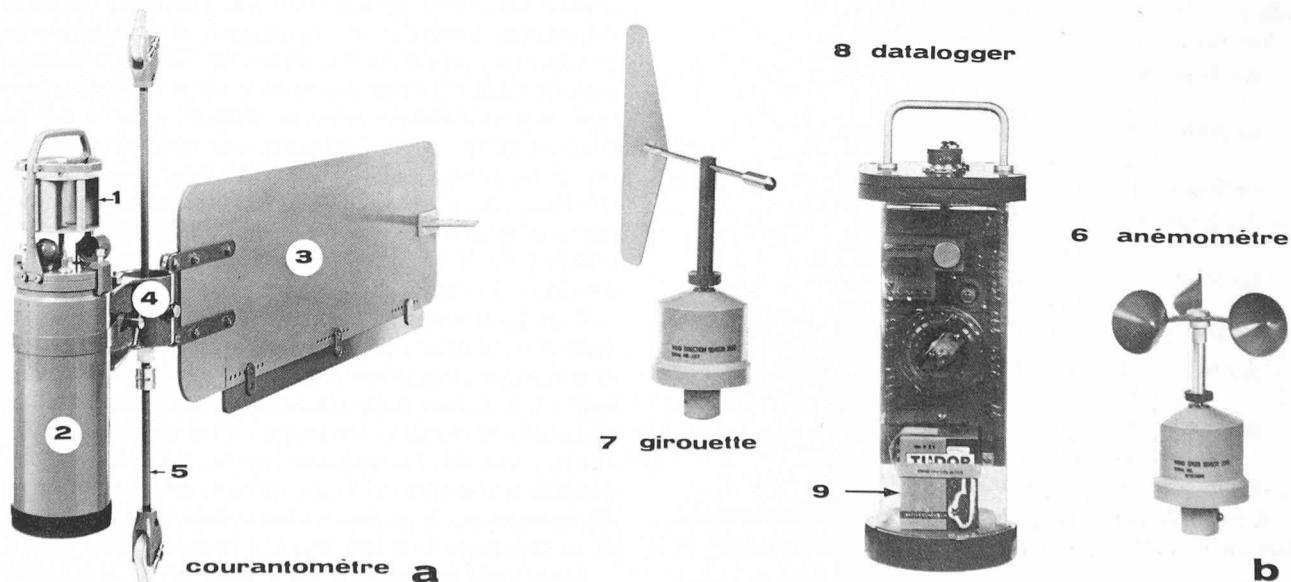
Les instruments de mesure utilisés pour cette campagne expérimentale à longue échéance devront être choisis parmi ceux déjà bien commercialisés et ayant fait leurs preuves. Ce n'est qu'après de longues investigations auprès des marchés spécialisés nationaux et étrangers que nous avons opté pour des instruments norvégiens, par analogie aux recherches entreprises avec succès sur le lac de Constance par le Dr E. Hollan [1]³ que nous tenons ici à remercier pour ses conseils judicieux. Le LHYDREP a ainsi fait l'acquisition, auprès de la maison Aanderaa Instruments (Bergen, Norvège), d'un matériel électrique qui comprend :

- a) cinq courantomètres enregistreurs entièrement autonomes ;
- b) trois anémomètres, une girouette et un compas magnétique avec leur appareil d'enregistrement séparé (data-logger).

a) Les courantomètres (cf. fig. 3a)

Les courantomètres Aanderaa (RCM, modèle 4, série n°s 2300 à 2304 avec capteurs de pression 1223) travaillent

³ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.



sur le principe du rotor à hélices dont le nombre de rotations permet de déterminer la vitesse horizontale du courant (le résultat est une moyenne obtenue par comptage électronique des révolutions du rotor pendant un cycle de mesures). Le courantomètre est constitué de deux parties principales : le bloc enregistreur (avec son rotor (1)⁴ et son boîtier (2) contenant toute l'électronique) et l'empennage (3). L'empennage solidement fixé au bloc enregistreur s'aligne avec le courant, dont la direction est alors donnée par un compas magnétique logé dans le boîtier. Pour désolidariser le courantomètre des mouvements de son câble de suspension, celui-ci repose en équilibre sur une rotule parfaite (4) suspendue à un arbre d'arrimage (5) (l'arbre peut ainsi osciller de $\pm 27^\circ$ sans influencer l'horizontalité de l'axe du courantomètre). Pour chaque courantomètre on dispose de cinq canaux d'enregistrement — deux sont utilisés pour la vitesse et la direction du courant, un pour la température et un pour la pression. Le canal restant est libre dans notre cas, mais peut servir à une autre mesure (par exemple celle de sa salinité). Le bloc enregistreur est alimenté par une batterie et le réglage des cycles de mesures commandé par une montre à quartz, les intervalles pouvant varier de quelques minutes à un jour selon le sélecteur choisi.

Toutes les mesures sont collectées et traduites électromécaniquement, grâce à un encodeur, en signaux binaires, enregistrés sur bande magnétique de 1/4". Ces signaux sont simultanément transmis à la surface par un émetteur acoustique dont les ondes peuvent alors être captées par un hydrophone qui peut rendre compte de la bonne marche du courantomètre. Celui-ci peut être utilisé jusqu'à des profondeurs de 2000 m ; il permet de mesurer des vitesses de courant comprises entre 2,5 et 250 cm/s avec une précision de $\pm 2\%$ et donne la direction à $\pm 5^\circ$ près pour des courants moyens (entre 5 et 100 cm/s) et à $\pm 7,5^\circ$ près pour des courants faibles (< 5 cm/s) ou forts (> 100 cm/s).

b) Instruments de mesure du vent (cf. fig. 3b)

Les trois anémomètres (WSS 2219) (6) sont constitués chacun d'un rotor à trois coupelles, formant les sommets d'un triangle équilatéral, dont le nombre de révolutions pendant le cycle de mesure est compté électroniquement. Au moment de la mesure les données sont transmises au datalogger sous forme digitale, puis le compteur se remet

⁴ Les chiffres entre parenthèses se réfèrent à la figure 3.

automatiquement à zéro. Ce qui est transmis est donc une forme intégrée de la vitesse du vent en fonction de la longueur de la colonne d'air qui a passé pendant l'intervalle de temps séparant les deux mesures. Ces anémomètres sont sensibles à des vitesses de vent supérieures à 25-30 cm/s et mesurent l'intensité du vent avec une précision de 2 %.

La girouette directionnelle (WDS 2053) (7) est constituée d'un petit empennage triangulaire fixé à un bras pivotant autour d'un axe vertical. Un compas magnétique, couplé avec l'empennage, se bloque au moment de la mesure en indiquant la direction relative du vent par rapport à la station, qui est alors transmise en signal compatible au datalogger. Grâce au silicone fluide remplissant l'espace entre le pivot et sa couverture plastique, la girouette est très sensible, s'alignant dans la direction de vents même très faibles (jusqu'à 30 cm/s), mais s'opposant aussi à de trop brutales variations de direction. La précision des mesures est de $\pm 5^\circ$.

Dans notre cas, pour obtenir la direction réelle du vent, il faut orienter la station anémométrique par rapport au Nord. C'est pourquoi la girouette est également couplée à un autre compas magnétique indépendant. Au moment de la mesure, girouette et compas se bloquent ensemble et le restent jusqu'à ce que les deux paramètres aient été enregistrés.

Le datalogger (DL1 à 12 canaux) (8), logé dans un des containers de la station anémométrique, est relié aux cinq instruments par des câbles gainés introduits dans le mât ; étanche et compact, il permet d'effectuer des mesures *in situ* sans alimentation électrique, celle-ci étant pourvue par une batterie autonome (9). Le datalogger dispose de 12 canaux d'enregistrements. Pour nos mesures, nous n'en utiliserons que cinq : trois pour les vitesses du vent (à trois niveaux différents), un pour la direction du vent et un pour l'orientation de la station anémométrique. Ces paramètres traduits sous forme de signaux binaires sont enregistrés sur bande magnétique de 1/4". Les cycles de mesures sont enclenchés à intervalles réguliers grâce à une montre à quartz.

4. Mise à l'eau de l'installation expérimentale⁵

En accord avec les pouvoirs publics préalablement informés de nos objectifs, nous avons décidé, pour de multiples raisons, de débuter notre campagne expérimentale dans le secteur lausannois du lac.

Les premiers emplacements se situent :

— Au large de Morges :

au point $\begin{cases} X = 149,18 \text{ km} \\ Y = 528,28 \text{ km} \\ Z = 75 \text{ m} \end{cases}$

exploré du 1^{er} février au 28 février 1977

— Au large de Saint-Sulpice :

au point $\begin{cases} X = 148,07 \text{ km} \\ Y = 531,23 \text{ km} \\ Z = 199 \text{ m} \end{cases}$

exploré du 1^{er} mars au 25 avril 1977

— Au large de Lausanne (Ouchy) :

au point $\begin{cases} X = 148,68 \text{ km} \\ Y = 538,39 \text{ km} \\ Z = 293 \text{ m} \end{cases}$

exploré du 16 juin à la mi-août 1977

A partir de là nous déplacerons l'installation expérimentale en suivant approximativement un tracé bouclant le

⁵ Un film intitulé *Premières campagnes de mesure des courants dans le Léman* a été réalisé par notre Laboratoire.

Léman dans le sens des aiguilles d'une montre. Les mesures devraient d'abord être poursuivies en direction du Haut-Lac, puis progresser de l'embouchure du Rhône vers le Petit-Lac, en longeant les côtes françaises, pour revenir enfin en direction de Lausanne en suivant la Côte vaudoise.

Etant donné le nombre d'unités que compte l'installation expérimentale, les dimensions de la station anémométrique, son poids comme celui des corps morts, la mise à l'eau de cette installation constitue une opération délicate et de grande envergure. Longuement préparée par le laboratoire, cette opération nécessite d'une part une aire de travail importante, d'autre part des engins de levage puissants pour l'immersion des corps morts et la mise à l'eau de la station anémométrique (prise verticale : 10 m). Nous avons également voulu nous assurer le concours d'hommes expérimentés dans les travaux lacustres, pour travailler avec un maximum de sécurité. La Sagrave SA, mandatée pour l'exécution de cette opération, a mis à notre disposition un pousseur très maniable de 340 chevaux et un ponton de 18×9 m, équipé d'une pelle mécanique (dont la flèche maximum est de 14 m) et d'un treuil mécanisé à deux tambours. Le pousseur dispose d'un écran-radar d'une portée de 33 km, permettant de le positionner sur le site et d'aligner correctement les trois unités de l'installation expérimentale.

La première mise à l'eau de l'installation a eu lieu le 1^{er} février 1977 par beau temps calme (comme le prévoient les renseignements pris au Service météorologique fédéral). La veille, tous les éléments de l'installation et le petit matériel avaient été chargés sur le ponton, transférés du Bouveret à Lausanne-Ouchy, afin de limiter au maximum la durée de l'opération (dans de bonnes conditions, une journée doit suffire). Cette mise à l'eau s'étant déroulée correctement, nous répéterons systématiquement la même procédure à chaque déplacement.

Au début de l'opération, chacune des unités de l'installation expérimentale est disposée sur un secteur du ponton, pour qu'une équipe puisse y travailler indépendamment et sans danger (les montages et vérifications se font sur les deux longueurs du ponton, les mises à l'eau et immersions à partir de l'avant).

Pendant le voyage Ouchy-Morges, nous avons dû procéder, pour cette première mise à l'eau, au montage final de la station anémométrique exécutée en deux parties — fixation sur le mât des anémomètres, girouette, compas et empennage, connexion au datalogger, et vérification du bon fonctionnement du feu clignotant. Simultanément le premier câble d'ancrage est enroulé sur le treuil et la station courantométrique préparée. Pour le premier site les courantomètres ont été disposés aux niveaux suivants : $\sim 5,5$ m, 10 m, 20 m, 35 m et 55 m. Pour le second et le troisième site les positions des trois premiers courantomètres n'ont pas été changées mais celles des deux derniers étaient pour le second site de 84 m et 149 m, et pour le troisième site de 132 m et 255 m.

Tous les instruments de mesure avaient été vérifiés la veille et enclenchés à une heure très précise — le datalogger et le premier courantomètre simultanément puis les quatre autres à 30 s d'intervalle chacun, pour les reconnaître lors de futures vérifications acoustiques. Lors de chaque déplacement, une fois l'installation relevée, on doit procéder, pendant le transfert sur le site suivant, au renouvellement des batteries des feux, des courantomètres et du datalogger, et au changement de leur bande d'enregistrement.

Après avoir pris position sur le point prévu, le pousseur doit manœuvrer pour s'orienter suivant l'axe préalable-

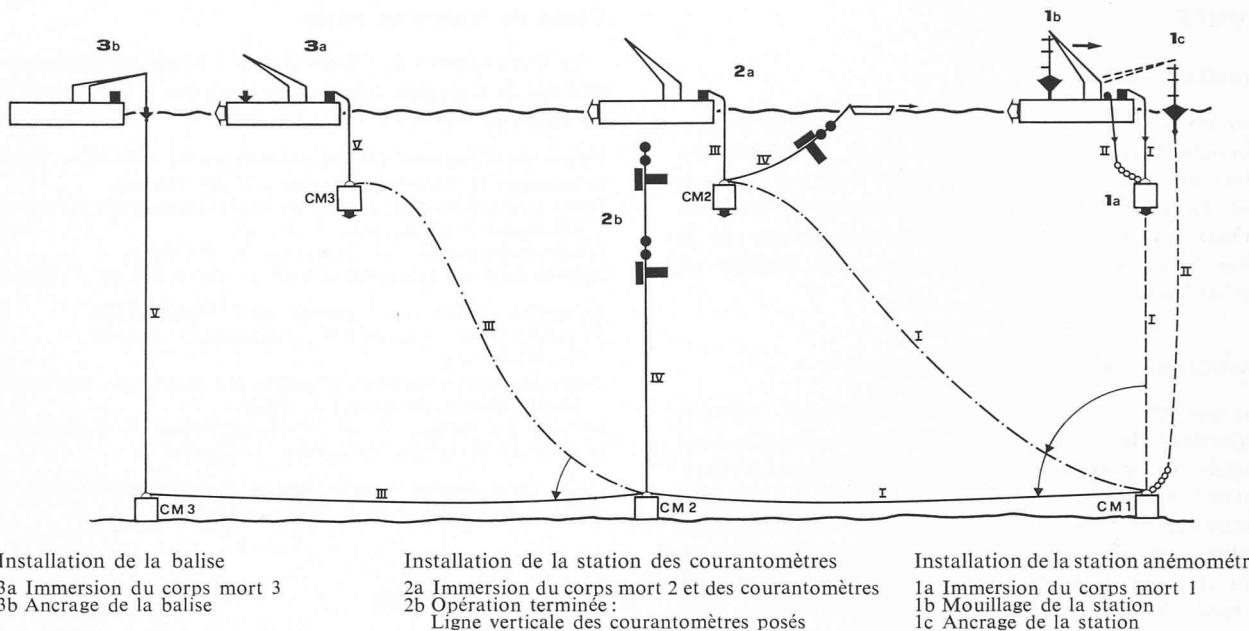


Fig. 4. — Etapes de la mise à l'eau de l'installation expérimentale.

ment choisi (d'après la carte au 1/25 000). Après avoir vérifié avec la sonde la profondeur du site, la mise à l'eau de l'installation expérimentale peut commencer. Le schéma de la figure 4 montre les trois étapes successives de cette opération :

- a) Installation de la station anémométrique ;
- b) Installation de la station des courantomètres ;
- c) Installation de la balise.

Chacune de ces étapes dépend de la suivante, puisque des câbles de fond relient les corps morts entre eux. Sur chacun de ces corps morts viennent s'accrocher deux câbles de 9 mm, dont l'un est utilisé pour son immersion. C'est pourquoi deux manœuvres sont particulièrement délicates : tout d'abord, pendant l'immersion du corps mort de la station anémométrique, on fera attention de ne pas laisser le câble libre s'enrouler autour de celui en tension ; ensuite, pendant l'immersion simultanée de la station des courantomètres et de leur corps mort, on se tiendra très éloigné du ponton (immersion des courantomètres depuis le canot) pour ne pas risquer d'emmêler le câble support des instruments aux deux autres câbles.

5. Résultats de ces premières expériences

Jusqu'à présent deux sites ont été visités : l'un au large de Morges, l'autre de Saint-Sulpice. Actuellement, l'installation est mouillée au large de Lausanne (Ouchy). Après les deux premières campagnes, nous avons pu constater que le principe général adopté est correct et que les instruments de mesure sont adaptés aux exigences d'expériences lacustres. Les premiers dépouilllements des enregistrements des courants et des vents montrent en effet la très grande sensibilité et les bonnes performances des instruments.

Cependant, après deux incidents, une des unités de l'installation (la station anémométrique) a subi quelques transformations : pendant la première campagne, le câble d'ancrage (de 9 mm en acier) de cette station s'est rompu après une tempête, avec des pointes de vent du sud-ouest dépassant

100 km/h. Cette rupture venait en fait d'une fausse manœuvre lors de l'immersion du corps mort de la station — pendant la descente, la chaîne s'est enroulée autour du câble de fond, bloquant ainsi l'émerillon et empêchant du même coup la station de tourner librement sur elle-même à la surface. En remontant le câble, on a d'ailleurs pu observer des « queues de cochon » caractéristiques, « ennemis mortels des câbles en acier », comme le note H. O. Berteaux [2]. La deuxième campagne a échoué à cause d'une rupture du mât inférieur, au ras du tuyau en PVC, due à la fatigue.

Nous avons donc corrigé certains détails dans l'opération de mise à l'eau et reconstruit la conception complète de la station anémométrique en prenant modèle sur la balise, qui donne toujours entière satisfaction. La version actuelle de cette station est présentée sur la figure 2b (en parallèle avec l'ancienne, 2a). On note que le mât support des appareils est haubané et que toute la coque est en tôle d'aluminium — le diamètre ayant été porté à 2,50 m à la ligne de flottaison. Signalons également que l'ancrage de la station à son câble est maintenant assuré au moyen de quatre chaînes attachées aux quatre raidisseurs qui renforcent la coque.

Avec cette nouvelle station anémométrique, notre campagne se déroule actuellement dans de bonnes conditions. Mais selon les circonstances et grâce à l'expérience acquise, nous saurons toujours adapter l'installation expérimentale à de nouveaux besoins.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) HOLLAN E. (1974) : *Strömungsmessungen im Bodensee* ; Sechster Bericht der Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein (AWBR).
- (2) BERTEAUX H. O. (1976) : *Buoy Engineering*, J. Wiley and Sons, Inc., New York — London.

Adresse des auteurs :

Jean-Patrick Prost, Sébastien W. Bauer,
Walter H. Graf, Henri Girod
Laboratoire d'hydraulique
de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne
rue de Genève 67, 1004 Lausanne