

Les courants dans une couche littorale du Léman: la zone de Vidy

Autor(en): **Lemmin, Ulrich / Graf, Walter / Perrinjaquet, Claude**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **113 (1987)**

Heft 18

PDF erstellt am: **20.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-76405>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Les courants dans une couche littorale du Léman : la zone de Vidy

par Ulrich Lemmin, Walter Graf et Claude Perrinjaquet, Lausanne

Résumé

Les mouvements d'eau proches de la rive nord du lac Léman (caractérisée par des profondeurs inférieures à 75 m) ont été étudiés à l'aide d'une série de courantomètres plongés dans la Baie de Vidy et sur le promontoire de Saint-Sulpice, entre octobre 1984 et mars 1985. L'analyse des observations (exposée dans la présente publication) montre que la circulation de grande échelle générée par le vent est composée d'une séquence de transports d'est en ouest et d'ouest en est parallèles à la côte. Le transport net sur la période observée fut faible.

Durant la stratification, qui dure jusqu'à la fin de l'année (fig. 2), des transports d'est en ouest ont fréquemment été observés. Pendant cette période, l'écoulement proche des limites du domaine étudié (les régions les plus profondes) suit les contours bathymétriques. Par contre, dans la Baie de Vidy, se forme une recirculation caractérisée par une rotation horaire (fig. 9).

Les épisodes de circulation vers l'est ont été observés chaque fois que le champ de vent était dominé par le «vent» (fig. 10). Les écoulements longent la côte en suivant les profondeurs. Cette circulation est également caractérisée par des courants d'est intenses dans la Baie de Vidy, qui ont ainsi pour effet de la «nettoyer». Fin février-début mars (quand les vents sont généralement faibles), la circulation peut être inexistante durant des périodes prolongées (fig. 4).

1. Introduction

La structure d'un littoral de lac est habituellement composée de baies, de caps et de promontoires. Lorsque l'on étudie les courants de grande échelle dans les lacs, la structure détaillée des côtes est ignorée, étant petite en regard des dimensions du bassin entier.

Néanmoins, des activités humaines sont concentrées dans les régions côtières, d'où l'importance de connaître la distribution des courants dans ces zones. Dans les lacs de grandeur comparable à celle du Léman, en particulier, les baies peuvent atteindre des dimensions telles que des structures significatives (d'un point de vue hydrodynamique) s'y développent. Dans de tels cas, le champ de courants n'est plus une simple extrapolation de la configuration des courants de grande échelle.

Cette étude fut entreprise afin d'examiner les courants de baie, ainsi que leur lieu, avec les mouvements de grande échelle. Dans ce qui suit, nous présentons un programme de mesures et une interprétation des données mesurées. Une analyse mathématique des données suivra plus tard.

2. La couche littorale dans le «système lac»

a) Aspects écologiques

L'utilisation intensive des ressources en eau d'un lac accroît l'attention particulière qu'il convient de porter aux déversements de matières biochimiquement actives, en raison des modifications qu'elles sont susceptibles d'apporter à l'équilibre de l'écosystème du lac. La plupart de ces matières, à caractère nutritif ou polluant, parviennent au lac par les cours d'eau ou par des conduites de rejet. Elles sont par conséquent déversées à proximité des rives dans la zone qu'on appelle scientifiquement la couche limite littorale. Les masses d'eau déversées dans le lac perdent rapidement leur élan initial. Leur répartition dans le lac dépend alors essentiellement des courants internes de ce dernier. Pour les conduites de rejet, cette transformation se produit sur des distances généralement inférieures à 100 m, ce qui favorise la déposition de matériaux particuliers dans la couche limite littorale. Lors de brassages importants du lac, ces dépôts peuvent être remis en suspension et transportés vers le large dans des régions plus profondes. Ce phénomène peut conduire à une augmentation des niveaux de concentration et, par conséquent, à une éventuelle modification de la production biologique ambiante. Puisque le mouvement de l'eau dans la couche limite littorale contrôle cette alternance de dépôt et d'érosion, l'étude de sa variabilité est d'une importance directe pour la détermination de l'état trophique du lac (l'équilibre des interactions biochimiques complexes à différents niveaux de la chaîne alimentaire dans le lac). La couche limite littorale fonctionne ainsi comme une zone tampon, dans laquelle des matériaux sont déversés, d'une part, et à partir de laquelle ils sont dispersés vers le large, d'autre part. La compréhension du comportement hydrodynamique de cette zone peut être utile à un meilleur aménagement des dispositifs de rejet et de pompage, en particulier.

b) Aspects hydrodynamiques

Le mouvement de l'eau dans un lac résulte principalement de l'apport énergétique des vents. Si un vent agit d'une manière constante et durant plusieurs jours sur une partie importante du lac, un mouvement d'eau à grande échelle peut s'établir de manière quasi permanente. Si

Abstract

The pattern of water movement near the north shore of Lake of Geneva—within less than 75 m water depth—was studied with an array of moored self-recording current meters between October 1984 and March 1985 in the Baie de Vidy—Saint-Sulpice area. The analysis of the observation (presented in this paper) shows that large-scale wind-induced water movement is composed of a sequence of events with shore-parallel transport to the east or to the west.

During stratification which lasts to the end of the year (Fig. 2) there exist frequently situations of westward transport. During these episodes flow follows the depth contours only at the lakeward (deep water) boundary of the study area; at the same time it forms a slow clockwise turning recirculation (Fig. 9) in the Baie de Vidy.

Episodes of flow to the east (Fig. 10) were observed whenever the wind field was dominated by "vent" winds from the south-west. These flows were shore-hugging, depth contour following, but did not exhibit the coastal boundary layer structure of a velocity reduction with decreasing distance to the shore. They produce strong eastward currents in the Baie de Vidy ("flushing").

In late February and early March, when winds remain low, water movement may cease for extended periods (Fig. 4).

l'apport d'énergie extérieure est interrompu durant une longue période, ce mouvement s'atténuera progressivement. Des périodes calmes de cette importance ne s'observent que rarement en automne, plus fréquemment vers la fin de l'hiver.

La couche littorale d'un lac est définie comme la région proche de la côte. Bien qu'il soit admis que les écoulements dans cette zone sont guidés par les mouvements à grande échelle et qu'ils suivent les lignes de niveaux du fond, certains processus comme le frottement sur le fond, la courbure de la rive et les vents locaux peuvent les modifier fortement. Dans la région littorale, le courant est une résultante de la superposition de toutes ces influences. Il est par conséquent parfois difficile d'identifier la contribution des composantes individuelles à l'allure générale du mouvement. La dynamique des courants dans la couche limite littorale est, de ce fait, un phénomène complexe, qui ne peut que rarement être décrit par les modèles standards. Cela implique l'étude spécifique de chaque région présentant un intérêt. Il n'est généralement pas possible de transposer des résultats locaux à d'autres régions de la couche limite littorale.

3. Précédents travaux

La présente étude de la dynamique des courants dans la couche limite littorale de la Baie de Vidy, qui a débuté à la fin de 1984, constitue une extension, vers la rive, de précédents travaux du Laboratoire d'hydraulique de l'Ecole polytech-

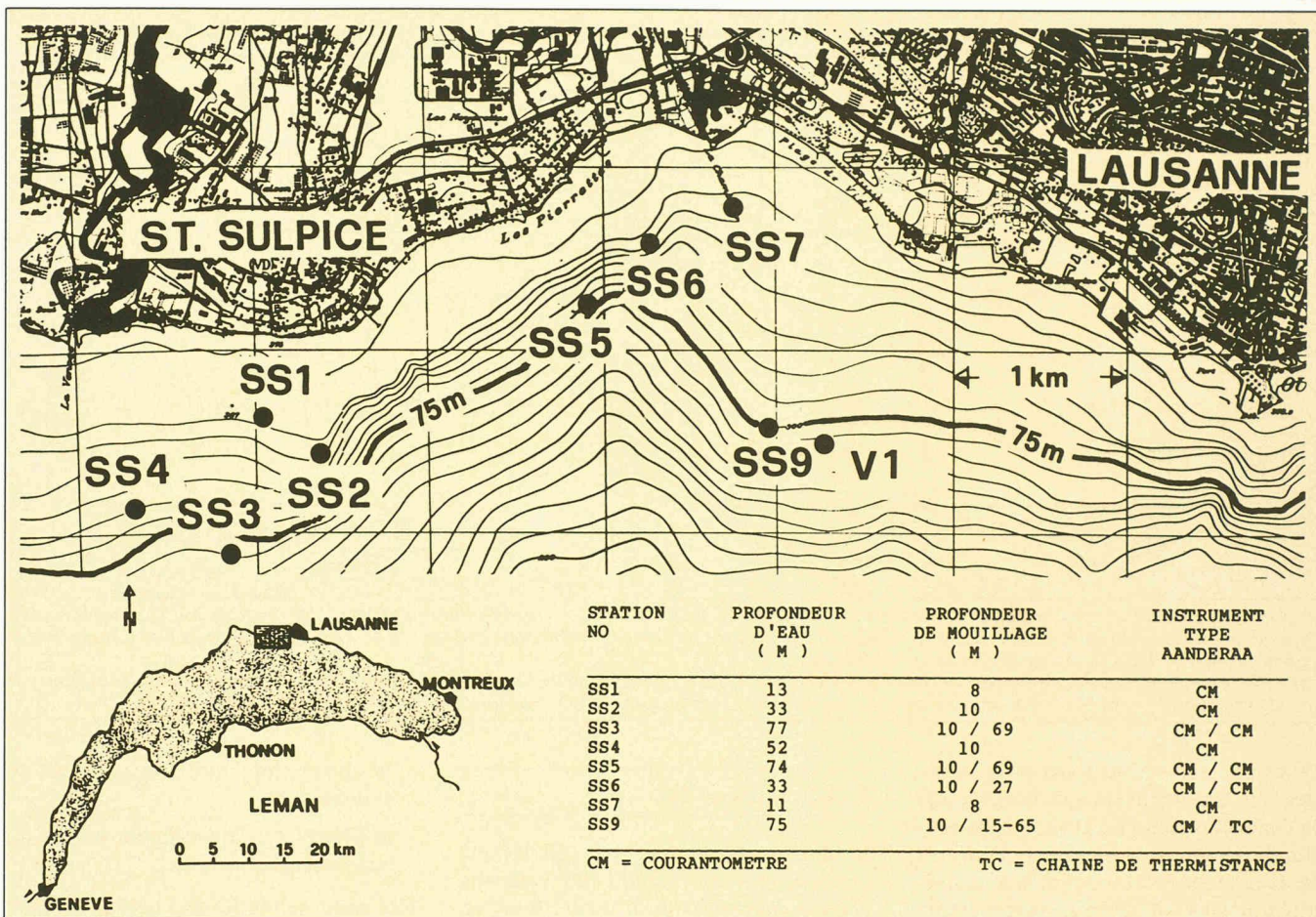


Fig. 1. — La Baie de Vidy (entre Ouchy et le promontoire de Saint-Sulpice). Configuration des mouillages pour l'étude de la zone littorale. La position de référence V1 est indiquée pour la comparaison avec les mesures faites en 1983/1984.

nique fédérale de Lausanne [1]¹. Des mesures de courants avaient déjà été effectuées à différents endroits, dans la zone profonde de la partie nord du Léman. Une campagne de mesures, réalisée en 1983/1984 [2] couvrait la zone située au large de la région ici concernée. Sur la base de ces trois séries de données, il est possible de dire si la présente étude est représentative ou non.

4. La campagne de mesures

Cette campagne de mesures a débuté le 23 octobre 1984 et s'est poursuivie jusqu'au 11 mars 1985. Des instruments autonomes, à enregistrement automatique (construits par Aanderaa Instruments Inc. à Bergen, en Norvège), ont été mouillés dans la région de la couche limite littorale nord du Léman représentée sur la figure 1. Les neuf emplacements de mesure et la profondeur de mouillage de chaque instrument y sont reportés. Les stations SS1 à SS9 ont été réparties dans deux zones distinctes, où les mesures ont été effectuées à des profondeurs comparables. Ces stations ont été distribuées de façon à permettre l'observation des courants aussi bien parallèles que perpendiculaires à la rive, à des profondeurs du fond comprises entre

13 et 77 m. A chaque station, un courantomètre a été installé à une profondeur approximative de 10 m; en SS1 et SS7, les instruments se trouvaient à 8 m sous la surface, en raison de la proximité du fond. Cette profondeur de 10 m se situe dans la couche dite d'Ekman, dans laquelle les mouvements de l'eau sont directement influencés par le frottement induit, pour des vents supérieurs à 5 m/s. En SS3, SS5 et SS6, des courantomètres supplémentaires ont également été installés à proximité immédiate du fond.

Un premier groupe de stations, SS5 à SS9, a été placé dans la Baie de Vidy. SS9 se trouvait dans une position voisine de la station V1 (indiquée sur la fig. 1) utilisée lors d'une précédente campagne. Cette proximité de SS9 et V1 devait permettre d'établir la comparaison entre les deux échantillons de données. Un second groupe de stations, SS1 à SS4, a été réparti devant le promontoire de Saint-Sulpice. Ces emplacements de mesure ont été distribués de façon à permettre la comparaison avec les écoulements dans la Baie de Vidy et à vérifier l'hypothèse selon laquelle les écoulements littoraux suivent les lignes de niveaux du fond.

La fréquence d'échantillonnage des instruments a été réglée à raison d'une mesure toutes les 30 minutes, exception faite d'une chaîne de thermistances supplémentaire installée en SS9, qui effectuait une mesure par heure.

5. La distribution de température dans la Baie de Vidy

La chaîne de thermistances de SS9 était équipée de sondes placées à intervalles réguliers de 5 m, entre 15 et 65 m de profondeur. Le profil vertical de température a donc pu être établi, ainsi que son évolution en période de stratification. Les valeurs moyennes journalières ont été calculées à partir des relevés horaires, car les fluctuations à plus court terme ne sont d'une importance que mineure pour la présente analyse. Ces valeurs ont été reportées graphiquement sur la figure 2a. Au début de la campagne, la stratification était établie de façon régulière sur les 50 premiers mètres; la différence de température entre 10 et 65 m de profondeur était de 7°C et le gradient de température entre 15 et 27 m correspondait à une diminution moyenne de 0,54°C/m. Durant la période de refroidissement, cette thermocline (couche d'eau lacustre, dont la température diminue rapidement avec la profondeur) a été détruite progressivement, en grande partie par convection verticale. Dans ce processus, la masse d'eau de surface est refroidie par échange de chaleur avec l'atmosphère. Elle devient par conséquent plus lourde que celle des couches inférieures et il en résulte un déplacement vertical à la recherche de l'équilibre des densités. La turbulence, résultant à la fois du refroidissement,

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

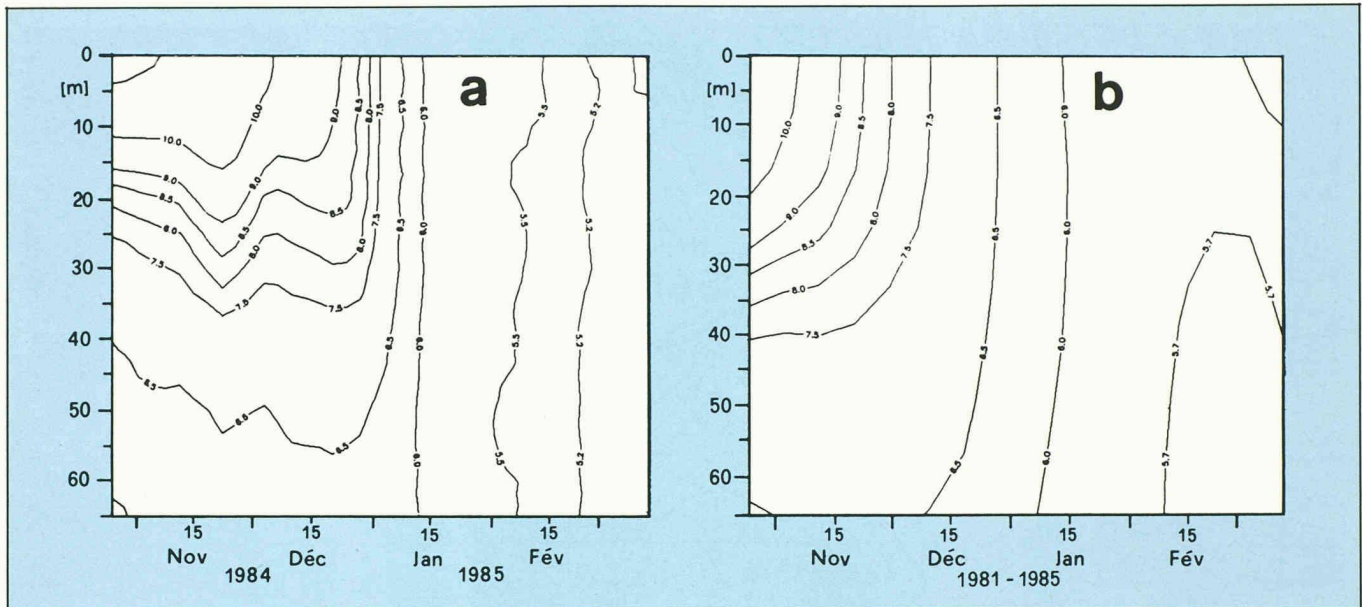


Fig. 2 a). — Lignes isothermes à la station SS9 entre le 23 octobre 1984 et le 11 mars 1985. La thermocline initialement bien développée à 25 m de profondeur disparaît peu à peu. Vers la fin de l'année, les 65 premiers mètres du lac sont devenus homogènes (environ 6°C). Le lac est ensuite resté bien mélangé et s'est refroidi jusqu'à 5,2°C à la fin de la campagne de mesures.
 2 b). — Structure moyenne des isothermes des années 1980-1985 dans les 65 premiers mètres, durant l'automne et l'hiver, à une station située au centre du lac. Une comparaison entre a) et b) montre que nos prélèvements sont bien indicatifs pour une moyenne à long terme.

dissement convectif vertical et du frottement lié aux mouvements horizontaux de l'eau, contribue à l'abaissement continu du niveau de la thermocline jusqu'à fin décembre. A cette période, la température du lac était devenue pratiquement homogène avec 6°C jusqu'à 65 m de profondeur. Le refroidissement du lac s'est alors poursuivi jusqu'à la fin de la campagne où la température a atteint 5,2°C. On admettra ainsi, en première approximation, que le lac n'était plus stratifié à partir de la fin de l'année 1984. Comparant le développement actuel de la déstratification (fig. 2a), présenté ci-dessus avec la moyenne des cinq années passées (fig. 2b), on constate une progression similaire dans les deux cas. Néanmoins, la température obtenue au printemps 1985 fut plus basse que la température moyenne des cinq dernières années.

6. Les vents du lac

La connaissance des vents du lac est importante pour l'étude des courants dans la couche limite littorale. Il est en effet possible, à partir d'un épisode de vent, d'établir un modèle empirique de calcul des courants littoraux. L'observation met en évidence que, à proximité de la rive, les courants résultent de la balance des forces dues aux vents locaux et du frottement sur le fond [3]. Il faut donc étudier en détail les caractéristiques des vents dominants. L'analyse sur le long terme des enregistrements de vent à Cointrin (près de Genève) [1] montre (fig. 3b) qu'il existe, dans le bassin lémanique, deux vents dominants dans la catégorie des vitesses supérieures à 5 m/s, à savoir :

- la «bise», qui souffle du nord-est au sud-ouest et
- le «vent», qui inversement souffle du sud-ouest au nord-est.

Ces vents se produisent le plus souvent en automne et en hiver. Ils peuvent se maintenir durant plusieurs jours sans grands changements de direction ni d'intensité, et leur fréquence d'apparition varie de façon aléatoire d'une année à l'autre.

Dans le but de déterminer si la ressemblance entre les vents moyens en 1984/1985 et les situations moyennes décrites plus haut est significative, une rose des vents séparée a été établie pour cette période (fig. 3a). Dans les deux diagrammes, l'orientation des axes principaux est identique. Néanmoins, l'influence de la bise est plus importante dans la présente étude. Afin de préciser cet aspect, les vitesses moyennes des hémisphères «bise» et «vent» furent calculées pour des périodes automne/hiver comparables, pour les cinq dernières années. La direction des vecteurs moyens ainsi que la vitesse moyenne dans le secteur «bise» (tableau) sont pratiquement les mêmes pour les années choisies. Par contre, la vitesse moyenne du secteur

Valeurs moyennes dans deux secteurs, pour la période d'octobre à mars, pour le vent à Cointrin.
 (Secteurs: 130°-310° nord = «vent» et 310°-130° nord = «bise».)

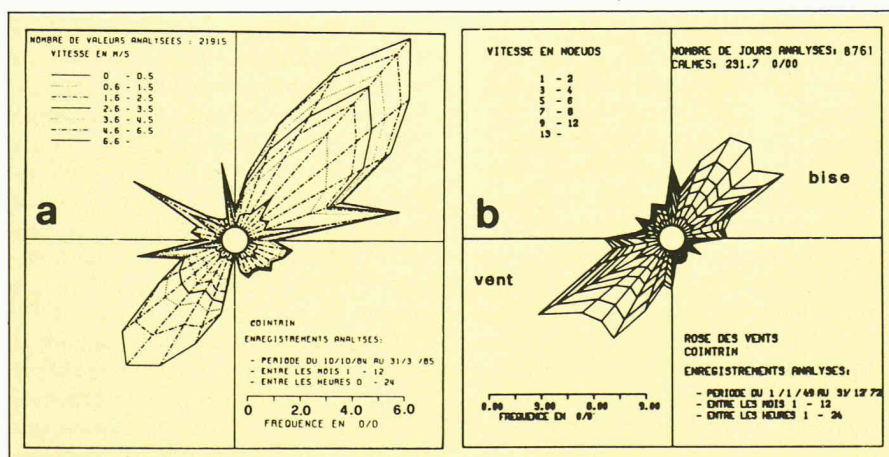


Fig. 3 a). — Rose des vents à l'aéroport de Cointrin pour la période étudiée (octobre 1984 à mars 1985). Les directions des vents doivent être interprétées comme «venant de». Pour la «bise» (du nord-est) et le «vent» (du sud-ouest), les vents les plus importants, les directions sont indiquées par des flèches différentes. On constate que l'orientation des vents soufflant durant la période étudiée est comparable à l'orientation moyenne à long terme. Néanmoins, les vents dans le secteur «vent» sont moins intenses durant l'automne/hiver 1984/1985.
 3 b). — Rose des vents à l'aéroport de Cointrin, moyennés sur 23 ans (1941/1971). N.B. : Entre a) et b), les échelles sont différentes.

Période	Secteur «vent»	Secteur «bise»
	vitesse en m/s	
1984/1985	1,63	1,99
1983/1984	2,27	2,84
1982/1983	2,39	1,82
1981/1982	2,42	2,11

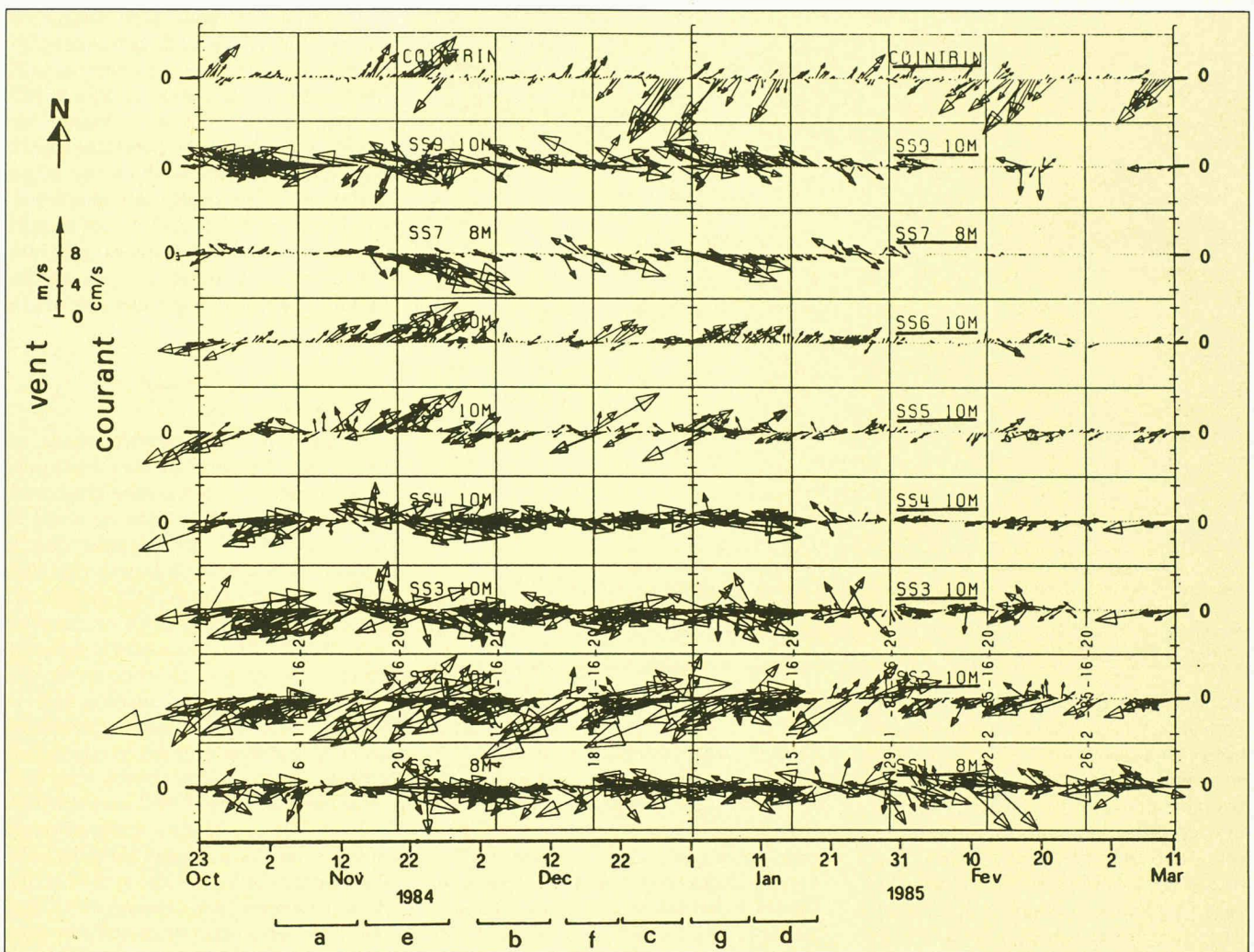


Fig. 4. — Visualisation des vecteurs courants (moyennés sur 12 h) pour toute la période de mesure, c'est-à-dire du 31 octobre 1984 au 11 mars 1985. Les vents à Cointrin sont également donnés dans la partie supérieure du diagramme. Les numéros des stations et la profondeur des instruments sont donnés sur chaque bande. Les périodes marquées de a à g sont commentées dans le texte.

«vent» est significativement plus petite pour la période 1984/1985 que pour les années précédentes. Dès lors, les mouvements d'eau liés aux situations de «vent» seront probablement moins prononcés pour la présente étude.

7. Les courants internes du lac

a) Techniques de mesure et d'analyse des données

Le principe utilisé par les courantomètres pour mesurer les vitesses de courant repose sur le comptage d'impulsions transmises par un rotor placé dans l'écoulement. Le nombre d'impulsions sur une période déterminée (30 minutes dans le cas présent) donne la vitesse moyenne durant ce laps de temps. Une information fiable est obtenue pour les vitesses de courant excédant 2 cm/s. Pour la présente analyse, des vecteurs moyens ont été calculés sur 3 h, 12 h ou 24 h de mesure.

L'ensemble des séries de vecteurs de courant a été rassemblé sur la figure 4. Il apparaît que les vitesses de courant ont tendance à diminuer après destruction de la stratification au début janvier, à l'exception toutefois de la SS1, proche de la rive. Vers la fin de la présente campagne,

les courants sont pratiquement tombés à zéro à plusieurs stations durant de longues périodes. Durant la stratification, plusieurs épisodes de forts courants d'ouest ont été enregistrés. Ces fréquentes variations de courants ont déjà souvent été observées par le passé (campagne LHYDREP 1978-1984).

Dans la série temporelle des mesures (fig. 4), des séquences ont été délimitées (a à g); elles seront discutées plus en détail ci-dessous. Ces séquences sont caractérisées par une belle constance des courants, en vitesse et en direction, durant plusieurs jours.

b) Distribution globale des courants

Pour chaque station, les vitesses moyennes de courants dans les hémisphères est et ouest ont été calculées sur l'ensemble de la période de mesure. Cette répartition paraît justifiée par le fait qu'à 10 m de profondeur les courants sont orientés de façon prédominante sur un axe est-ouest. Pour permettre la comparaison entre les différentes stations, ces vecteurs moyens sont représentés par des flèches sur la figure 5; ils donnent une image représentative du transport moyen dans les deux hémisphères. Il apparaît qu'au large, où le lac est profond (stations SS3 et SS9),

c'est le transport vers l'ouest qui prédomine, alors que près de la rive (SS1) et dans la baie (SS6 et SS7), la dominante est orientée vers l'est. En SS7, le vecteur est est environ 2,5 fois plus grand que le vecteur ouest. Aux stations SS2 et SS4, situées dans la zone à profondeur intermédiaire, et en SS5, le transport est approximativement équilibré. En SS3, les vecteurs moyens à 10 m de profondeur et ceux calculés à proximité du fond montrent les mêmes directions et la même dominante vers l'ouest.

Afin de permettre une comparaison plus détaillée entre les différentes stations de la présente étude, les enregistrements de la campagne 1984/1985 ont été représentés sous la forme de roses de courants, similaire à celle des roses des vents. Les classes de vitesses ont été choisies de façon à représenter les deux catégories inférieures à 2 cm/s et obtenir une information détaillée sur la distribution statistique des courants supérieurs à 2 cm/s. Les histogrammes des roses de courants (fig. 5) montrent que les courants de la couche limite supérieure (10 m) au large de Saint-Sulpice (SS1 à SS4) sont orientés, d'une façon prédominante, parallèlement aux courbes de niveaux du fond. On observe en outre une prédominance

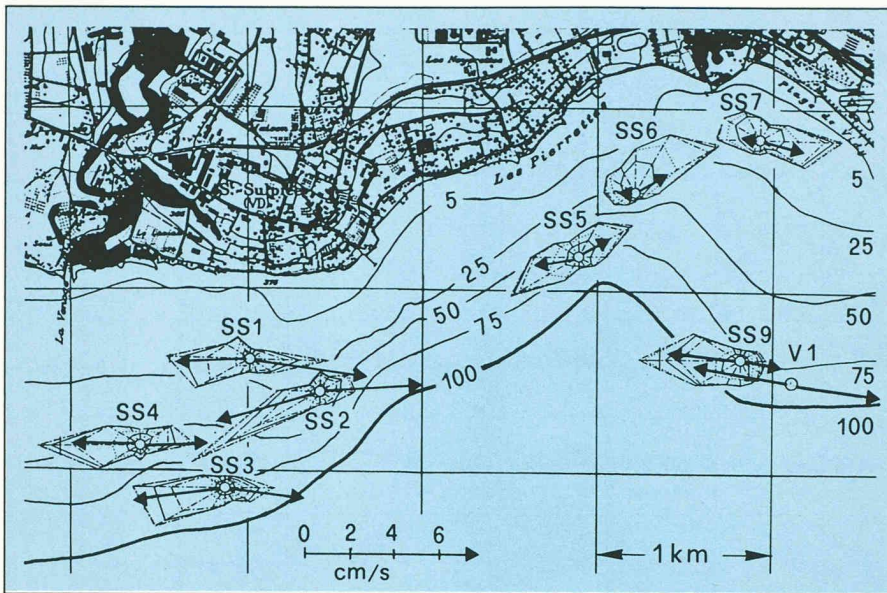


Fig. 5. — Représentation spatiale des courants moyens calculés sur la totalité de la période dans les hémisphères est et ouest séparément, et des roses de courants pour les mesures faites à 10 m de profondeur. Remarquez que l'orientation principale est parallèle à la côte avec les plus forts courants concentrés sur ces directions. Les courants vers la côte sont toujours plus faibles. N.B. : Les courants sont analysés comme « allant vers ».

bien marquée des courants orientés vers l'ouest. Cette tendance est moins prononcée à SS1, qui est la plus proche de la rive. Perpendiculairement à la rive, les courants en direction du large apportent une contribution plus importante à la rose des courants que ceux dirigés vers la rive. A la station SS4, on note l'apparition plus fréquente de courants inférieurs à 2 cm/s qu'aux stations SS1 à SS3. Quand bien même les stations SS2 et SS4 sont espacées de moins d'un kilomètre dans une direction approximativement parallèle à la rive et positionnées à des profondeurs similaires, leurs roses de courants respectives laissent apparaître des différences. Celles-ci mettent en évidence la variabilité des courants dans la zone proche de la rive, sous l'effet de phénomènes locaux.

Dans la Baie de Vidy (fig. 5), SS5 à SS9 présentent une plus grande variabilité dans l'orientation des courants. Ici également, les courants sont alignés de façon prédominante sur la direction des courbes de niveaux du fond. A SS5, la distribution est plus ou moins équilibrée entre les deux sens de l'orientation principale, cependant qu'on observe une prédominance très nette vers l'est à SS6 et SS7. Ce sens privilégié est contraire à celui remarqué aux stations SS1 à SS4. Une orientation vers l'ouest est également observée en SS9.

La comparaison des différentes classes de vitesses montre que les courants sont généralement plus faibles dans la Baie de Vidy (SS5 à SS9) que dans la zone de Saint-Sulpice (SS1 à SS4). On remarque en particulier que les points situés le plus à l'intérieur de la baie (SS5 à SS7) présentent une proportion plus élevée de courants nuls. En outre, la classe des courants non permanents compris entre 0,2 et 2 cm/s est plus importante à ces stations qu'à toutes les autres.

Les emplacements des courantomètres à SS3 et SS9, à 10 m sous la surface, dans une zone relativement profonde (75 m), sont considérés comme représentatifs des mouvements dominants du lac (fig. 5); ces instruments indiquent une orientation ouest durant la saison d'hiver. Les roses de courants montrent que, devant le promontoire de Saint-Sulpice, les courants suivent les mouvements dominants vers l'ouest. Dans la Baie de Vidy, en revanche, SS6 et SS7 mettent en évidence une circulation vers l'est. SS5 occupe une position intermédiaire entre ces deux régions.

Les roses de courants à plus grande profondeur (SS3, SS5, SS6) sont étudiées [4]. Les courants à proximité du fond sont dans une grande proportion inférieurs à 2 cm/s et par conséquent très intermittents. Des courants de fond orientés vers la rive n'ont pratiquement jamais été observés dans la baie (SS5, SS6).

Un autre mode de représentation de l'intensité des courants est proposé à la figure 6, où une distribution en classes de vitesses a été établie pour chaque station sur l'ensemble de la période de mesure. Ces histogrammes permettent de distinguer les stations où la fréquence d'apparition est plutôt concentrée sur la gamme des faibles vitesses de celles où les vitesses sont plus élevées. Dans les zones à plus grande profondeur (SS3 et SS9), ainsi que devant le promontoire de Saint-Sulpice (SS1, SS2, SS4), ce sont les vitesses supérieures à 2 cm/s qui dominent. On remarque en outre que la contribution des courants nuls décroît à l'approche de la rive (axe SS3, SS2, SS1). La grande proportion de courants nuls à la station SS9 est due essentiellement à la période calme de février et mars 1985. La comparaison entre SS3 et SS9 montre qu'à une même profondeur les courants sont généralement plus faibles au large ;

cette différence peut être interprétée comme une influence de la topographie. Dans la Baie de Vidy, les courants inférieurs à 2 cm/s dominent en SS6 et SS7. A cette dernière station, l'absence virtuelle de courants est constatée durant plus de 50% du temps. Pour une même profondeur, les courants sont plus faibles en SS5 qu'en SS3 et SS9, ce qui montre que, contrairement à ce qui est généralement admis, les courants ne suivent pas rigoureusement le tracé des courbes de niveaux.

c) Déplacement progressif de la masse d'eau

Le diagramme des vecteurs cumulés, ou « hodographe intégré », a été calculé pour chaque station et représenté graphiquement sur la figure 7. Dans ce mode de représentation, il est supposé que la vitesse est restée constante durant chaque période de mesure (3 h dans le cas présent) et qu'une parcelle d'eau au point considéré a été déplacée dans la direction enregistrée sur une distance correspondante. Le scénario du déplacement en ce point est alors obtenu sous forme de diagramme par le cumul des vecteurs successifs. Sur la courbe, chaque intervalle de temps d'une durée de 3 jours est délimité par des marques avec indication du nombre de jours depuis l'origine. Ces diagrammes donnent une bonne vision de la dynamique des courants en chaque point. Ils permettent de mettre une nouvelle fois en évidence un déplacement général vers l'ouest à l'exception de la zone intérieure de la Baie de Vidy (SS6, SS7), où le déplacement est orienté vers l'est. Il apparaît que les vitesses sont considérablement réduites dès la fin de la période de stratification, tombant pratiquement à zéro en plusieurs stations à fin février. Les mouvements les plus importants sont observés dans les zones profondes (SS3 et SS9); ils sont plus de deux fois supérieurs à ceux qui se produisent dans la baie.

La grande variabilité temporelle des déplacements est apparente sur ces diagrammes. Elle montre une nouvelle fois que la distribution des vitesses n'est pas homogène dans le temps et que les épisodes à forts courants sont répartis de façon aléatoire. A la station SS7 par exemple, les 73% du déplacement vers l'est sont réalisés en 22% du temps concerné, répartis sur deux épisodes. Par conséquent, le transport des matériaux qui seraient introduits dans le lac en ce point aurait un caractère extrêmement variable dans le temps. De telles conditions rendent impossible l'utilisation des modèles classiques de diffusion du panache, qui reposent sur l'hypothèse d'un état stationnaire.

Les déplacements d'ouest en est sont concentrés dans une bande étroite qui suit le contour de la rive. Ils ne peuvent en aucun cas être considérés comme partie intégrante d'un mouvement global de

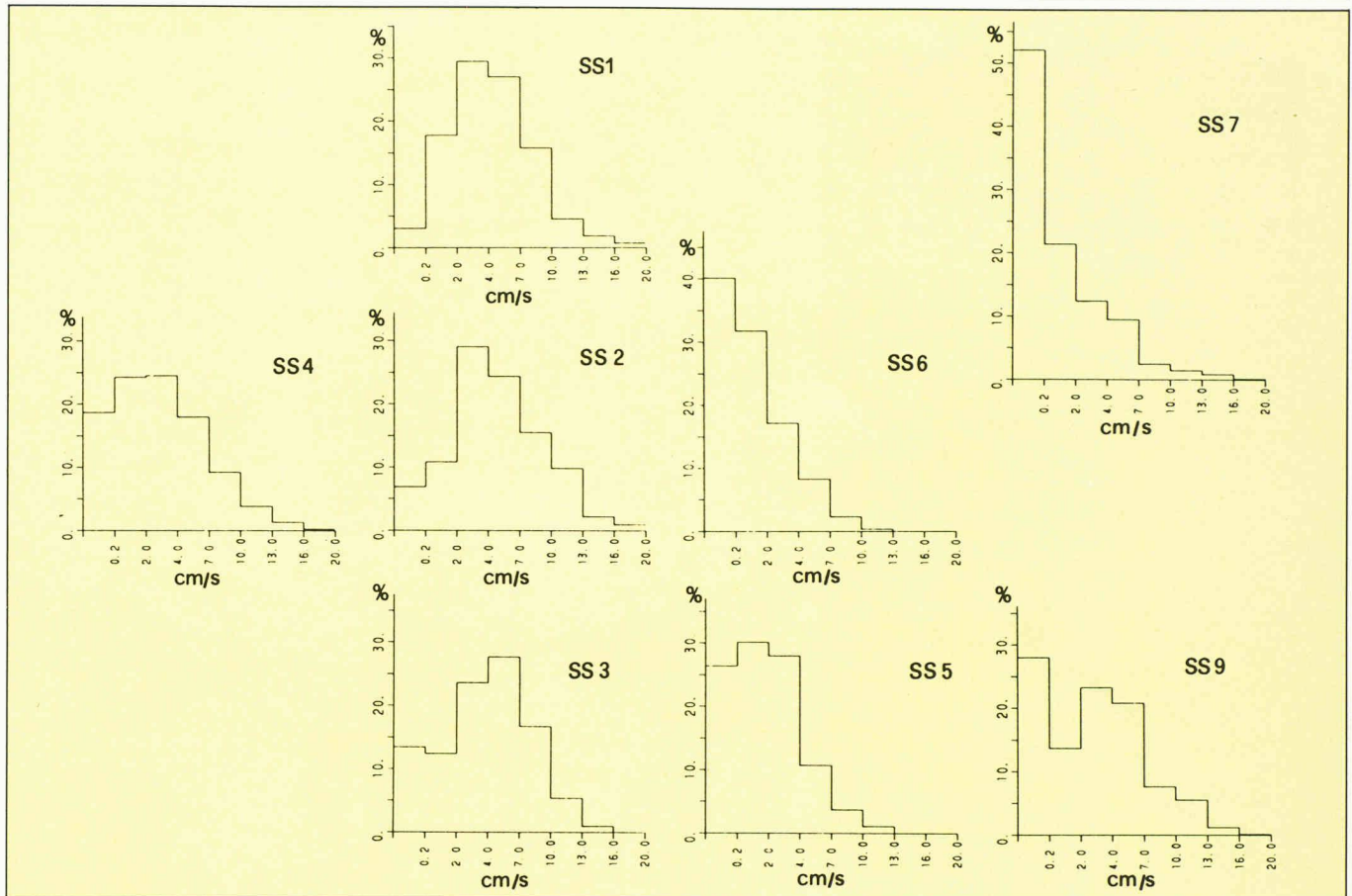


Fig. 6. — Histogramme des vitesses de courants à 10 m de profondeur pour toutes les stations. Les distributions ont été calculées à l'aide des données moyennes sur 3 h. Elles concernent la période du 23 octobre au 11 mars 1985.

la couche limite littorale guidé par la topographie du fond. Cette influence de la proximité de la rive apparaît nettement dans la comparaison des hodographes intégrés en SS1 et SS3. Les écoulements dans la direction opposée, soit d'est en ouest, sont bien établis en SS2 et SS3 (190 km parcourus) et, mieux encore, en SS9 (210 km). Ainsi, les déplacements vers l'ouest correspondent à un écoulement de couche limite en zone profonde, alors que les déplacements dans la direction opposée semblent être confinés à proximité de la rive. A la station SS5, les déplacements le long de la rive sont assez bien équilibrés entre les deux directions. Il existe par contre un mouvement épisodique en direction de la rive, qui laisse supposer l'existence d'une circulation d'est en ouest le long de celle-ci et d'une recirculation à l'intérieur de la baie.

d) Allure générale des courants lors d'épisodes quasi stationnaires

Dans le but d'expliquer les dominantes de la rose des courants (courants à grande échelle au large et recirculation dans la baie) et de comprendre la dynamique propre de la baie, les enregistrements de courants ont été analysés dans le détail. Il est apparu que, durant les périodes à faibles vitesses, aucune disposition générale ne peut être identifiée. Il existe par contre deux types de situations qui apparaissent fréquemment et persistent durant plusieurs jours. De tels événements se sont produits durant les épisodes a à g

de la figure 4. Ces épisodes, quand bien même ils ne sauraient être considérés comme la conséquence d'un état stationnaire de l'ensemble du lac, représentent néanmoins des situations quasi stationnaires dans le cadre de la présente étude. Un exemple de chacune de ces situations est discuté en détail ci-après.

- d.1) Courants d'est en ouest (fig. 8)

Il est possible d'identifier des épisodes à courants persistants vers l'ouest durant lesquels les variations de vitesse sont faibles en zone profonde (5 à 10 cm/s en SS9 et SS3) et où une direction parallèle à la rive se maintient durant quelques jours (fig. 4, épisodes a, b, c). Comme déjà mentionné plus haut, ces courants ne résultent pas d'une action directe du vent. Ils sont vraisemblablement engendrés par la stratification, d'une manière similaire à celle observée dans le lac Ontario. En SS6 et SS7, on observe parfois un léger courant de retour en direction est. Cette tendance peut être observée plus à l'ouest jusqu'à la station SS5. Dans le but d'illustrer ce type de situation, les vecteurs moyens calculés sur 24 heures ont été reportés sur la figure 8. La structure des courants ainsi visualisés se caractérise par un mouvement dominant vers l'ouest dans la zone profonde, mouvement qui entraîne une circulation interne dans la Baie de Vidy, dans le sens des aiguilles de la montre.

Comme il apparaît sur l'événement d de la figure 4, cette circulation peut rester stationnaire durant une dizaine de jours. Dans ce mécanisme, l'eau de la Baie de Vidy est déplacée vers l'est pour ensuite être transportée vers l'ouest par le mouvement dominant des zones profondes. Il n'est pas exclu qu'une partie de cette eau soit remise en circulation dans la baie ; les mesures à disposition ne permettent toutefois pas d'analyser ce phénomène plus en détail. Durant d'autres épisodes à courants persistants vers l'ouest, les vitesses étaient si faibles dans la baie qu'aucun écoulement de retour cohérent n'a pu être mis en évidence. Les courants dominants vers l'ouest ne peuvent par conséquent pas toujours être mis en relation avec une circulation dans la Baie de Vidy. Dans toutes les périodes à courants dominants vers l'ouest, les vitesses dans la baie étaient faibles, voire nulles, et rarement plus grandes en SS7 que le tiers de celles mesurées en SS9.

- d.2) Courants d'ouest en est (fig. 9)

A la station SS7, de forts courants d'ouest en est, persistant durant quelques jours, se produisent moins fréquemment et sur des durées plus courtes que ceux d'est en ouest. Les trois épisodes de ce type observés durant la campagne de mesures coïncident avec une situation de «vent» à Cointrin (fig. 4, épisodes e, f, g). La figure 9

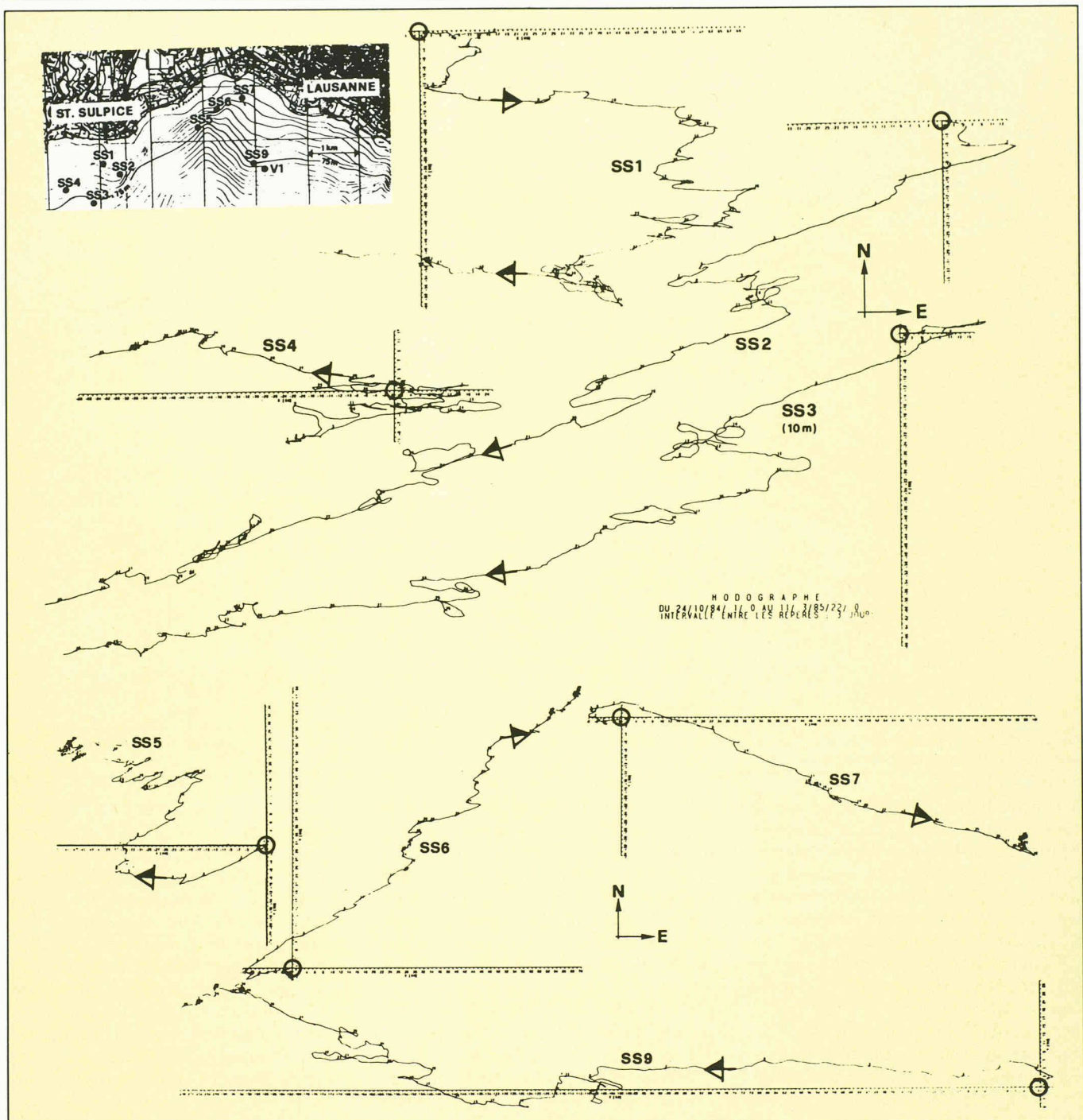


Fig. 7. — Hodographes intégrés de toutes les stations, calculés à partir des vecteurs moyens sur 3 h, entre le 21 octobre 1984 et le 11 mars 1985. Les croix indiquées sur les courbes marquent des périodes de 3 jours, qui sont numérotées de manière cumulée.

illustre une situation de flux vers l'est observée le 19 novembre 1984. Les vecteurs moyens sur 24 heures font apparaître des vitesses plus élevées à proximité de la côte (SS1, SS5, SS6, SS7) qu'au large (SS3, SS9). Il est vraisemblable que, dans une telle situation, la Venoge soit rabattue le long de la rive et diffusée dans la Baie de Vidy. L'allure générale des courants ne correspond cependant pas à un écoulement de couche limite de par le fait qu'il n'apparaît aucune diminution de vitesse à l'approche de la rive. Durant ces épisodes, les vitesses sur 24 heures en SS7 sont de l'ordre de 8 à 9 cm/s et peuvent dépasser 15 cm/s. Il en résulte un renouvellement complet de la baie en l'espace de 10 heures environ.

e) *Comparaison avec les mesures de courants de la campagne automne/hiver 1983/1984*

Les mesures de vents et de courants effectuées lors de précédentes campagnes ont été utilisées dans le but de déterminer le degré de représentativité de l'étude actuelle.

Durant la saison automne/hiver 1983/1984, des mesures de courants ont été effectuées dans la zone située plus au large de la Baie de Vidy. La station V1 la plus proche était située à proximité immédiate de SS9 (fig. 1).

Dans un but de comparaison, les vecteurs vitesses des hémisphères est et ouest ont été calculés en V1, comme précédemment en SS9. Les valeurs obtenues pour ces deux stations sont présentées dans la

figure 5, où il apparaît que les déplacements vers l'est et l'ouest sont assez bien équilibrés, mais plus importants toutefois en V1, en particulier en direction est, où la vitesse en V1 est deux fois plus élevée qu'en SS9. Afin de trouver une explication à ces différences, référence est faite aux vents moyens pour les deux années données dans le tableau. Considérant que la force de frottement exercée par le vent sur le lac est proportionnelle au carré de la vitesse du vent, il apparaît qu'en régime de «vent» cette force a été en moyenne deux fois plus importante en 1983/1984 qu'en 1984/1985. Etant donné, comme décrit plus haut, que les déplacements vers l'est peuvent être mis en relation avec les régimes de «vent», cela expliquerait la différence observée entre

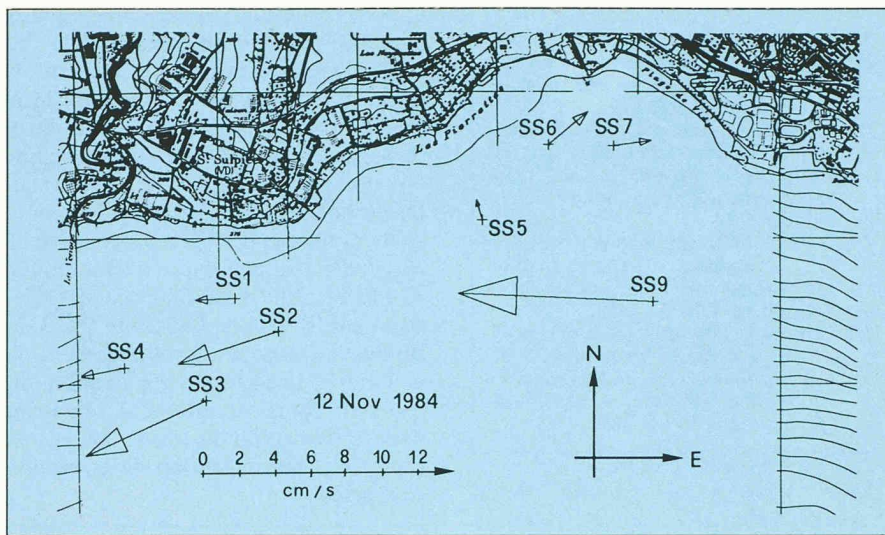


Fig. 8. — Configuration spatiale de tous les vecteurs courants pour l'évènement de flux d'est en ouest du 12 novembre 1984 (voir fig. 4, période a) en utilisant une valeur moyennée sur tout le jour. Les vecteurs moyens sur 24 h sont représentés à 10 m de profondeur. (Pour les courbes de niveaux voir fig. 1.)

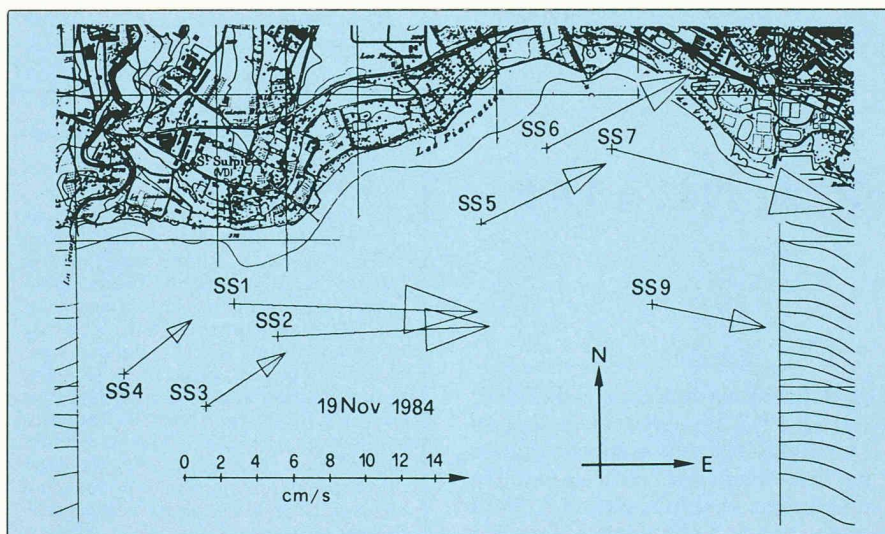


Fig. 9. — Configuration spatiale de tous les vecteurs courants pour l'évènement de flux d'ouest en est du 19 novembre 1984 (voir fig. 4, période e) en utilisant une valeur moyennée sur tout le jour. Les vecteurs moyens sur 24 h sont représentés à 10 m de profondeur. (Pour les courbes de niveaux voir fig. 1.)

1983/1984 en V1 et 1984/1985 en SS9. Les valeurs moyennes du secteur «vent» pour les deux périodes automne/hiver précédentes (1982/1983 et 1981/1982; tableau) sont du même ordre de grandeur qu'en 1983/1984. Bien que ces quelques valeurs ne soient pas suffisantes pour établir une signification statistique, elles indiquent néanmoins que des déplacements vers l'est plus importants que ceux observés en 1984/1985 ne sont pas rares. Considérant que les forts courants en SS7 ont été mesurés par un régime de «vent», il convient d'admettre que des situations caractérisées par un fort déplacement en direction est dans la Baie de Vidy (fig. 9) sont généralement plus fréquentes que celles observées lors de la présente étude.

8. Résumé et conclusions

L'étude de la couche limite littorale dans la zone Baie de Vidy - Saint-Sulpice a révélé un comportement hydraulique complexe, où les courants suivent fré-

quemment les lignes de niveaux du fond mais où des situations d'état stationnaire ne se produisent que rarement. D'une manière générale, le champ des courants ne peut être analysé à l'aide des modèles habituels de la dynamique des courants littoraux utilisés pour d'autres lacs. Des phénomènes de couche limite liés à la stratification tels que «upwelling» et «downwelling», ainsi que l'existence d'ondes internes, n'ont pas été identifiés par la présente étude. Bien que la modélisation de l'hydrodynamique de la Baie de Vidy semble difficile, il est toutefois possible d'arriver à une certaine compréhension des mouvements de l'eau par l'étude de situations quasi stationnaires. Deux situations de ce type, à caractère répétitif, ont pu être identifiées.

- La première correspond à un déplacement vers l'ouest dans les zones profondes (75 m; voir fig. 8 pour un exemple typique). Des épisodes similaires ont également été observés lors de la campagne 1983/1984 dans la zone

adjacente située plus au large. Etant donné qu'aucune influence directe de vent n'est à l'origine de ce mouvement, tout laisse supposer qu'il est le résultat d'une rotation à grande échelle dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, générée par des inhomogénéités horizontales de la densité. Durant ces périodes, l'eau au large (75 m de profondeur) se déplace vers l'ouest le long des isobathes, à une vitesse supérieure à 5 cm/s. Pendant le même temps, les déplacements à l'intérieur de la baie sont très faibles et parfois orientés vers l'est, dans la direction opposée au mouvement dominant. Cela signifie qu'une rotation interne (tourbillon) se produit à cet endroit.

- La deuxième situation d'état quasi stationnaire correspond à un courant orienté vers l'est, sous l'influence directe du «vent» soufflant du sud-ouest (fig. 9). Les courants les plus forts ont été observés à proximité de la côte et dans la Baie de Vidy, où des valeurs moyennes sur 24 heures, supérieures à 10 cm/s, ont été mesurées, suivant les isobathes. Seuls trois épisodes de ce type se sont produits durant la campagne 1984/1985, où les vents étaient plutôt faibles si on les compare à ceux des années précédentes. Il faut donc s'attendre que de tels épisodes seront plus fréquents en année «normale».

Du point de vue des processus biochimiques, de faibles courants ralentissent le renouvellement de l'eau et la persistance d'une telle situation favorise le développement de systèmes en quasi-équilibre. En outre, l'introduction concentrée de matériaux peut provoquer une accumulation locale. Des particules en suspension se déposeront très rapidement et il faut s'attendre à une sédimentation très forte à proximité de la zone de rejet. Les périodes à forts courants conduisent à un renouvellement complet des masses d'eau dans une région limitée et il est par conséquent important de connaître l'origine de l'eau de remplacement (par exemple: transports le long de la côte ou échange avec les zones plus profondes). Pour des vitesses de courants supérieures à 10 cm/s, des particules peuvent être maintenues en suspension, des flocons en particulier. Ceux-ci peuvent être détruits pour des vitesses de l'ordre de 15 cm/s.

Les données obtenues laissent apparaître de fréquents et brusques changements de direction entre les courants à 10 m de profondeur et ceux au voisinage du fond du lac. Il en résulte une tension de cisaillement entre les différentes couches. Près du fond, de forts courants ont été occasionnellement observés sur de courtes durées (plus de 10 cm/s en moyenne sur 3 h). Ils peuvent provoquer une remise en suspension des sédiments et leur transport à court terme. Ainsi le transport de

sédiments hors de la baie se produit par intermittence et par déplacements successifs.

L'hydrodynamique décrite est typique pour des périodes de faible ou inexistante stratification qui se produisent à la fin de l'automne ou au début de l'hiver. Une extrapolation des résultats décrits ici à une situation de forte stratification (été et début de l'automne) n'est pas possible pour les raisons suivantes :

- Durant l'été et le début de l'automne, le régime des vents est différent, en ce sens que la « bise » n'existe pas et le « vent » est habituellement beaucoup plus faible. Donc les forces engendrant les mouvements de l'eau sont fortement réduites et les vents forts n'ont lieu qu'en de courtes périodes associées au passage des fronts.
- Par le fait de la forte stratification, les mouvements de l'eau en dessus (épilimnion) et en dessous (hypolimnion) de la thermocline peuvent être couplés pour les ondes internes et non couplés

Bibliographie

- [1] GRAF, W. H. : « Hydrodynamics of the Lake of Geneva », *Schweiz. Z. Hydrol.*, 45/1, pp. 63-99, 1983.
- [2] BOHLE-CARBONELL, M. : « Hydrodynamique des lacs ; circulation interne du Léman », *Rapport Annuel 1984*, Laboratoire d'hydraulique EPFL, B15, pp. 1-7.
- [3] WINANT, C. D. and BEARDSLEY, R. C. : « A comparison of some shallow wind-driven currents », *J. Phys. Oceanogr.*, 9, pp. 218-220, 1979.
- [4] LEMMIN, U. ; PERRINJAQUET, C. ; GRAF, W. H. : *La couche limite littorale du Léman ; dans la zone de Vidy*, rapport scientifique interne, Laboratoire d'hydraulique EPFL, 1986.

pour d'autres phénomènes. Il en résulte habituellement de petits et intermittents mouvements d'eau en dessous de la thermocline (en dessous de 25 m environ).

Il a été montré que les mouvements de l'eau dans la zone de la Baie de Vidy - Saint-Sulpice sont déjà assez complexes

dans des conditions généralement mieux comprises de stratification faible ou nulle. Des informations concernant la forme du courant dans la région de la Baie de Vidy - Saint-Sulpice en présence de forte stratification ne pourront donc être obtenues qu'à l'aide de mesures faites durant cette période.

Cette étude fait partie du programme de recherche du Laboratoire d'hydraulique de l'EPFL. Elle a été financée partiellement par la Ville de Lausanne (M. J.-L. Boillat, du service d'assainissement de la Ville de Lausanne, en a assuré la direction). Nous voudrions le remercier pour la traduction du texte d'anglais en français et pour l'édition de la version française.

Adresse des auteurs :

Ulrich Lemmin
Walter Graf
Claude Perrinjaquet
EPFL - Laboratoire d'hydraulique
1015 Lausanne

Envasement et chasses dans la retenue de Verbois, de 1942 à 1985

par Jacques Bruschin, Lausanne

Le barrage de Verbois, situé à 12 km en aval de la Jonction (du Rhône et de l'Arve en ville de Genève), a été mis en service (partiel) dès 1942. Il s'agit d'un barrage au fil de l'eau, de 22 m de haut en chiffre rond, comportant 4 pertuis munis de vannes de fond et de clapets, prolongés en rive droite par le bâtiment de la centrale équipée de 4 groupes. La proximité du Léman et de son barrage de régularisation du Pont de la Machine, garantit un apport réglable d'eau exempte d'alluvions. L'Arve par contre, avec un bassin versant de 2000 km², très urbanisé dans sa partie aval, est source de crues relativement brutales, de déchets divers et d'alluvions comportant une proportion élevée de fins.

Il était dès lors à craindre que les apports « solides » de l'Arve ne provoquent un comblement progressif de la retenue, ce qui engendrerait un risque grandissant d'inondations en ville de Genève et mettrait en danger le bon fonctionnement des ouvrages.

Résumé

L'exploitation hydro-électrique du Rhône en aval de Genève et de l'embouchure de l'Arve a commencé en 1896, avec le barrage de Chèvres et sa retenue. C'est à cette époque déjà qu'a été soulevé le problème du comblement par les alluvions de l'Arve et des éventuelles conséquences néfastes - débordement des rives en ville - que cela pourrait avoir lors des crues. La solution proposée alors, et expérimentée avec succès, a été l'exécution de chasses par ouverture complète du barrage et remise du Rhône en état d'écoulement naturel. Cette expérience a été mise à profit après la construction du barrage de Verbois avec un égal succès, comme il est montré dans l'analyse des 14 chasses exécutées durant les quarante-cinq années écoulées depuis sa mise en service en 1942. Les principaux éléments de cette longue expérience ont été réunis et discutés en vue d'en tirer le meilleur parti.

Fondée sur l'expérience acquise dès 1896 par l'exploitation et la pratique des chasses au barrage de Chèvres (premier bar-

Sedimentation and flushing in the Verbois reservoir 1942-1985

The first run-of-the-river dam and its reservoir on the Rhone river downstream of Geneva and the Rhone-Arve junction was commissioned in 1896. The sedimentation problem and its evil consequences - overtopping of the river banks in the city of Geneva during the Arve floods - were already perceived at that time. The suggested solution was to flush the reservoir by lifting all gates and restoring the natural flow in the river. This procedure proved to be successful for many years and was therefore repeated with the same success at the much higher Verbois dam as soon as it was commissioned, forty-six years later. The new reservoir was flushed 14 times during the period 1942-1987. The data gathered are analysed and some new or improved operation rules are suggested.

rage en aval du lac, noyé dans la retenue de Verbois), une consigne prévoyant des chasses annuelles et la surveillance de 34 profils en travers disposés le long de la retenue (fig. 1) fut mise en œuvre en 1944. Cette consigne donnait également des

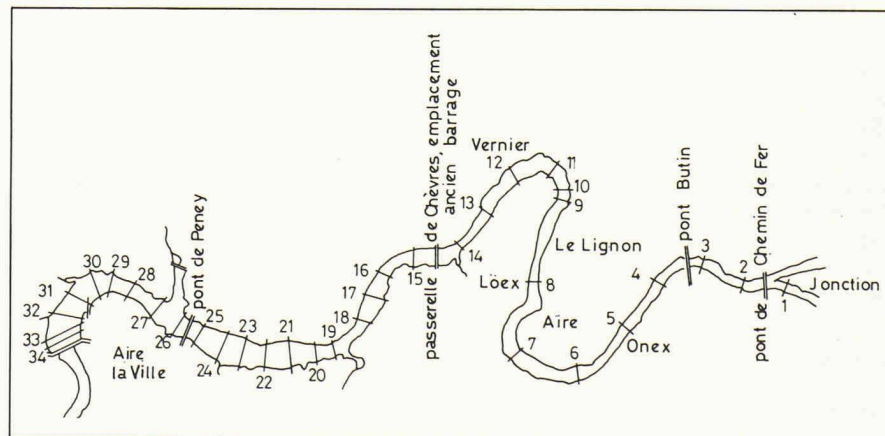


Fig. 1. - Retenue de Verbois - Plan avec profils en travers. Verbois reservoir - Contour at retention level and cross-sections.