

# Et si les crues de l'Arve rejoignaient le Léman ?

## Etude de faisabilité de la dérivation des crues de l'Arve pour améliorer le rendement de la centrale du Seujet et décharger la retenue de Verbois

Hanane MOUKHLISS<sup>1</sup>,  
Anton SCHLEISS<sup>1</sup>, Sameh KANTOUSH<sup>1</sup>, Giovanni DECESARE<sup>1</sup>

Ms. reçu le 16 juin 2006, accepté le 17 juillet 2006

### Abstract

**Diverting the Arve floods into Lake Geneva: A feasible solution?** - The Arve River is the most important tributary of the Rhone River. The Arve has a very high sediment transport capacity due to its steep slope in the Alpine Valley. These solid materials deposit in the Rhone River. Because of the high sedimentation rate in the Verbois reservoir, the operator SIG (Services Industriels de Genève) flushes the reservoir with complete drawdown every three years with major negative ecological impacts downstream. The aim of this study is to evaluate the feasibility of a bypass of the floods in the Arve River directly into Lake Geneva and therefore to reduce the sedimentation of the Verbois reservoir.

**Keywords:** Flood, sediment transport, diversion, numerical modelling, reservoir sedimentation.

### Résumé

L'Arve est le plus important affluent du Rhône à Genève. Du fait de son caractère torrentiel, ce cours d'eau apporte une grande quantité de sédiments qui comblent le lit du Rhône. L'exploitation de l'aménagement hydroélectrique de Verbois nécessite donc des vidanges triennales, celles-ci provoquent d'importants impacts écologiques à l'aval. Le but de la présente étude est d'évaluer la faisabilité d'un projet de dérivation des crues de l'Arve dans le Léman pour résoudre la problématique de sédimentation de la retenue de Verbois, de proposer une variante de projet et d'étudier ses impacts.

**Mots clefs:** Crue, transport solide, dérivation, modélisation numérique, sédimentation de réservoir.

### Introduction

L'Arve et le Rhône constituent les deux cours d'eau les plus importants du canton de Genève. La rivière et le fleuve se rejoignent à la Jonction en aval de l'usine hydro-électrique du Seujet. Etant le principal

affluent du Rhône sur son tracé genevois, l'Arve influence significativement le régime d'écoulement du Rhône. En effet, l'Arve transporte des quantités considérables de matériaux alluvionnaires lors des crues. Ces matériaux sont transportés jusqu'à la Jonction et finissent par se déposer dans le lit du

<sup>1</sup> Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Laboratory of Hydraulic Constructions (LCH), CH-1015 Lausanne  
hanane.moukhliiss@epfl.ch

Rhône, rehaussant ainsi la ligne d'eau, réduisant les chutes pour la production électrique et augmentant le risque d'inondation des territoires environnants (principalement dans le quartier de la Jonction). Cette situation impose aux services industriels de Genève d'effectuer des chasses triennales pour assurer l'exploitation des aménagements au fil du Rhône. Ces vidanges provoquent des impacts écologiques importants. Elles affectent la vie piscicole, déséquilibrent l'hydrosystème et engendrent d'importantes dépenses pour les exploitants, ainsi que pour les industries implantées sur les rives du Rhône. C'est pour apporter une solution aux vidanges, que ce projet a été élaboré. Le but étant de trouver une alternative qui permette de satisfaire aux exigences écologiques nécessaires au Rhône, et de continuer par ailleurs, d'assurer la production énergétique, voire même de l'améliorer. L'idée du projet est de dériver les crues de l'Arve vers un autre bassin plus grand et capable de décanter les sédiments que le lit du Rhône. La situation géographique du système Rhône-Arve présente un atout intéressant car le Léman peut en effet, permettre une telle réalisation (Fig. 1).



Fig. 1: Situation géographique de l'Arve, le Rhône et le Léman (reproduite avec l'autorisation de swisstopo – BA071471).

Les gains escomptés par la présente étude sont alors une optimisation de la chute exploitable du Seujet dont la conséquence immédiate est l'optimisation de la production électrique, ainsi que la suppression ou la réduction de la fréquence des chasses de la retenue de Verbois.

Le concept de cette optimisation présenté ici consiste à étudier la faisabilité de dériver l'intégralité ou une partie des crues de l'Arve. Il s'agit donc d'évaluer le potentiel d'une

telle solution, le moyen d'y parvenir et les impacts que cette dérivation peut avoir. La variante de dérivation est recherchée en essayant de combiner plusieurs fonctions et de réaliser un aménagement à buts multiples.

L'éventuelle suppression des vidanges de Verbois est étudiée dans une seconde étape. Les résultats pour une durée déterminée sont comparés avec un scénario intégrant la dérivation des crues de l'Arve.

## Projet de dérivation de l'Arve

L'étude de faisabilité passe par les étapes suivantes:

- la détermination des caractéristiques hydrauliques de l'Arve et du Rhône par modélisation numérique.
- l'étude du transport solide de l'Arve par des méthodes analytiques.
- la génération de plusieurs variantes de dérivation sur des tracés potentiels avec la prospective d'un aménagement à buts multiples.
- le choix et le pré-dimensionnement de la variante optimale.
- l'étude des impacts de cette variante sur le système.

## Modélisation numérique

Un modèle numérique du système (Arve - Rhône) est réalisé par le programme de simulation Hec-Ras. Le modèle est établi sur la base de 26 profils transversaux de l'Arve du Km 4.8 à la Jonction, et de 49 profils transversaux du Rhône, de l'aval du Seujet à l'amont de Verbois. Il permet de visualiser les courbes de remous pour différents débits. Sa réalisation sert principalement à évaluer l'effet de la dérivation sur la courbe de remous à l'aval de la centrale du Seujet.

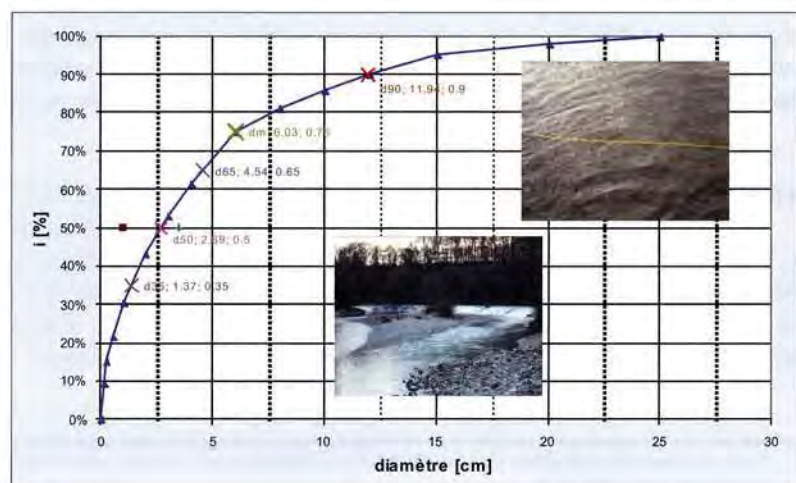


Fig. 2: Courbe granulométrique de l'Arve établie par des levées en lignes.

### Calcul du débit solide de l'Arve

Pour connaître le débit solide correspondant à chaque débit dérivé ou débit restitué, une estimation du transport solide de l'Arve est effectuée sur la base des résultats du modèle numérique HEC-RAS et de la granulométrie des sédiments de l'Arve (Fig. 2).

Ce transport solide est évalué par trois méthodes analytiques. Deux d'entre elles: la méthode de Graf & Acaroglu (1968) et la méthode de Ackers & White (1973), sont des méthodes directes pour déterminer le transport total [charriage + matières en suspension]. La troisième méthode de Smart & Jäggi (1983), quand à elle, calcule uniquement le transport par charriage. Aucune méthode de détermination du transport solide n'est à ce jour à 100% fiable. C'est pour cette raison que le calcul est effectué avec deux méthodes de transport total et une troisième de charriage. Cette dernière permettra en effet, d'évaluer la validité des deux autres. Les résultats de la formule de Graf & Acaroglu semblent les plus fiables, car les résultats de la méthode de Ackers & White (total) donnent pour plusieurs profils étudiés les mêmes résultats de charriage calculés par Smart & Jäggi (Fig. 3). La méthode Garf & Acaroglu a donc été adoptée dans la suite de l'étude.

### Variantes de projet

Le choix du type de dérivation, de son emplacement et du débit de dérivation, est effectué en fonction des caractéristiques hydrauliques et des apports en sédiments de l'Arve ainsi que des contraintes topographiques et d'occupation du sol.

Les principales possibilités d'aménagement sont:

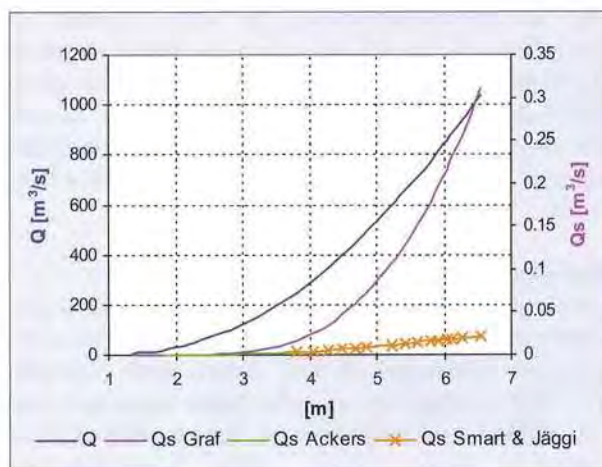


Fig. 3: Courbe de jaugeage liquide et sédimentologique pour un profil type de l'Arve (KM 4.7).

- un aménagement à but unique de dérivation selon deux options:
  - un tunnel de dérivation selon un profil en long adéquat
  - un canal de dérivation aménagé sous une route existante
- un aménagement à buts multiples:
  - aménagement d'un tunnel routier en canal de dérivation
  - dérivation par un cours d'eau à ciel ouvert (création d'un nouveau biotope)

L'idée d'un tunnel routier, doublé d'une fonction de dérivation, représente un intérêt sur le plan énergétique et hydraulique, mais également pour la mobilité dans le centre ville. En effet, cette variante à buts multiples cherche à améliorer le rendement de l'usine du Seujet par la réduction de la sédimentation du lit du Rhône et du réservoir de Verbois; mais également en offrant un aménagement routier qui permettrait de décongestionner les rues du centre ville du trafic de transit. Sur un plan environnemental, la dérivation de l'Arve via un cours d'eau à ciel ouvert est intéressante. Si les conditions pour l'implantation d'un aménagement à buts multiples ne sont pas remplies, la dérivation à but unique est la seule variante.

L'analyse de la topographie de Genève élimine les variantes à buts multiples. En effet, au centre ville, on ne dispose pas de suffisamment de couverture du sol pour aménager un tunnel routier et de dérivation entre l'Arve et le Léman. La dérivation à ciel ouvert nécessite une longueur de tracé considérable, de plus il faut toujours lui garantir un débit et pas uniquement en période de crue de l'Arve. L'aménagement d'un canal sous une route existante est également exclu à cause de l'inadaptation du profil en long de cette dernière. In fine, le choix se porte sur un tunnel à but unique de dérivation. Le choix du tracé de ce tunnel est le fruit d'une série de profils reliant l'Arve au Léman. Le tracé et la topographie sont illustrés à la figure 4.

### Dimensionnement de la variante de projet retenue

Le choix du diamètre du tunnel est fait selon des considérations économiques, de faisabilité technique et de débit suffisant pour contenir une bonne part du transport solide. Le diamètre adopté est de 8 m, ce qui équivaut pour le tunnel à un débit de 300 m³/s. La dérivation nécessite les ouvrages suivants:

- un ouvrage de régulation du débit de l'Arve situé sur son lit,
- un déversoir muni d'un clapet à l'endroit de la dérivation, suivi d'un entonnement à l'entrée du tunnel.

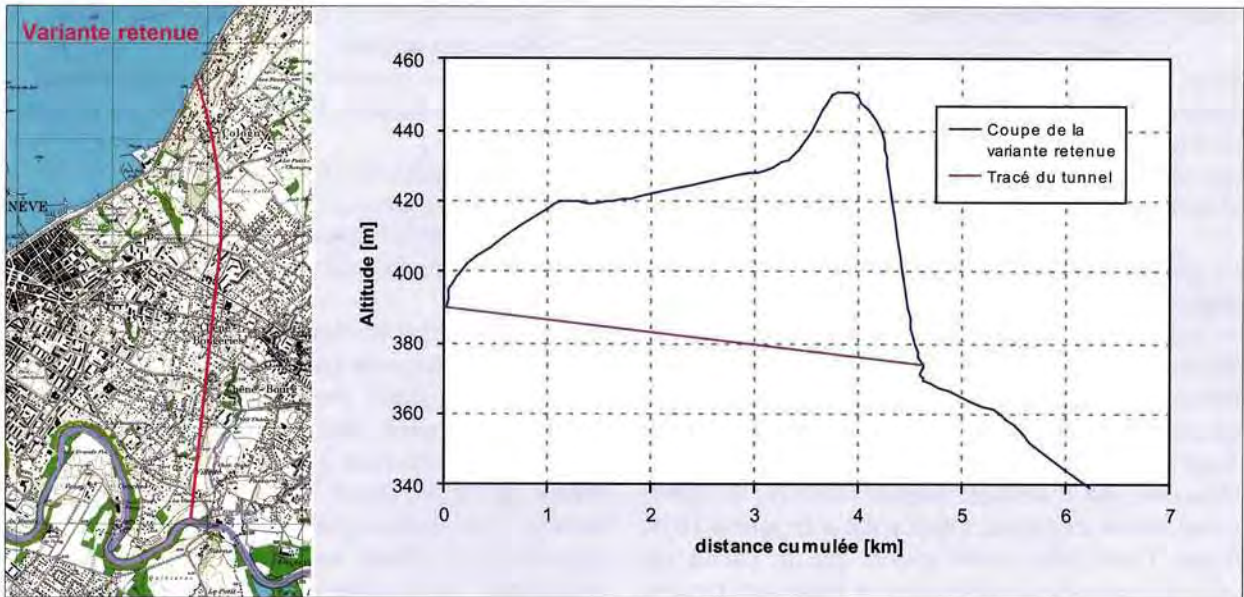


Fig. 4: Tracé et profil longitudinal pour la variante de projet retenue (carte reproduite avec l'autorisation de swisstopo – BA071471).

Ces ouvrages permettent le fonctionnement du couple régulation/dérivation, dont le mode de fonctionnement est présenté à la figure 5.

L'ouvrage de régulation est un barrage gonflable activé dès que le débit de l'Arve dépasse son niveau annuel moyen. L'intérêt d'utiliser ce système réside dans son intégration à l'environnement et ses caractéristiques mécaniques dues au caoutchouc qui compose cette membrane. Ce matériau lui confère une résistance à la corrosion, une résistance à l'abrasion et une facilité d'installation.

**Les impacts de la variante de projet retenue**

**Impacts sur la production énergétique du barrage du Seujet:**

Un deuxième modèle numérique est établi par le programme Hec-Ras, ceci en tenant compte de la dérivation de l'Arve. La superposition des courbes de remous avant et après dérivation permet de déterminer la baisse de ligne d'eau à l'aval. Ce gain équivaut à l'augmentation de la chute exploitable et donc exprime un gain énergétique. Le résultat de cette analyse est présenté dans les figures 6 et 7. La figure 7 représente le gain estimé pour une dérivation moyenne de 150 m<sup>3</sup>/s en fonction du débit initial de l'Arve (la capacité maximale du tunnel est de 300 m<sup>3</sup>/s).

**Impacts sur le Léman:**

Sur la base des coordonnées nationales éditées par l'Office fédéral de la topographie, une bathymétrie du Léman est établie (Fig. 8). La zone de l'embouchure du tunnel de dérivation est ensuite délimitée pour étudier la formation d'un delta et son évolution.

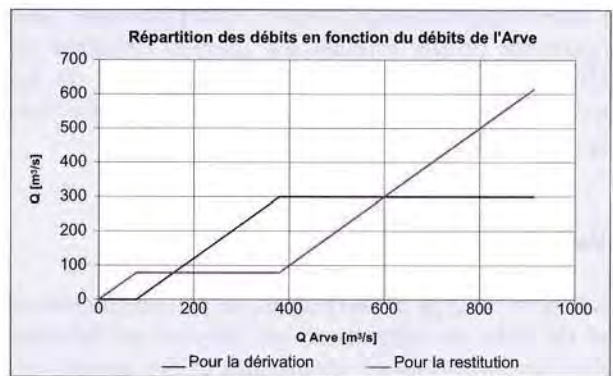


Fig. 5: Répartition des débits Q en fonction du débit de l'Arve.

Une méthode empirique a été utilisée. Elle est basée sur les recommandations du «U.S. Bureau of Reclamation» qui estime la pente du dépôt, la pente du front et la longueur du delta en fonction de la pente initiale du cours d'eau (du tunnel ici). Le calcul est basé ici sur deux pentes initiales et donne des valeurs réalistes pour les pentes du dépôt et du front.

**Perspectives sur l'évolution du delta:**

L'embouchure du tunnel de dérivation se situe à proximité d'une dépression du fond du lac dont les coordonnées nationales de son centre sont (502000, 121500). L'évolution du delta laisse supposer, que les sédiments commenceront par se déposer en comblant cette cuvette. Cette hypothèse ne concerne que la fraction du transport solide susceptible d'être décanté. En effet, selon le diamètre des

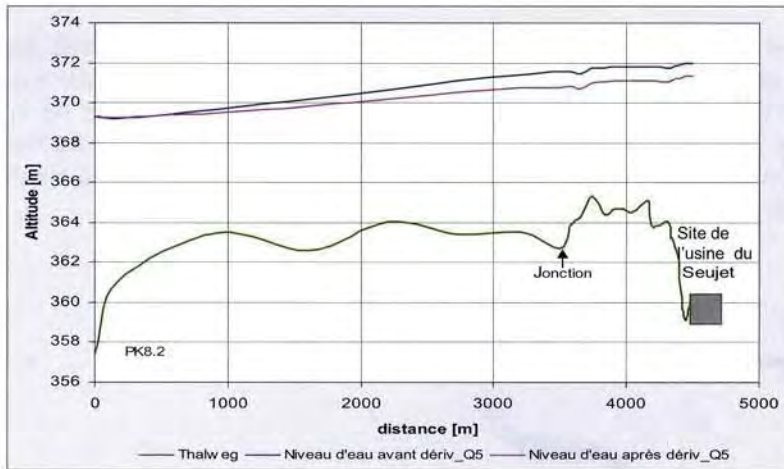


Fig. 6: Courbes de remous avant et après dérivation de l'Arve.

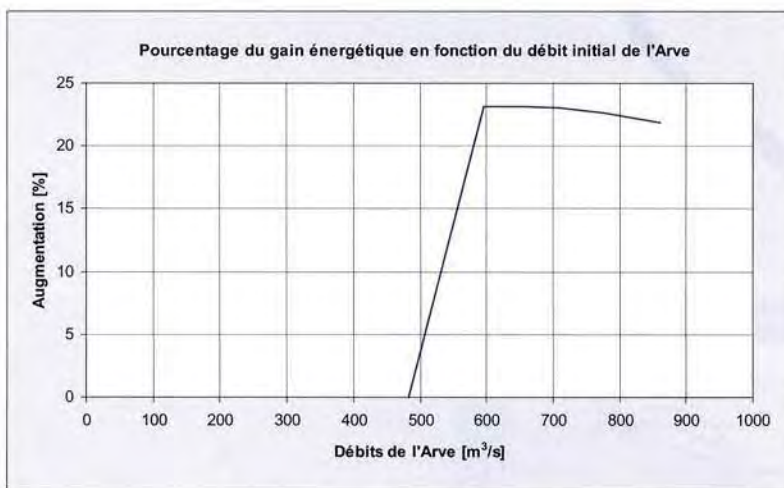


Fig. 7: Pourcentage du gain énergétique en fonction du débit initial de l'Arve.

sédiments et la vitesse de l'écoulement du lac, il peut y avoir déposition ou entraînement selon le principe de Hjulstrom (1984). Les calculs permettent de conclure que

- si le diamètre,  $d > 0.08 \text{ mm}$ , les particules se décanteront dans le fond du lac;
- si  $d \leq 0.08 \text{ mm}$  [représentent 2% du poids sur la courbe granulométrique de l'Arve], les particules se feront transportées par le courant vers l'exutoire.

### ■ Problématique de l'alluvionnement de Verbois

La retenue de Verbois s'étend sur une surface de 1.32 millions de  $\text{m}^2$ , avec une capacité de rétention de 13.8 millions de  $\text{m}^3$  et un volume utile de 369 000  $\text{m}^3$ .

Les études environnementales effectuées par les SIG sur la vidange 2003 prouvent que les chasses triennales de la retenue de Verbois provoquent la dégradation de la qualité écologique de l'eau. Elles provoquent notamment une baisse de la teneur en oxygène dissout et une augmentation des teneurs en

azote ammoniacal. Ce type de chasse provoque en outre une grande réduction du nombre de jeunes poissons, déstabilise ainsi la pyramide des âges et perturbe la vie piscicole de manière générale.

### Modélisation numérique

Le programme CCHE2D a servi pour évaluer l'évolution de la bathymétrie de la retenue selon deux scénarios: Sans et avec dérivation de l'Arve.

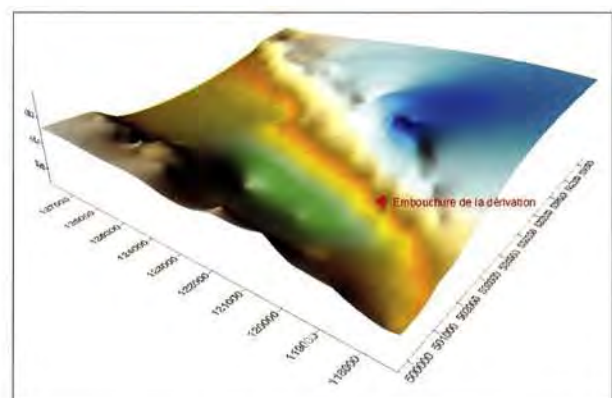


Fig. 8: Bathymétrie dans le secteur de l'embouchure du tunnel.

**Résultats de la simulation**

La simulation est basée sur les données bathymétriques de 2003 et est effectuée dans un premier temps pour une durée de 3 ans. La modification du lit est alors obtenue (Fig. 9) et permet dans un second temps de la comparer avec la modification bathymétriques intégrant la variante de projet (Fig. 10).

La répartition du charriage et des matières en suspension (MES) peut également être générée par cette simulation. On obtient ainsi la courbe de la figure 11 qui permet de déduire qu'avec la dérivation, on obtient en moyenne, une réduction du charriage de 63% et des MES de 36%.

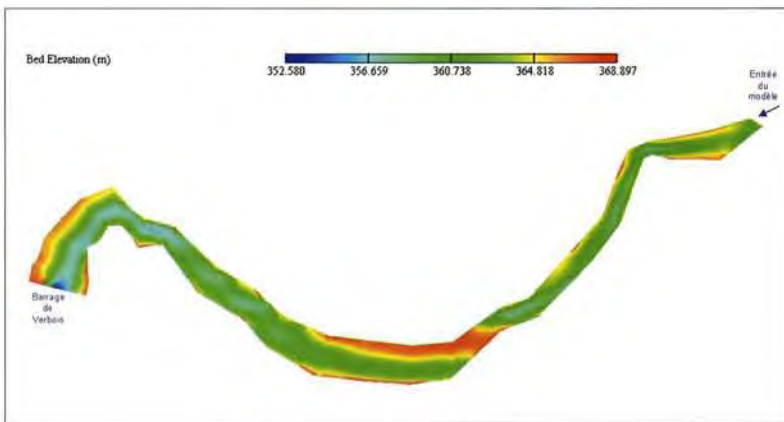


Fig. 9: Bathymétrie d'une partie de la retenue établie par CCHE2D.

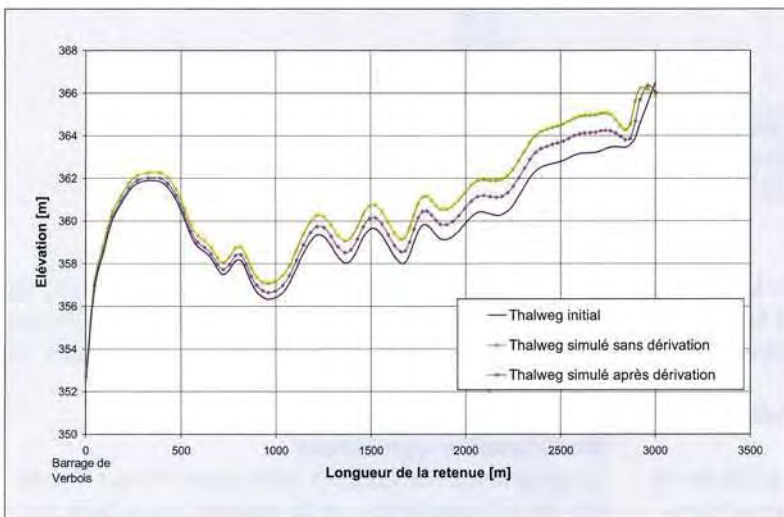


Fig. 10: Modification du lit de la retenue pour les scénarios sans et avec dérivation de l'Arve.

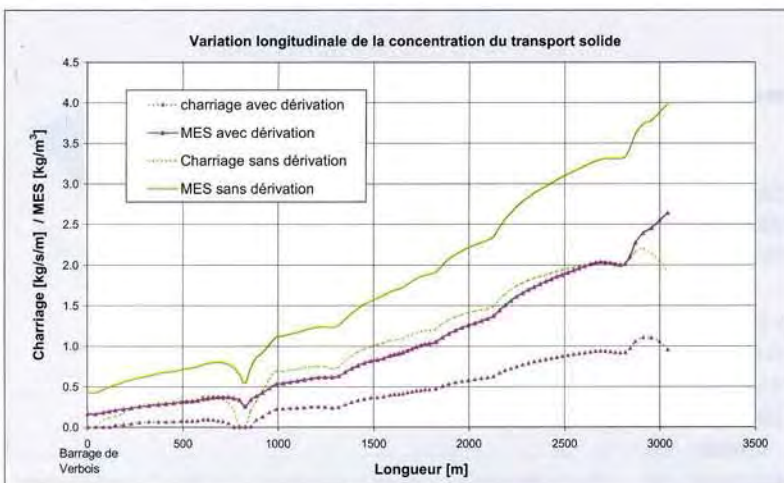


Fig. 11: Variation longitudinale de la concentration du transport solide.

## Conclusion

Le système fluvial Arve-(Léman)-Rhône a été étudié dans la prospective d'une dérivation des crues de l'Arve dans le Léman. Les impacts d'un tel aménagement ont pu être identifiés: le rendement de la centrale du Seujet augmenterait significativement pour les débits importants de l'Arve, lorsque la dérivation est maximale. Un delta se formerait à l'embouchure dans le Léman et l'alluvionnement de la retenue de Verbois serait réduit significativement. La dérivation pourrait donc apporter une solution aux conséquences qui seraient générées en cas de suppression des vidanges, ou au moins permettre de réduire la fréquence de ces vidanges si l'on décide de les maintenir.

On peut noter que cette idée a été déjà formulée en 1857 par l'ingénieur français Louis-Léger Vallée et reprise ensuite par Karl Bürli (1823-1901). Des détournements de cours d'eau ont déjà eu lieu en Suisse, dont l'exemple le plus important fut celui de la Kander entre 1711 et 1714 (Vischer et Fankhauser 1990), suivi par la correction de la Linth dans le lac de Walenstadt (1807-1816), le détournement de l'Aar dans le lac de Biemme (1868-1891) ainsi que le détournement de la Melchaa dans le lac de Sarnen (Vischer 1989).

## Références

- BATUCA DG, JORDAAN JM. 2000. Silting and Desilting of Reservoirs. A.A. Balkema Rotterdam Brookfield.
- GARF W, ALTINAKAR MS. 2000. Hydraulique fluviale: Ecoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple, PPUR, Traité de génie civil.
- MOUKHLISS, H. 2005. Amélioration du rendement de la centrale du Seujet à Genève et problématique de l'alluvionnement de la retenue de Verbois (*travail de master of science en génie civil, EPFL, non publié*).
- UNIVERSITY OF MISSISSIPPI. 2002. Graphical User Interface for the CCHE2D Model, Users Manual, Version 2.0. National Center for Computational Hydroscience and Engineering.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS. 2002. HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual, Version 3.1. US ARMY Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS. 2002. HEC-RAS River Analysis System User's Manual, Version 3.1. HEC-RAS River Analysis System Applications Guide, Version 3.1. USACE, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
- SIG, CELLULE ENVIRONNEMENT-RHÔNE. 2003. Vidange 2003 des retenues de Verbois et de Chancy-Pougny sur le Rhône, rapport du suivi biologique du 24 mai au 26 juin 2003. Services industriels de Genève.
- SIG, CELLULE ENVIRONNEMENT-RHÔNE. 2004. Vidange 2003 des retenues de Verbois et de Chancy-Pougny, suivi des aspects piscicoles. Services industriels de Genève
- VISCHER D. 1989. Impact of 18th and 19th Century River Training Works: Three Case Studies from Switzerland. In Petts, G.E., ed. Historical Change of Large Alluvial Rivers: Western Europe, Wiley & Sons, Chichester, pp 19-40.
- VISCHER D, FANKHAUSER U. 1990. 275 Jahre Kanderumleitung. Wasser, Energie, Luft 82, 1/2, pp 16-25.
- VISCHER D. 2003. Histoire de la protection contre les crues en Suisse. OFEG.