
MODELISATION DES
COURANTS DE TURBIDITE
DANS LE BASSIN NORD DU
LAC DE LUGANO

RAPPORT DE SYNTHÈSE

Rapport n° 16-2001

Lausanne, décembre 2001

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL
INSTITUT D'HYDRAULIQUE ET D'ENERGIE
LCH – LABORATOIRE DE CONSTRUCTIONS HYDRAULIQUES

CH-1015 Lausanne
Téléphone: 021-693 23 85 Téléfax: 021-693 22 64
<http://lchwww.epfl.ch/>



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

RESUME

Les données limnologiques recueillies ces dernières années dans le lac de Lugano par le Laboratoire d'études environnementales de canton de Tessin permettent de décrire les tendances évolutives générales du lac. La forte stratification thermique qui s'installe durant la période estivale devrait être capable d'empêcher un échange vertical substantiel entre les eaux anoxiques profondes et l'hypolimnion oxygéné. Malgré cela la crue exceptionnelle du Cassarate de septembre 1994 a partiellement bouleversé l'équilibre des eaux hypolimniques du bassin nord du lac. Ce constat renforce l'hypothèse que les eaux chargées du Cassarate ont pénétré à différentes profondeurs du lac, en fonction de leur densité apparente.

L'affluent en crue est ainsi à l'origine d'une circulation interne susceptible de provoquer l'érosion des sédiments déjà constitués sur le fond, qui augmentent encore la charge solide et l'accélèrent davantage. Ce phénomène est connu sous l'appellation "courants de turbidité érosifs". Ces derniers, qui dépendent de la stabilité et de la consistance des dépôts sur les fonds sous-lacustres et de leur propre vitesse, peuvent se comporter comme de vraies avalanches. Ils mettent alors en mouvement de grandes quantités d'eau et peuvent parcourir des distances très élevées. Les équilibres chimiques lacustres peuvent ainsi être altérés lorsque de tels événements se produisent, raison pour laquelle leur impact sur l'écosystème mérite d'être étudié.

Les modèles "classiques" d'équilibre d'une colonne d'eau dans les lacs ne permettent pas d'expliquer le comportement de ce type de phénomène. Seul un modèle hydrodynamique numérique en trois dimensions est capable de simuler la circulation d'eau résultant d'une crue de l'affluent précité.

L'analyse des courants de turbidité à l'intérieur du lac s'appuie conjointement sur une revue de littérature, sur des mesures in situ de l'écoulement chargé de l'affluent et sur le fond du lac à l'embouchure ainsi que sur la simulation numérique des courants.

La modélisation numérique proposée est basée sur le code CFX-4 développé par Computational Fluid Dynamics Services et commercialisé par AEA Technology. Cet outil informatique permet la simulation tridimensionnelle d'écoulements turbulents à phase solide dans le lac de Lugano.

Parallèlement aux calculs numériques, une station de mesure a été installée sur le Cassarate à l'amont de l'embouchure et des chaînes de courantomètres ont été mouillées dans le lac. Pendant deux années consécutives, des campagnes de mesure ont ainsi été réalisées dans le Cassarate et le long de l'axe principal du lac de Lugano à Melide.

En plus de la crue de 1994, deux événements hydrologiques importants survenus en 1999 et en 2000 ont ainsi pu être modélisés. L'impact d'un événement hypothétique à caractère extrême a en outre été analysé.

Au travers de ce travail, des connaissances importantes relatives aux courants de turbidité dans un lac stratifié ont été acquises. Il a été possible de décrire avec précision le mouvement des courants et des sédiments à l'intérieur du lac, dans le cas d'une crue du Cassarate avec fort transport solide. Ces courants ont été suivis jusqu'à leur position finale dans le lac et leur influence sur les échanges verticaux entre les eaux profondes et superficielles a pu être estimée.

Finalement, des solutions techniques ont été imaginées pour réduire l'impact des crues du Cassarate sur l'écosystème du lac de Lugano. La solution pour réduire l'impact d'un événement de crue consiste à éviter le brassage induit par le courant de fond. La propagation de ce courant doit donc être freinée par la mise en place d'obstacles agissant comme dissipateurs d'énergie.

Une membrane perméable verticale positionnée sur le fond du lac à une distance de 70 m de l'entrée du Cassarate permet de réduire sensiblement les effets négatifs provoqués par le passage du courant de turbidité sur le fond du lac. Les vitesses verticales, à l'origine du mélange, sont fortement réduites et il est possible d'affirmer que la remise en suspension et le transport vertical d'éléments chimiques néfastes à la qualité des eaux du lac seront significativement moins importants.

1 INTRODUCTION

Les fortes précipitations de septembre 1994 sont à l'origine d'une crue exceptionnelle du Cassarate qui a transporté une grande quantité de matériaux d'origine minérale. Cet événement a également provoqué des altérations de l'équilibre physico-chimique du lac de Lugano, sous l'effet du brassage des couches profondes.

La conséquence de ces fortes précipitations a été une augmentation considérable du débit des affluents du bassin nord du lac. Le Cassarate en particulier a connu des débits moyens horaires de $70 \text{ m}^3/\text{s}$ entre 23:00 et 24:00 le 12 septembre et de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ entre 17:00 et 18:00 le 13 septembre. Pendant cet événement un débit maximum de $115 \text{ m}^3/\text{s}$ a été mesuré sur le Cassarate. L'introduction de cette crue dans le lac a provoqué un mélange des eaux hypolimniques du bassin nord, ce qui paraissait peu probable a priori en raison de la forte stratification thermique existant à cette période de l'année. L'hypothèse qui prévaut pour expliquer ce phénomène est que les eaux chargées du Cassarate se sont propagées à différentes profondeurs, selon leur densité apparente.

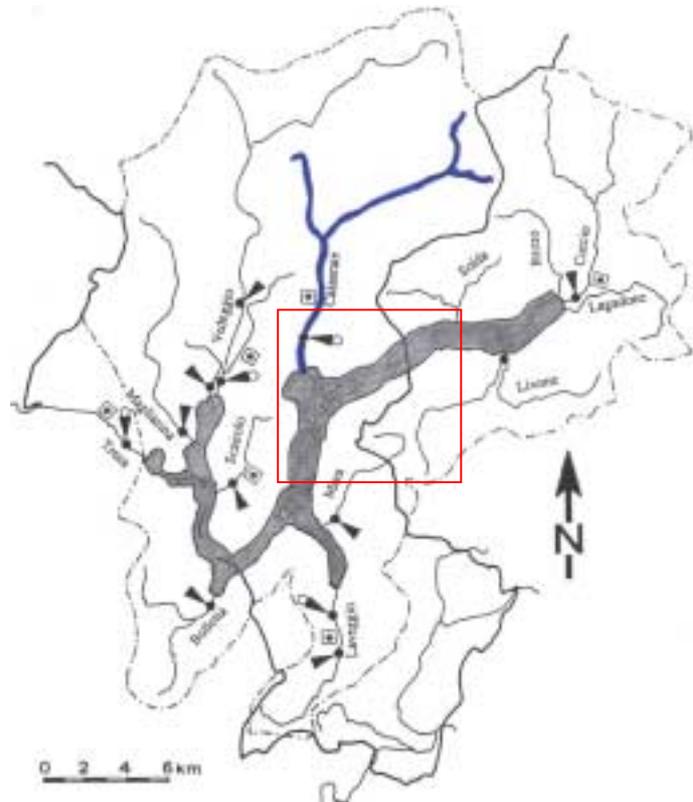


Figure 1.1 : Cours d'eau, stations de mesure et fenêtre d'analyse sur le bassin versant du lac de Lugano.

La crue exceptionnelle de 1994 a déclenché un processus un processus de mélange dans le bassin nord du lac qui a modifié considérablement la distribution verticale de la concentration d'oxygène dissout dans la baie de Lugano. Cette anomalie a persisté jusqu'à la circulation hivernale des eaux de surface coïncidant avec la fin de la stratification thermique. La comparaison des profils verticaux de la température mesurés le 17 août et le 15 septembre montre que la crue a provoqué un réchauffement de l'eau dans la couche située entre 25 et 150 m de profondeur, avec une inversion thermique à 75 m environ. Un changement radical de la distribution verticale de l'oxygène dissout apparaît clairement entre le 17 août et le 17 septembre ; en particulier dans la couche comprise entre 25 et 65 m de profondeur où la concentration passe de 6 mg/l à environ $2,5 \text{ mg/l}$.

Les modèles classiques d'équilibre d'une colonne verticale d'eau ne permettent pas d'expliquer le comportement de l'événement de septembre 1994. Seul un modèle hydrodynamique tridimensionnel est en mesure de simuler les circulations d'eau dans le lac dues à une crue du Cassarate. Le projet s'est ainsi appuyé sur l'application d'un modèle hydrodynamique complet en trois dimensions à l'évènement de crue observée par le LSA en 1994. Le logiciel a déjà été utilisé au LCH pour la simulation des courants de turbidité dans une retenue alpine dans le cadre d'une thèse de doctorat sur l'alluvionnement des retenues.

Lorsqu'un cours d'eau en crue arrive dans un lac, tous les sédiments érodés sur le bassin versant sont transportés jusqu'à ce que la capacité de transport hydraulique diminue suffisamment pour permettre leur sédimentation. La section d'écoulement dans le lac croît normalement de l'amont vers l'aval et la vitesse d'écoulement diminue rapidement par diffusion si la densité du fluide entrant est égale à celle du fluide ambiant. Il en résulte une réduction progressive des forces de transport des éléments solides en suspension et ceux-ci finissent par se déposer sur le delta selon un classement lié à leur granulométrie.

Lorsque la densité du fluide entrant est supérieure à celle du fluide ambiant, le premier poursuit son évolution comme un courant de densité. Ce phénomène a normalement lieu sous forme d'un courant de fond (underflow) si la densité ρ_c du courant est plus élevée que celle du fluide ambiant ρ_a . Le courant de densité peut également avoir lieu sous forme de courant de surface (overflow) si la densité des apports ρ_c est plus faible que la densité ambiante ρ_a . Il peut finalement se développer comme un courant intermédiaire (interflow) lorsque le lac est caractérisé par une forte stratification, d'origine thermique ou autre, avec des densités de l'eau ρ_{a1} et ρ_{a2} plus grande, respectivement plus faible que celle du courant (Figure 1.2). C'est essentiellement le premier type d'écoulement qui peut transporter de grandes quantités de matériaux fins vers la partie profonde d'un lac.

Un courant de turbidité est un courant de densité où le fluide en écoulement, plus lourd, est un mélange de densité ρ_m composé du fluide ambiant et de matière solide en suspension. L'intérêt porté aux courants de turbidité provient du fait qu'une partie très importante du débit solide d'un affluent se compose de matériaux fins ou très fins, provenant généralement du bassin versant, qui sont transportés en suspension dans l'eau.

Lorsqu'un cours d'eau se jette dans un lac, les matériaux restent en suspension tant que les vitesses sont assez grandes pour entretenir la turbulence nécessaire à leur transport.

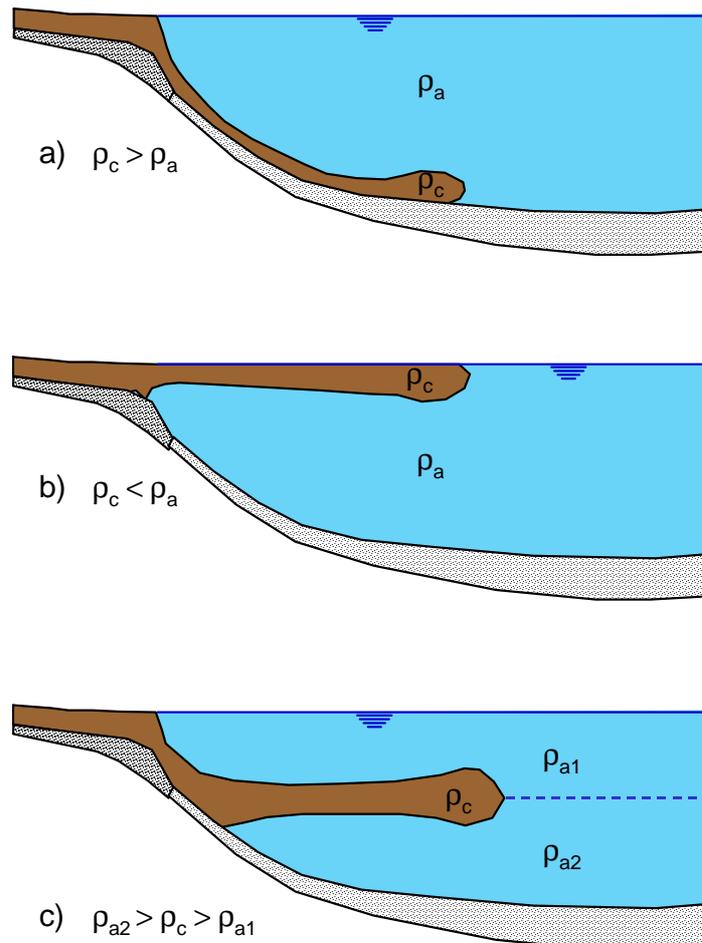


Figure 1.2 : Courant de densité dans un lac sous forme de courant de fond, de surface et intermédiaire.

2 DONNEES DE BASE

Les données nécessaires au calcul numérique sont constituées de la topographie, de la distribution thermique dans le lac au début de la crue et des hydro- et solidogramme dans le Cassarate lors de la crue, ainsi que de sa température.

La géométrie du lac a été construite en digitalisant les courbes de niveaux de la carte nationale suisse n°1353 à l'échelle 1:25'000. L'espacement entre les courbes de niveaux est de 20 m. L'utilisation d'un logiciel CAD et d'une tablette de digitalisation ont permis d'effectuer ce travail. La grille de valeurs ainsi obtenue est du type non structuré, c'est-à-dire que l'espacement entre les valeurs en abscisse et en ordonnée n'est pas constant dans tout le domaine.

Le passage à une grille structurée se révèle nécessaire pour l'application du modèle numérique CFX-4. Cette opération a été effectuée à l'aide du logiciel Matlab 5.3, très performant dans le domaine du calcul matriciel. La visualisation a été obtenue avec le logiciel Surfer.

Une image de la grille structurée générée est donnée à la Figure 2.1. Afin d'obtenir une grille très fine l'espacement constant utilisé sur x et y est de 20 m. L'interpolation utilisée est de type linéaire.

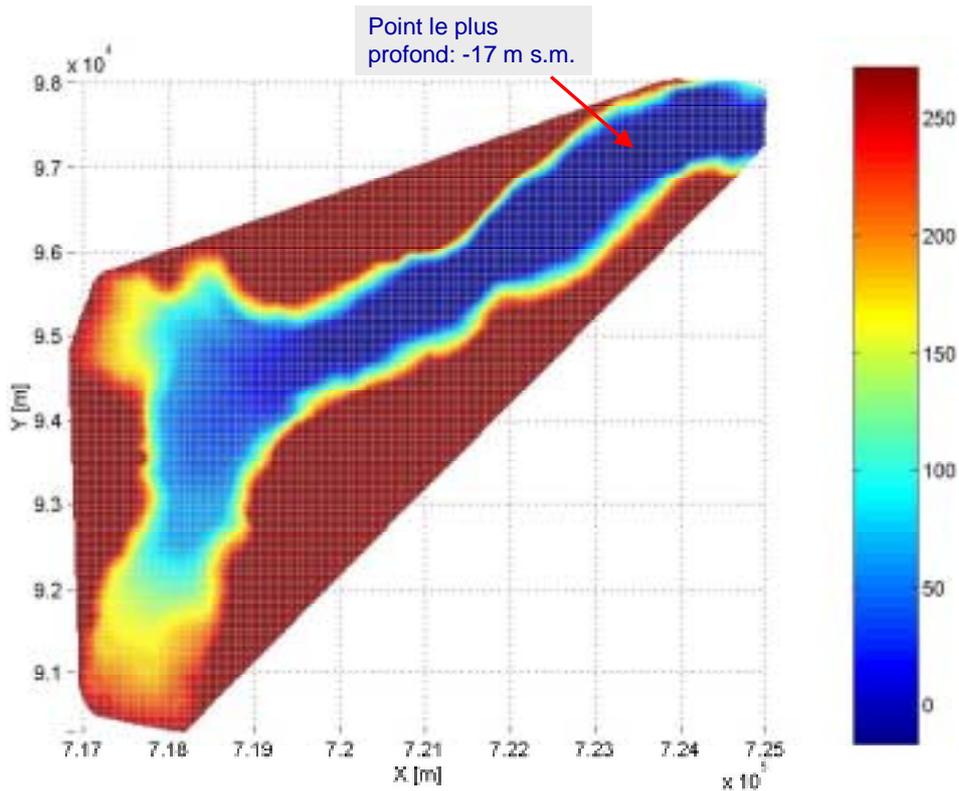


Figure 2.1 : Grille structurée du lac de Lugano.

Les données hydrologiques enregistrées pendant la crue d'octobre 1999 sont présentées dans le présent rapport à titre d'exemple. Une méthode d'approche polynomiale a été choisie pour modéliser les hydro- et solidogramme mesurés pendant l'événement de crue. La Figure 2.2 montre la superposition dans le même graphique de l'hydrogramme et du solidogramme ce qui permet de visualiser leurs positions temporelles respectives.

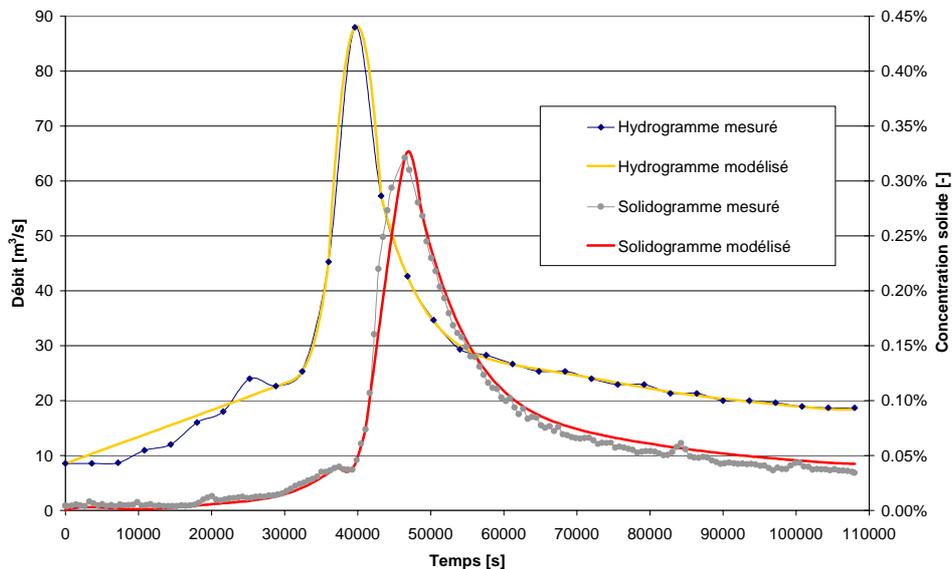


Figure 2.2 : Hydrogramme et solidogramme de crue (1999).

La température mesurée du Cassarate ainsi que son ajustement par une seule fonction polynomiale du 6^{ème} degré sont montrés à la Figure 2.3.

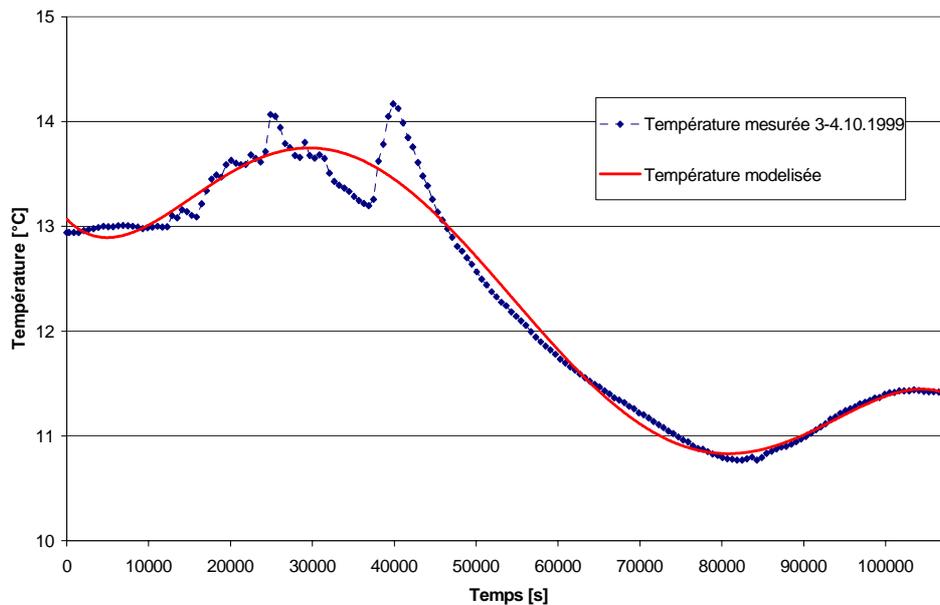


Figure 2.3 : Température mesurée et modélisée pendant la crue de 1999.

3 MODELISATION NUMERIQUE

Le modèle utilisé se doit d'être assez général pour pouvoir s'appliquer à un lac de géométrie quelconque. Il s'est ainsi avéré décisif de recourir à un modèle numérique général de la dynamique des fluides, qui permette la simulation des écoulements à au moins deux phases de densités différentes, le transport de grandeurs scalaires et l'introduction de la stratification thermique dans le lac. Le choix s'est porté sur le code numérique CFX-4, développé par le Computational Fluid Dynamics Services de Harwell (UK), et distribué par AEA Technology. Ce modèle permet la modélisation tridimensionnelle des écoulements fluides dans une géométrie quelconque. Il a été largement testé dans les écoulements en 3D et appliqué avec succès à la simulation de courants de turbidité dans une retenue artificielle, induits par l'arrivée d'une crue.

Les équations implémentées par défaut dans CFX-4 sont données sous forme de flux. Il s'agit des équations standard de la mécanique des fluides, soit :

- la conservation de la masse ;
- la conservation de quantité de mouvement ;
- la conservation d'énergie.

La viscosité du fluide, la pression totale, les termes de conductivité thermique du fluide et d'enthalpie totale sont considérés.

Le domaine de calcul est défini par un maillage 3D constitué d'éléments prismatiques de taille irrégulière qui peuvent être déformés de manière à s'adapter à une surface géométrique quelconque, par exemple le fond d'un lac. Pour la résolution des équations de l'hydrodynamique, le maillage physique est transformé en un maillage orthogonal, appelé maillage de calcul. Une transformation inverse permet de ramener la solution sur le maillage physique à la fin du calcul.

Les équations hydrodynamiques de Navier-Stokes discrétisées sont résolues par une approche en volumes finis et les variables physiques sont toutes définies au centre des volumes de contrôle. Tous les termes des équations, sauf le terme de transport, sont discrétisés dans l'espace en utilisant des différences centrées du deuxième ordre. Pour le terme de transport, différents schémas d'advection sont disponibles.

Le modèle offre également la possibilité de résoudre plusieurs équations de transport-diffusion pour des grandeurs scalaires passives, telles que le transport de particules ou de sels dissous. Différents

modèles de turbulence sont également implémentés dans CFX-4, dont le modèle $k-\varepsilon$, considéré comme un standard largement répandu et validé.

Le maillage physique est fait d'éléments de taille irrégulière dans les directions x, y et z. Dans chaque direction, la grille peut être déformée de manière à s'adapter à une surface quelconque (body fitted grid).

Vu que le domaine doit être topologiquement rectangulaire, les bords du bassin ont été découpés des deux cotés ; le calcul s'effectue alors sur la partie du réservoir incluse dans cette enceinte.

Le maillage du bassin nord du lac de Lugano est présenté à la Figure 3.1. La coloration est graduée selon l'altitude du fond en m s.m. La surface du lac se situe à 271 m s.m. et le point le plus profond est environ -17 m s.m. Le nombre total de cellules dans le domaine est 195'750.

La taille des mailles est définie comme une progression géométrique dans la direction principale du courant, c'est-à-dire que les cellules de calcul sont plus fines près de l'embouchure du Cassarate et qu'elles s'agrandissent au fur et à mesure de l'éloignement de ce point. Même dans la direction verticale (z), la taille des cellules suit une série géométrique symétrique centrée vers les bords afin d'avoir des mailles fines près du fond et à une hauteur d'environ 30 m à partir du plan d'eau, c'est-à-dire dans la région de la thermocline.

Le calcul se fait à maillage immobile, aucune modification des coordonnées du domaine physique (fond, berges, plan d'eau) n'est introduite durant le calcul.

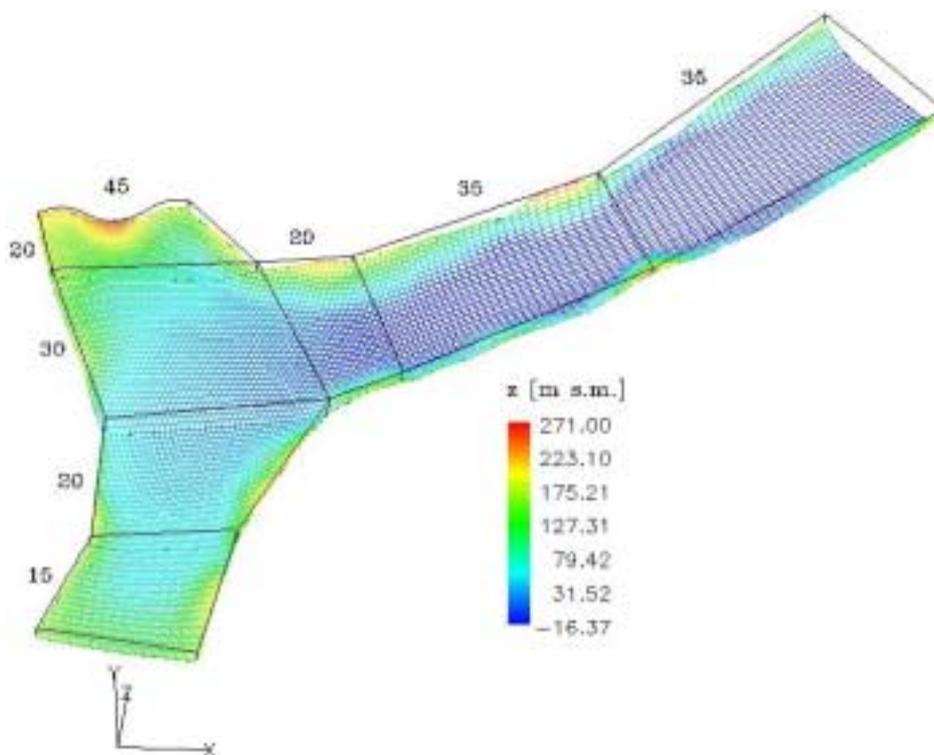


Figure 3.1 : Maillage du fond du lac.

4 RESULTATS

Courant de turbidité

Afin d'illustrer la quantité d'eau et de matières solides entrant par le Cassarate pendant la simulation, l'évolution du débit massique liquide et solide au cours du temps est présentée à la Figure 4.1. Les points d'analyse temporelle (A-F) utilisés pour suivre la progression du courant de turbidité sont également représentés pour se repérer facilement par rapport à l'évolution des débits liquide et solide.

La valeur maximale de débit massique liquide vaut 88'000 kg/s, celle de débit massique solide 393 kg/s. La valeur maximale de concentration solide en termes de masse vaut 0.45 %. Elle est supérieure à celle de concentration solide volumétrique (0.33 %) en raison de la densité des particules solides qui vaut en moyenne 2.65 fois celle de l'eau.

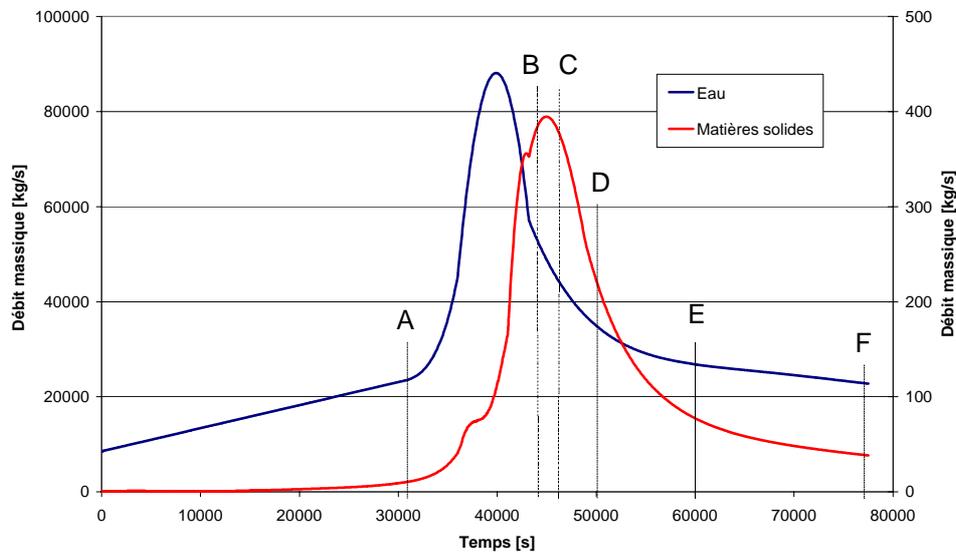


Figure 4.1 : Points d'analyse sur les courbes de débits massiques (crue 1999).

Les images de la Figure 4.2 montrent la progression du courant de turbidité au cours du temps aux instants A-F précités. Les surfaces sont caractérisées par une valeur constante de concentration en matières solide de $1 \cdot 10^{-5}$ et sont colorées en fonction de la profondeur.

Ces résultats suscitent les commentaires suivants :

- A. Intrusion du courant dans la thermocline à une profondeur de 15 m.
- B. Progression latérale et longitudinale du courant intrusif.
- C. Le courant du Cassarate dépasse la couche de gradient thermique et plonge sur le fond du lac.
- D. Le courant de turbidité progresse le long du talweg. Le point le plus bas du courant de turbidité se trouve à une profondeur de 230 m.
- E. Le courant de turbidité progresse vers la partie est en direction de Gandria. Le front se trouve à une profondeur de 276 m. Le courant intrusif a atteint les bords latéraux du domaine.
- F. Le point final de la simulation montre que le courant de turbidité a atteint la profondeur maximale de 280 m et que le courant intrusif reste stable.

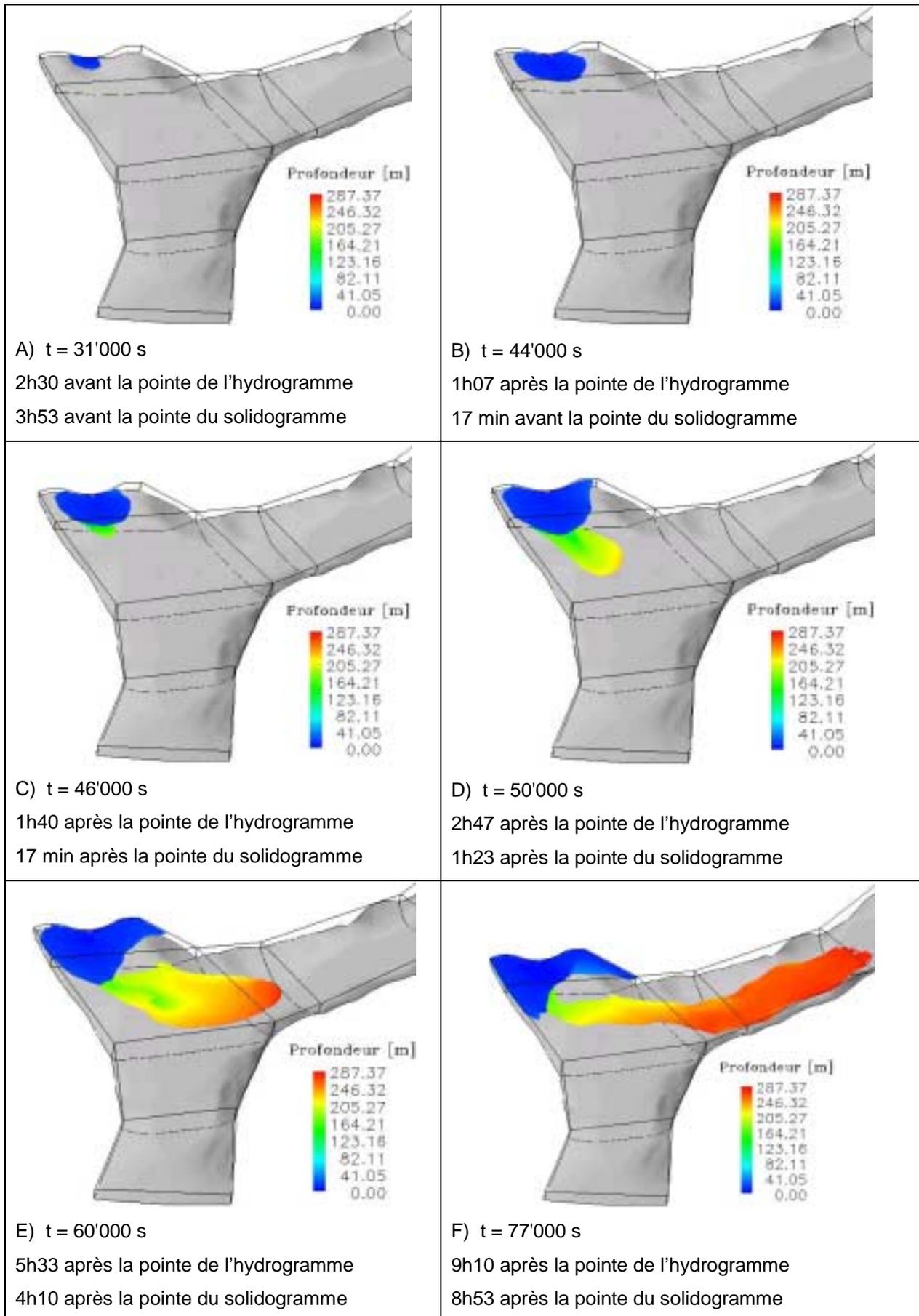


Figure 4.2 : Isosurfaces de concentration solide (10^{-5}). Evolution temporelle (crue 1999).

Une vue en plan du courant de turbidité sur le fond du lac au temps $t = 60'000$ s est montrée à la Figure 4.3. La fonction scalaire qui colore la surface est la concentration en matières solides. L'interface entre la surface et la zone à concentration solide nulle est bien visible. La zone colorée en rouge possède des concentrations solides de valeur plus grande ou égale à 1.0×10^{-4} .

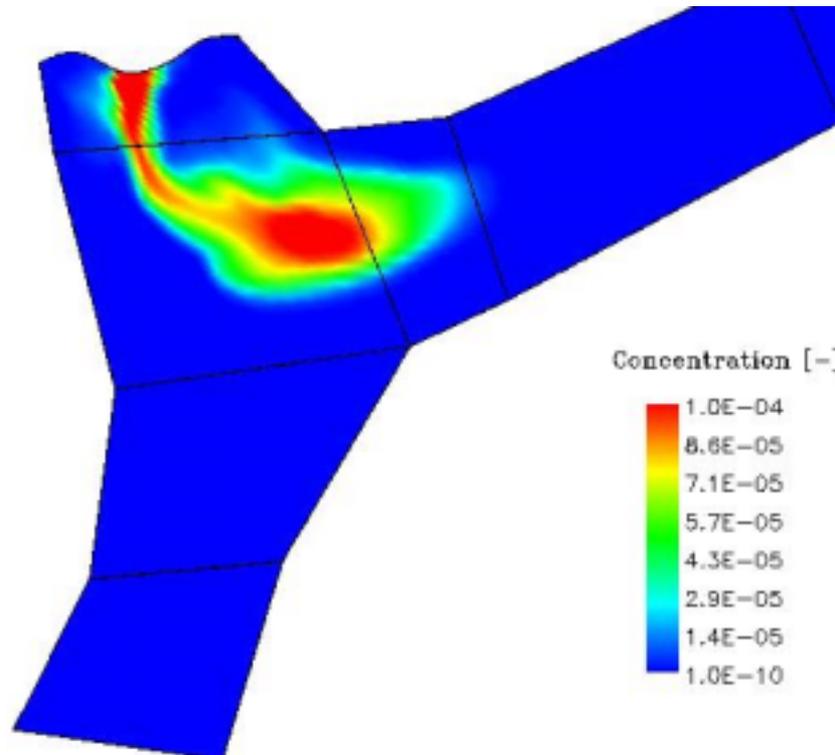


Figure 4.3 : Vue en plan de la concentration solide sur le fond du lac à $t = 60'000$ s (crue 1999).

Une coupe longitudinale dans le plan de l'écoulement principal du courant de turbidité montre l'intrusion dans la région située au-dessous de la thermocline (Figure 4.4).

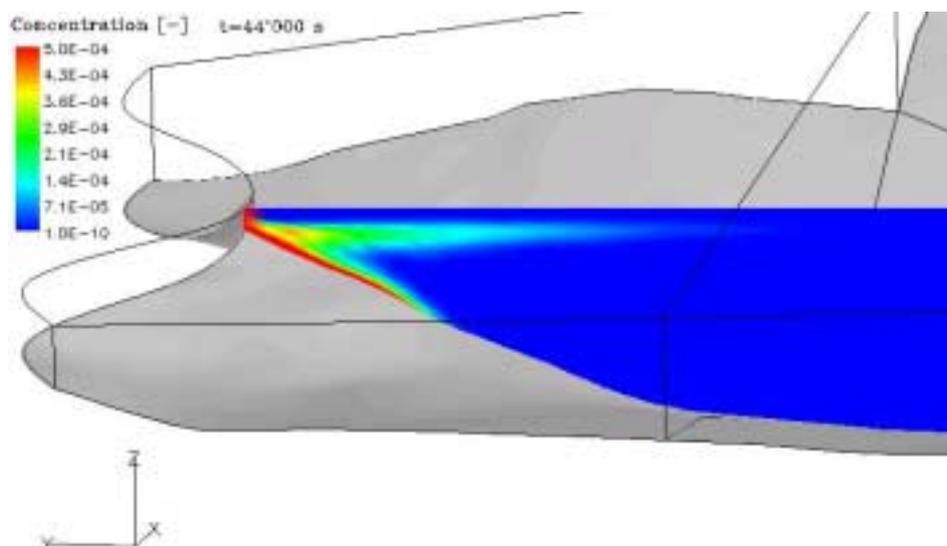


Figure 4.4 : Courants intrusif et de fond dans le plan longitudinal à $t = 44'000$ s (crue 1999).

Le courant provenant du Cassarate franchit la couche de gradient thermique et se propage le long du talweg du lac. Le front se trouve à une profondeur de 90 m et à une distance de 155m de l'entrée du Cassarate. Un zoom sur le front du courant descendant le long du talweg est présenté à la Figure 4.5. Les lignes de contour représentent des isolignes de concentration solide.

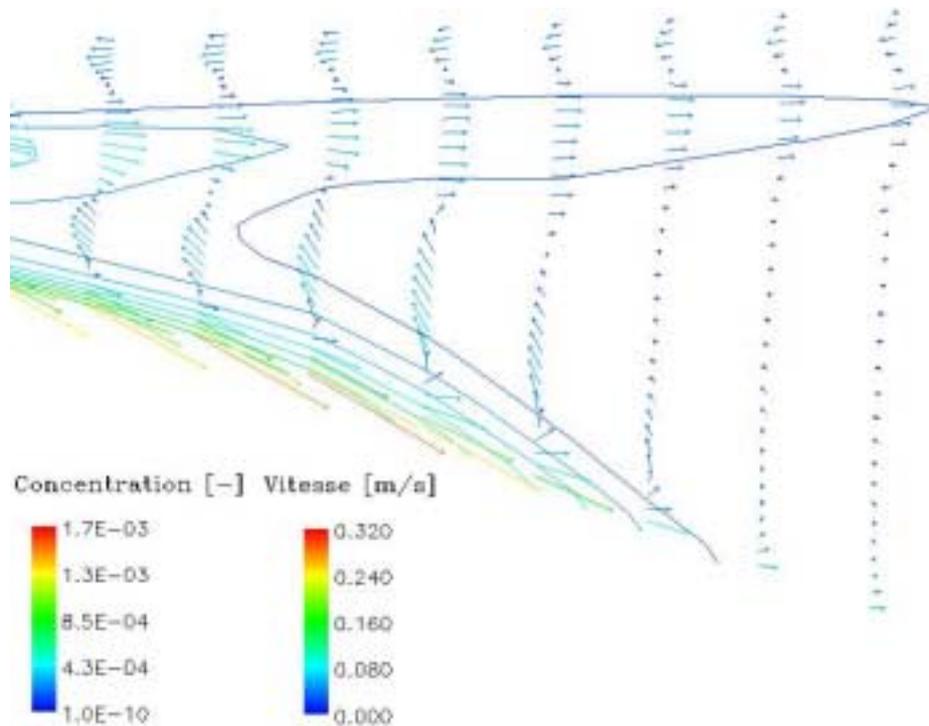


Figure 4.5 : Isolignes de concentration et vecteurs vitesse sur le front du courant à $t = 44'000$ s (1999).

La valeur de la vitesse du front se situe entre 10 et 15 cm/s tandis que celle du courant à l'amont est de 25 à 30 cm/s.

Les caractéristiques des courants intrusif et de fond sont analysées en détail dans deux plans transversaux P1 et P2 (cf. fig. 7.9 au §7.2.3 du rapport final) appartenant au premier bloc du domaine. L'intersection entre le courant de fond et les plans précités se trouve à une distance de 105 m, respectivement 325 m, de l'entrée du Cassarate.

Une analyse globale est entreprise dans les plans précités, dans le but de déterminer à quel moment de la simulation le courant de fond atteint les valeurs maximales de concentration solide, de vitesse et de température.

Les figures Figure 4.6 à Figure 4.8 montrent la distribution verticale de la concentration solide, de la vitesse et de la température à différents instants proches du passage du débit solide maximum. La concentration maximale dans le plan P1 vaut environ 0.10 % et est atteinte à $t = 46'000$ s, c'est-à-dire 17 min après la pointe du solidogramme (Figure 4.6). Le même rapport est respecté pour les valeurs du courant intrusif.

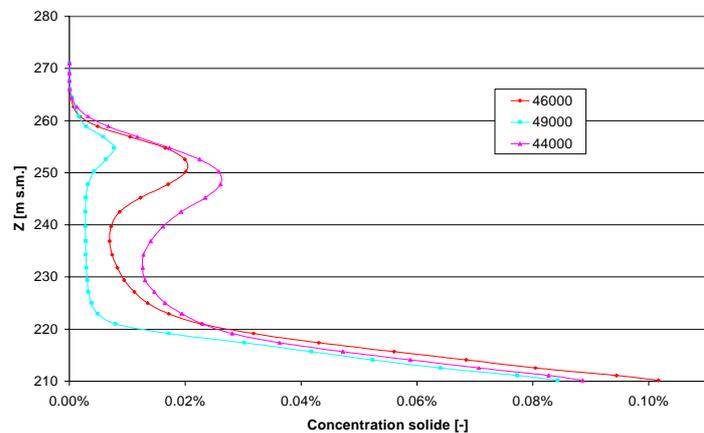


Figure 4.6 : Profils verticaux de concentration solide à trois instants différents dans le plan P1 (crué 1999).

du courant intrusif.

Dans le plan P2 le maximum est atteint 17 min plus tard que dans le plan 1. Sa valeur est plus de 2 fois inférieure à celle obtenue dans le plan P1.

Pour les vitesses, la valeur maximale dans le plan P1 vaut 34 cm/s et correspond au moment de concentration maximale (Figure 4.7). La vitesse maximale dans le plan P2 est légèrement supérieure (38 cm/s).

Les oscillations qui se produisent dans la partie supérieure du profil sont dues aux mélanges causés par le passage du courant de turbidité.

L'orientation principale des vecteurs vitesse est dirigée vers le haut ce qui indique des échanges de masse du fond vers la partie supérieure.

Dans le plan P1 la température maximale sur le fond du lac est atteinte à $t = 44'000$ s (1h07 après la pointe de l'hydrogramme et 17 min avant celle du solidogramme). Elle vaut 11.15°C , c'est-à-dire 5.15°C de plus qu'au début de la crue (Figure 4.8).

En surface, la température diminue progressivement jusqu'à atteindre la valeur minimale de 15.55°C à la fin de la crue, soit 4.45°C de moins par rapport à la situation initiale. Ce comportement se vérifie aussi sur le fond du lac où la température atteint la valeur minimale de 7°C .

Par rapport au profil de température au début de la crue, une inversion thermique se présente dans la couche de la thermocline, à une profondeur moyenne de 15 m. Un comportement analogue se vérifie dans le plan P2 mais avec des valeurs plus faibles vu que la distance à l'entrée est plus élevée. La température maximale sur le fond à l'instant $t = 46'000$ s vaut 7.75°C (3.4°C de moins par rapport au plan P1). A la surface la valeur de la température atteint 15.3°C comme dans le plan P1, ce qui indique un refroidissement uniforme du plan d'eau.

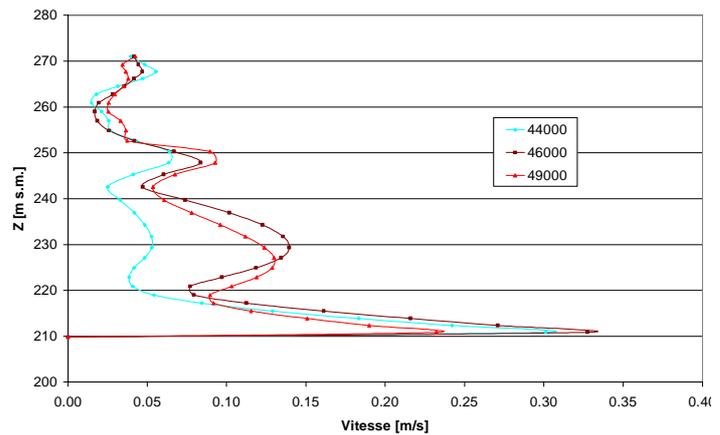


Figure 4.7 : Profils verticaux de vitesse à trois instants différents dans le plan P1 (crue 1999).

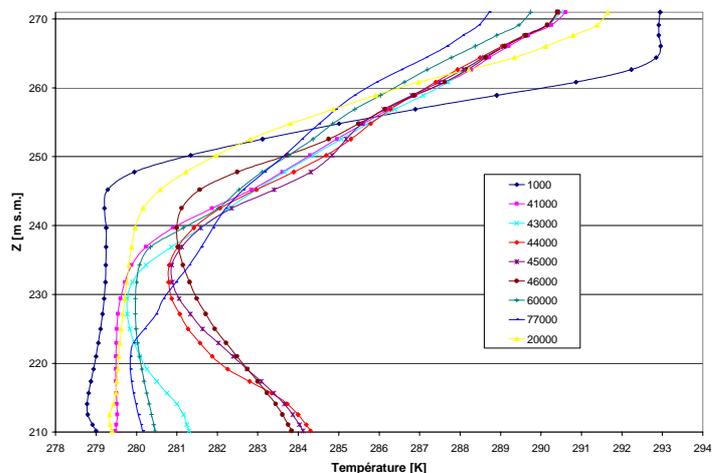


Figure 4.8 : Profils verticaux de température à différents instants dans le plan P1 (crue 1999).

Echanges verticaux

L'analyse de l'échange vertical de masse est faite dans le but d'évaluer les volumes d'eau déplacés sous l'effet du courant de turbidité sur le fond du lac. En premier lieu, les vitesses moyennes verticales sont calculées et, les volumes d'eau sont ensuite déterminés par intégration spatiale et temporelle.

Seul le cas de 1999 a été analysé, d'une part parce que les données nécessaires au calcul sont exhaustives et, d'autre part parce que l'hydro- et le solidogramme possèdent une forme simple.

Les surfaces d'analyse se trouvent dans des plans X-Y de 200 m de longueur et de largeur unitaire (Figure 4.9).

La position et la largeur des surfaces ont été choisies sur la base d'une analyse spatio-temporelle de l'étendue des zones concernées par les vecteurs vitesse verticaux.

Un exemple de résultat est donné à la Figure 4.10 où les vitesses verticales positives ($w+$) sont présentées dans les quatre premiers plans à l'instant $t = 51'000$ s, c'est-à-dire 1h40 après la pointe du solidogramme.

La fenêtre temporelle d'analyse est comprise entre 31'000 s et 61'000 s, elle comprend la montée et la décade de l'hydro- et du solidogramme.

Une analyse sur la position et l'intensité des vitesses verticales positives a été faite à chaque pas de temps de 1'000 s. A partir des vitesses moyennes verticales, les volumes d'eau traversant la colonne d'eau ont été calculés.

La valeur maximale de $85'000 \text{ m}^3$ est atteinte dans le plan le plus proche de l'entrée (plan 1A) à une profondeur de 38 m, c'est-à-dire à une distance de 42 m du fond du lac.

Les figures Figure 4.11 et Figure 4.12 représentent le volume maximal respectivement la vitesse maximale verticale en fonction de la distance à l'entrée du Cassarate. Dans la Figure 4.11 la distance est calculée le long de l'axe principal du courant de turbidité (NORD – EST) qui traverse les plans 1A – 2 – 2A – 3 – 4 – 5 – 6A – 7A. Dans la Figure 4.12 l'axe suit la direction sud et passe par les plans 1A – 2 – 2A – 3 – 4 – 8.

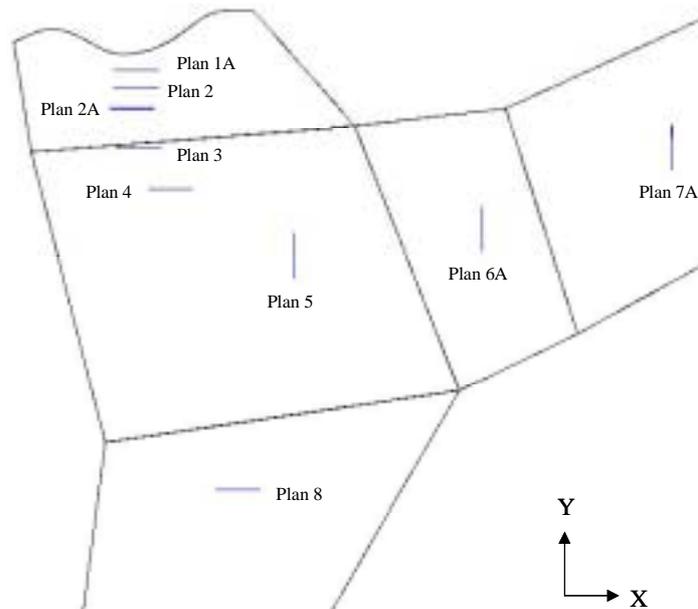


Figure 4.9 : Surfaces d'analyse des échanges de masse.

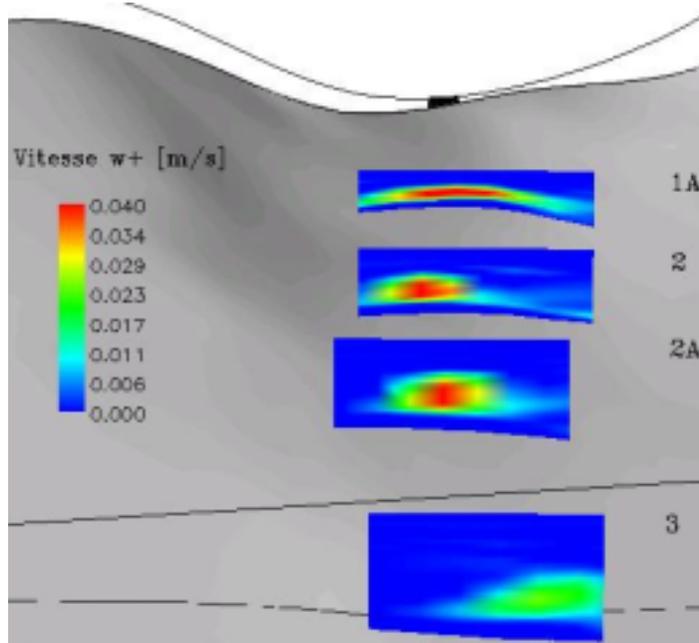


Figure 4.10 : Vitesses verticales positives dans les plans 1A, 2, 2A et 3 à $t = 51'000$ s (crue 1999).

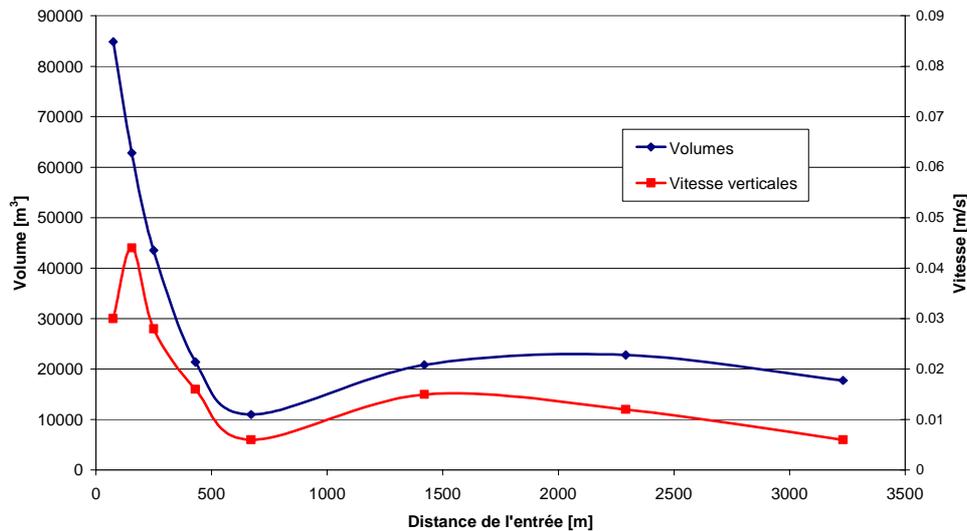


Figure 4.11 : Volumes et vitesses moyennes verticales d'échange sur la trajectoire NORD – EST (cruée 1999).

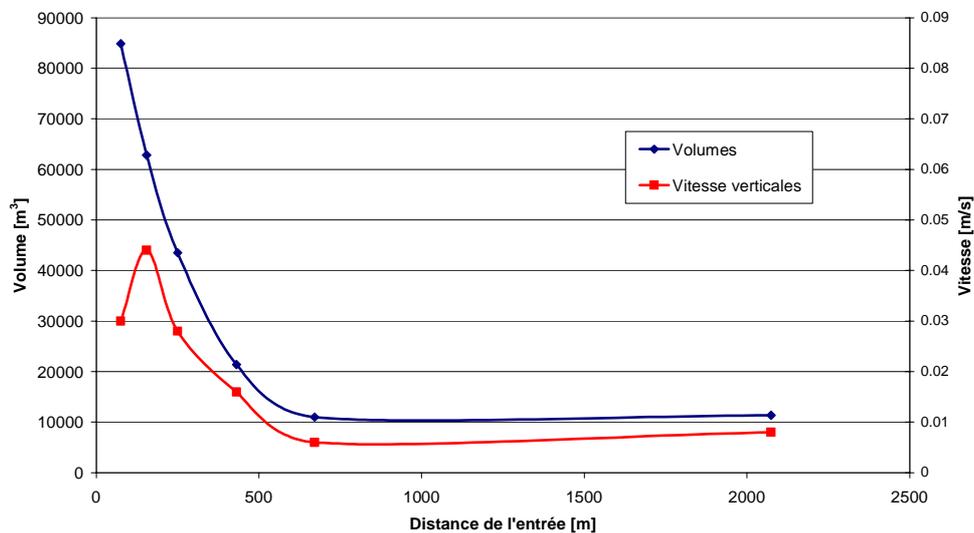


Figure 4.12 : Volumes et vitesses moyennes verticales d'échange sur la trajectoire NORD – SUD (cruée 1999).

Au fur et à mesure que la distance à l'entrée augmente le volume diminue jusqu'à atteindre une valeur moyenne constante de 20'000 m³ sur la trajectoire NORD – EST et de 10'000 m³ sur la trajectoire NORD – SUD.

En considérant que le volume d'eau totale amené par le Cassarate est de 1'320'000 m³, le volume d'eau qui traverse verticalement la section à 75 m de l'entrée représente 6.4 % de cette valeur.

En ce qui concerne les vitesses verticales moyennes, leur évolution est similaire à celle du volume d'eau, exception faite pour les deux premiers points (plan 1A et 2). Le maximum de 4.5 cm/s est atteint à 155 m de l'entrée, soit 50 % de plus que la valeur trouvée à 75 m de l'entrée.

5 MESURES TECHNIQUES

Suite à l'analyse des vitesses verticales dans le lac, il est possible d'affirmer que le courant de fond est à l'origine d'une remontée d'importantes masses d'eau. Cela permet d'expliquer le brassage vertical observé en 1994, qui est à l'origine de la détérioration qualitative des eaux de surface.

La solution pour réduire l'impact d'un évènement de crue consiste à éviter le brassage induit par le courant de fond. La propagation de ce courant doit donc être empêchée par la mise en place d'obstacles agissant comme dissipateurs d'énergie.

Après un examen de l'éventail des mesures possibles, la solution choisie consiste à positionner un diaphragme vertical perméable sur le fond du lac à une distance de 70 m environ de l'entrée du Cassarate. Le courant de turbidité ne doit pas être stoppé mais ralenti, son énergie cinétique doit être dissipée.

Pratiquement il n'est pas envisageable de construire une membrane imperméable, il a donc été choisi d'introduire une perméabilité dans la membrane afin de réduire les pressions et les déformations associées (Figure 5.1).

La largeur du diaphragme a été déterminée en regard de l'étendue de la zone dans laquelle les vecteurs vitesse verticaux sont importants.

Son positionnement et sa distance de l'entrée du Cassarate ont été définis en considérant le trajet du courant de turbidité sur le fond du lac. Les principales caractéristiques géométriques de la membrane sont les suivantes :

- Largeur : 80 m
- Hauteur : 15 m
- Distance de l'entrée du Cassarate le long du fond du lac : 70 m
- Nombre de cellules : 80

Lors de l'impact sur la membrane, le courant de turbidité le courant perd de son énergie et il est ralenti. Le brassage du fond à l'aval de la membrane est par conséquent réduit.

Les figures Figure 5.2 et Figure 5.3 montrent l'isosurface de vitesse verticale de valeur 10 cm/s à l'instant $t = 45'500$ s, sans et avec membrane perméable. Sans membrane la zone concernée par des vitesses verticales importantes s'étend sur 100 m environ. Avec membrane, la zone est localisée devant l'obstacle.

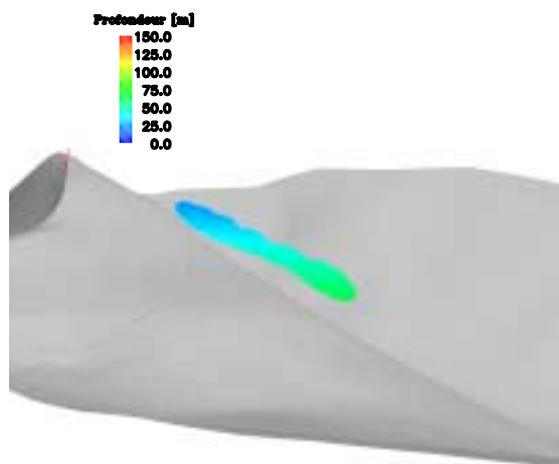


Figure 5.2 : Isosurface de vitesse verticale (10 cm/s), sans membrane (crue 1999).

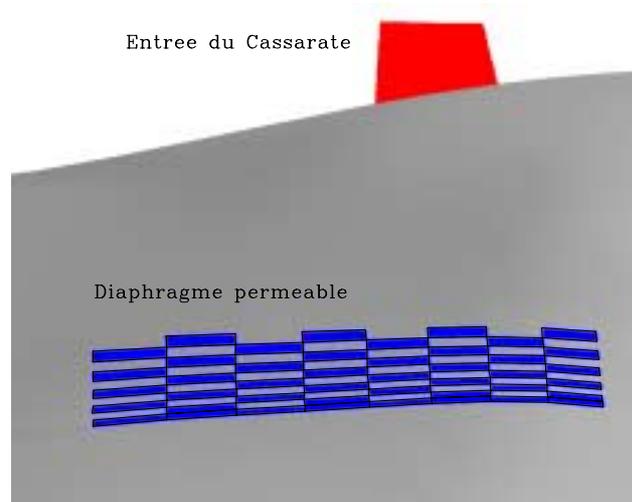


Figure 5.1 : Modélisation de la membrane verticale perméable dans CFX-4.

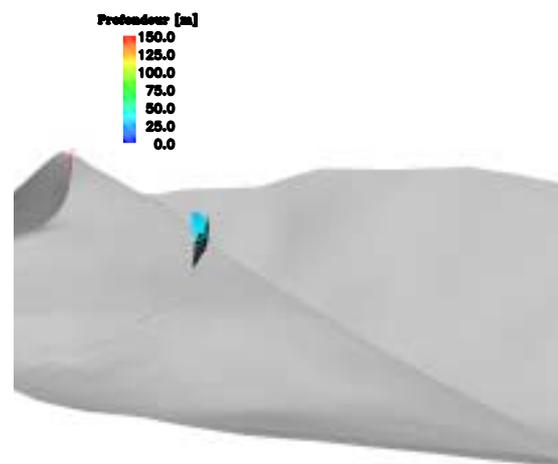


Figure 5.3 : Isosurface de vitesse verticale (10 cm/s), avec membrane perméable (crue 1999).

6 CONCLUSIONS

Des campagnes de mesures ont été effectuées sur le Cassarate et dans le lac de Lugano dans le but d'alimenter et valider un modèle de simulation numérique des courants de turbidité dans le lac.

La modélisation des courants de turbidité dans le lac de Lugano est de type événementiel. Les mesures de turbidité effectuées dans le Cassarate lors des crues d'octobre 1999 et de novembre 2000 ont permis de valider le modèle. Elles ont également servi à estimer la concentration solide de la crue de septembre 1994 qui est à l'origine du problème rencontré dans le lac.

La stratification thermique dans le lac et la température du Cassarate ont également été modélisées dans CFX-4. Elles ont permis de reproduire de manière fiable les courants intrusif et de fond. La vitesse maximale calculée du courant de fond est de 50 cm/s pour la crue de 1994 ; en 1999 et 2000 elle atteint respectivement 40 et 35 cm/s. Lors de chaque événement de crue simulé le courant de fond atteint le point le plus profond du lac, situé en direction est à environ 7 km de l'entrée du Cassarate.

L'analyse des composantes verticales de vitesse a permis de quantifier le flux remontant du fond vers la surface. Ces résultats ont été transmis à l'EAWAG pour l'analyse du brassage vertical à long terme. Les vitesses moyennes verticales se situent autour de 4 cm/s dans la zone proche de l'entrée et diminuent progressivement jusqu'à environ 1 cm/s.

En conclusion, il est possible d'affirmer que le courant de fond est à l'origine d'une remontée d'importantes masses d'eau. Cela permet d'expliquer le brassage vertical observé en 1994, qui est à l'origine de la détérioration qualitative des eaux de surface.

L'origine du problème étant identifiée, une solution a été recherchée pour réduire l'impact d'un événement de crue. Pour éviter le brassage induit par le courant de fond, sa propagation doit être freinée par la mise en place d'obstacles agissant comme dissipateurs d'énergie.

Un diaphragme vertical perméable positionné sur le fond du lac à une distance de 70 m de l'entrée du Cassarate a été modélisé numériquement. Il permet de réduire sensiblement les effets négatifs provoqués par le passage du courant de turbidité sur le fond du lac. Les vitesses verticales, à l'origine du mélange, sont fortement réduites et il est possible de prévoir que le transport d'éléments chimiques néfastes pour la qualité des eaux du lac sera beaucoup moins important.

La poursuite de l'étude devra se concentrer prioritairement sur les points suivants :

- poursuite de la campagne de mesure afin de disposer d'un jeu de données complet et étendu qui actuellement fait défaut ;
- affinement de la modélisation numérique, par l'introduction de la rugosité de fond, d'une couche de salinité et d'un modèle érosion/sédimentation sur le fond du lac ;
- optimisation et développement des aspects constructifs de la solution proposée.

La présente étude a été réalisée par M. Andrea Lavelli avec l'appui du Dr. Giovanni De Cesare, tous deux ingénieurs au Laboratoire de Constructions Hydrauliques de l'EPFL.

Laboratoire de constructions hydrauliques

Le responsable des études

Le Directeur

Dr. J.-L. Boillat

Prof. A. Schleiss

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Akiyama J.** : *Turbidity current with erosion and deposition*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 111, No. 12, December, 1985.
- Alavian V.** : *Behavior of density currents on an incline*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 112, No. 1, January, 1986.
- Alavian V., Ostrowski Jr.** : *Use of density current to modify thermal structure of TVA reservoirs*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 118, No. 5, May, 1992.
- Altinakar M. S., Graf W. H., Hopfinger E. J.** : *Flow structure in turbidity currents*, Journal of Hydraulic Research, Vol. 34, No. 5, 1996.
- Altinakar M. S., Graf W. H., Hopfinger E. J.** : *Water and sediment entrainment in weakly depositing turbidity currents on small slopes*.
- Atkinson Joseph F.** : *Detachment of buoyant surface jets discharged on slope*, Journal of Hydraulics Engineering, Vol. 119, No. 8, August 1993, pp. 878-894.
- Barbieri A., Zamboni F., Salvadè G., Gianora O.** : *Flood inflow and effects on the oxygen and temperature profile in a meromictic lake*.
- Bemporad G. A.** : *Simulation of round buoyant jet in stratified flowing environment*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 120, No. 5, May 1994, pp. 529-543.
- Bournet P. E., Dartus D., Tassin B., Vinçon-Leite B.** : *Numerical investigation of plunging density current*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 125, No. 6, June, 1999.
- Bradford S. F., Katopodes N. D., Parker G.** : *Characteristic analysis of turbid underflows*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 123, No. 5, May, 1997.
- Bradford S. Katopodes N. D.** : *Hydrodynamics of turbid underflows. I : Formulation and numerical analysis*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 125, No. 10, October, 1999.
- Britter R. E.** : *The motion of the front of a gravity current travelling down an incline*, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 99, part 3, 1980, pp. 531-543.
- Cheremisinoff N.** : *Encyclopedia of Fluid Mechanics, volume 1*, 1986.
- Chiu C.-L., Jin W., Chen Y.-C.** : *Mathematical models of distribution of sediment concentration*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 126, No. 1, January, 2000.
- Choi S.-U., Garcia M. H.** : *Modeling of one-dimensional turbidity currents with a dissipative-Galerkin finite element method*, Journal of Hydraulic Research, Vol. 33, No. 5, 1995.
- De Cesare G.** : *Alluvionnement des retenues par courants de turbidité*, Thèse de doctorat N° 7, Lausanne, EPFL, 1998.
- De Cesare G., Schleiss A., Hermann F.** : *Impact of turbidity currents on reservoir sedimentation*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 127, No. 1, January 2001, pp. 6-16.
- Effler S. W., Owens E. M., Schimel K., Dobi J.** : *Weather-based variations in thermal stratification*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 112, No. 2, February 1986, pp. 159-165.
- Fukushima Y.** : *Numerical simulation of gravity current front*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 124, No. 6, June, 1998.
- Garcia M. H.** : *Depositional turbidity currents laden with poorly sorted sediment*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 120, No. 11, November, 1994.
- Garcia M. H.** : *Hydraulic jumps in sediment-driven bottom currents*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 119, No. 10, October, 1993.
- Garcia M. H.** : *Turbidity currents*, Encyclopedia of Earth System Science, Vol. 4, 1992, pp. 399-408.
- Graf W. H., Altinakar M. S.** : *Hydraulique fluviale, écoulement permanent uniforme et non uniforme*, Lausanne, 1993.
- Graf W. H., Altinakar M. S.** : *Hydraulique fluviale, écoulement non permanent et phénomènes de transport*, Lausanne, 1996.

- Graf W. H., Altinakar M. S.** : *Hydrodynamique*, Lausanne, 1991.
- Graf W. H.**, : *Hydraulics of sediment transport*, 1984.
- Gu R., Stefan H.** : *Analysis of turbulent buoyant jet in density-stratified water*, Journal of Hydraulic Environmental Engineering, Vol. 114, No. 4, July/August 1988, pp. 878-897.
- Gu R., Stefan Heinz G.** : *Mixing of temperature-stratified lakes and reservoirs by buoyant jets*, Journal of Environmental Engineering, Vol. 114, No. 4, July/August 1988, pp. 898-914.
- Hondzo M., Stefan G.** : *Lake water temperature simulation model*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 119, No. 11, November, 1993.
- Hwang R. R., Chiang T. P., Yang W. C.** : *Effect of ambient stratification on buoyant jets in cross-flow*, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 121, No. 8, August 1995, pp. 865-872.
- James E.** : *Steady uniform underflow density currents*.
- Laboratorio Studi Ambientali (LSA)** : *Ricerche sull'evoluzione del Lago di Lugano, aspetti limnologici : programma quinquennale 1993-1997 (campagna 1994)*, Commissione Internazionale per la Protezione delle Acque Italo-Svizzere, 1996, 100 pp.
- Laboratorio Studi Ambientali (LSA)** : *Ricerche sull'evoluzione del Lago di Lugano, aspetti limnologici : programma quinquennale 1993-1997 (campagna 1993)*, Commissione Internazionale per la Protezione delle Acque Italo-Svizzere, 1996, 90 pp.
- Laboratorio Studi Ambientali (LSA)** : *Ricerche sull'evoluzione del Lago di Lugano, aspetti limnologici : programma quinquennale 1993-1997 (campagna 1996, campagna 1997 e rapporto quinquennale 1993-1997)*, Commissione Internazionale per la Protezione delle Acque Italo-Svizzere, 1998, 124 pp.
- Lee J. H. W., Cheung V. W. L.** : *Inclined plane buoyant jet in stratified fluid*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 112, No. 7, July 1986, pp. 580-589.
- Lee J. H. W., Yu W.-S.** : *Experimental study of reservoir turbidity current*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 123, No. 6, July 1987.
- Lemckert C J., Imberger J.** : *Axisymmetric intrusive gravity currents in linearly stratified fluids*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 119, No. 6, June 1993, pp. 662-679.
- Maxworthy T.** : *The dynamics of sedimenting surface gravity currents*, Journal of Fluid Mechanic, Vol. 392, 1999, pp. 27-44.
- Mays L. W.** : *Hydraulic Design Handbook*, 1999.
- Monaghan J. J., Cas R. A. F., Kos A. M., Hallworth M.** : *Gravity currents descending a ramp in a stratified tank*, Journal of Fluid Mechanic, Vol. 379, 1999, pp. 39-69.
- Morris G. L., Fan J.** : *Reservoir Sedimentation Handbook*, 1998.
- Sinniger R., Martini O., De Cesare G.** : *Apports de sédiments dans une retenue par courant de densité. Mesures in situ*, XVIIIe ICOLD Congress, Q.69-R.7, Durban, South Africa.
- Stefan Heinz G., Gu Ruochuan** : *Efficiency of jet mixing of temperature-stratified water*, Journal of Environmental Engineering, Vol. 118, No. 3, May/June 1992, pp. 363-379.
- Tsay T.-K., Ruggaber G. J., Effler S. W., Driscoll C. T.** : *Thermal stratification modeling of lakes with sediment heat flux*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 118, No. 3, March 1992, pp. 407-419.
- Wallace R. B., Sheff B. B.** : *Two-dimensional buoyant jets in two-layer ambient fluid*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 113, No. 8, August 1987, pp. 992-1005.
- Western A. W., Nolan J. B., Hughes R. L., O'Neill I. C.** : *Mixing behavior of density-stratified pools*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 124, No. 3, March 1998, pp. 280-287.
- Wright S. J.** : *Buoyant jets in density-stratified crossflow*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No. 5, May 1984, pp. 643-656.
- Wu S., Rajaratnam N.** : *A simple method for measuring shear stress on rough boundaries*, Journal of Hydraulic Research, Vol. 38, No. 5, 2000, pp. 399-400.