

Hydraulique et morphologie de la retenue de Verbois

E.F.R. BOLLAERT¹, S. ANDRÉ², S. FERRETTI³, S. DIOUF⁴, D. SIDLER⁴

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

Abstract

Hydraulics and Morphology of the Verbois Reservoir - This paper presents a study of the long-term morphological behavior of the Verbois reservoir in Geneva, Switzerland (Aquavision 2006). The Verbois reservoir has been commissioned in 1942 on the Rhône River downstream of Geneva and has a total length of 12 km. Significant sedimentation occurred after dam construction, with an averaged yearly deposited volume of fine sediments of about 400 000 m³. To minimize sedimentation, flushing events have been performed on a regular tri-annual basis. These allow emptying the major part of the deposited material and thus maintain a minimum free volume. However, they also generate huge environmental impact downstream. To deal with this impact, a detailed study has been performed of the potential morphological behavior of the Verbois reservoir in the absence of any further flushing events for the next 50 years. Both analytical and 1D and 2D numerical computations have been performed over a total river and reservoir length of about 25 km. All computations predict that the reservoir will continue its sedimentation rather quickly during the first 10-15 years after stoppage of flushing, followed by a progressive stabilization of the sedimentation, resulting in a new dynamic equilibrium situation on the long term. This equilibrium would correspond to a main meandering channel with large sediment banks along the inner bends of the former Rhône River. The new reservoir bottom will affect the water surface levels in the center of Geneva during floods, imposing so the need for a new and appropriate sediment management in case of no further flushing. Appropriate modification of the actual reservoir operating rules during floods might allow transferring part of the inflowing sediments downstream of the dam with an average concentration smaller than during a flushing event. This sedimentation study is part of more general future reservoir management plan, incorporating also security, social, economic and environmental constraints.

Key-words: hydraulics, long-term morphology, Verbois reservoir, quasi-3D numerical modeling.

Résumé

L'article présente une étude de l'hydraulique et de l'évolution morphologique sur le long terme (50 ans) de la retenue de Verbois à Genève dans le cas d'un éventuel abandon des chasses triennales (Aquavision 2005). La retenue de Verbois a été mise en fonction en 1942 sur le Rhône en aval de Genève et a une longueur d'environ 12 km. Suite à la mise en eau, une importante sédimentation de la retenue s'est produite, avec un volume moyen des dépôts de sédiments de l'ordre de 400 000 m³ par année. Afin de minimiser ces dépôts, des opérations de chasses ont été effectuées sur une base triennale. Celles-ci ont certes largement contribué à maintenir un certain volume utile dans la retenue, mais génèrent un impact considérable sur l'écosystème de la retenue même et dans le Rhône en aval. Ainsi, une étude numérique détaillée a-t-elle été faite de l'évolution morphologique de la retenue dans un horizon de 50 ans, avec ou sans de futures chasses. Dans le scénario d'absence de futures chasses, les résultats des calculs indiquent que la retenue va se combler relativement vite durant les premiers 10-15 ans, suivi par une stabilisation progressive du degré de comblement pour finalement atteindre un nouvel état d'équilibre morphologique dynamique. Ce nouvel équilibre correspondrait à un chenal principal de divagation d'une cinquantaine de mètres de large combiné avec de vastes zones inondables de part et d'autre de ce chenal. La modification de la morphologie du fond de la retenue aura une influence non-négligeable sur les lignes d'eau risquant d'engendrer des inondations au centre de Genève. De ce fait, dans l'absence de futures chasses, un nouveau mode de gestion de la sédimentation entre la Jonction et le barrage de Verbois s'impose. A première vue, une modification appropriée des consignes actuelles d'exploitation de la retenue lors de forts débits permettrait de minimiser les risques d'inondation. Néanmoins, dans le respect du développement durable, toute gestion de la sédimentation se devra d'intégrer les aspects socio-économiques et environnementaux.

Mots clefs: hydraulique, morphologie sur le long terme, retenue de Verbois, modélisation numérique quasi-3D

¹ AquaVision Engineering, Chemin des Champs-Courbes 1, CH-1024 Ecublens, erik.bollaert@aquavision-eng.ch; <http://www.aquavision-eng.ch>

² SESA, Lausanne

³ DIAE, Genève

⁴ SIG, Cellule Environnement Rhône, Genève

Introduction

Le présent article décrit une étude analytique et numérique détaillée du comportement hydraulique et morphologique sur le long terme de la retenue de Verbois. Cette retenue a été mise en fonction en 1942 sur le Rhône en aval de Genève et a une longueur totale d'environ 12 km. Depuis sa mise en eau, d'importants dépôts de sédiments se sont formés au fond de la retenue. Ainsi, avec un volume moyen des dépôts de sédiments de l'ordre de 400 000 m³ par année, des opérations de chasses ont-elles été effectuées sur une base triennale. Celles-ci ont certes largement contribué à maintenir un certain volume utile dans la retenue, mais génèrent un impact considérable sur l'écosystème de la retenue même et dans le Rhône en aval. Ainsi, une étude numérique détaillée a-t-elle été faite de l'évolution morphologique de la retenue dans un horizon de 50 ans, avec ou sans futures chasses. L'étude vise à répondre aux questions suivantes:

- 1. Quels sont les risques en cas d'un abandon des chasses triennales?
- 2. Quels sont les arguments en faveur d'un maintien des chasses?
- 3. En cas d'abandon des chasses, quelles seraient les mesures d'accompagnement à mettre en œuvre?

Des calculs analytiques et numériques de l'évolution hydraulique et morphologique de la retenue dans un horizon de 50 ans ont ainsi été effectués avec ou sans les chasses triennales. L'influence d'un abandon des chasses sur un éventuel rehaussement des lignes d'eau à la Jonction au centre de Genève ont été d'un intérêt particulier. Dans ce sens, il s'est avéré qu'un nouveau mode de gestion des sédiments dans la retenue est indispensable. Bien que, dans le respect du développement durable, toute gestion de la sédimentation se doive d'intégrer les aspects socio-économiques et environnementaux, cet article vise principalement les aspects sécuritaires.

Matériel utilisé

Données de base

Une multitude de données de base a été utilisée, principalement dans les domaines hydrologiques, bathymétriques et du transport sédimentaire. Ainsi, les données suivantes ont été récoltées:

- 1. Profils à travers et relevés bathymétriques détaillés sur le Rhône avant et après les opérations de chasses triennales (données disponibles depuis 1987) ainsi que sur l'Arve depuis 1983 (SIG)
- 2. Données hydrologiques sur le bassin versant de l'Arve (massif du Mont-Blanc) et sur le Lac Léman (réglé par le barrage du Seujet) (SIG)
- 3. Données sur les structures hydrauliques (seuils, barrages, ponts, centrales hydroélectriques, etc.) (SIG et DIAE Genève)
- 4. Mesures de la concentration en MES (= Matières En Suspension) dans l'Arve et dans la retenue de Verbois (données disponibles depuis 1988) (SIG)
- 5. Données granulométriques et sédimentométriques du fond et des berges de l'Arve et du Rhône (SIG)

Pour les calculs, la zone étudiée a été subdivisée en 4 sections comme suit (Fig. 1):

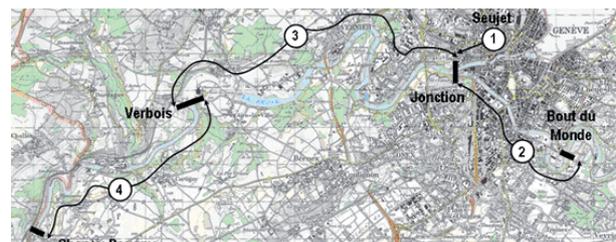


Fig. 1: Zone étudiée et subdivision en 4 sections

Tableau 1: Débits de pointe de l'Arve et du Rhône (Gicot 1989)

Temps de retour [ans]	Q Arve [m ³ /s]	Q Jonction [m ³ /s]	Q Verbois [m ³ /s]	Q Chancy-Pugny [m ³ /s]
Moyenne annuelle	79	337	337	340
1	400	850	850	850
5	620	1000	1000	1120
10	700	1050	1050	1220
100	950	1250	1460*	1500
1000	1200	1450	1800*	1900
déluge	1800	2100	2700**	2850**

*loi Gumbel selon Gicot 1989 / ** 1.5 fois la crue millénaire

- 1. section «Seujet-Jonction»: depuis le barrage de Seujet jusqu'à la Jonction du Rhône avec l'Arve.
- 2. section «Bout du Monde – Jonction»: tronçon de l'Arve depuis le Bout du monde jusqu'à la Jonction.
- 3. section «Jonction- Verbois: depuis la Jonction jusqu'au barrage de Verbois environ 12 km en aval.
- 4. section «Verbois- Chancy-Pougny»: tronçon du Rhône entre le barrage de Verbois et le barrage de Chancy-Pougny (environ 8 km).

Hydrologie

L'hydrologie du secteur du Rhône étudié est définie premièrement par le bassin versant alpin de l'Arve. Ce bassin a une surface totale d'environ 2000 km² à la Jonction et s'étend jusqu'au massif du Mont-Blanc (6% couverts de glaciers). Il est caractérisé par de fortes crues en été et des débits de base élevés lors de la fonte des neiges au printemps. La fréquence et les pointes des crues de l'Arve et du Rhône figurent au tableau 1.

Transport solide en suspension

Des mesures de matières en suspension (MES) ont été effectuées dans l'Arve depuis 1890 déjà (Peiry 1988). Néanmoins, des valeurs facilement utilisables

pour la présente étude existent depuis 1965, sous forme de mesures ponctuelles à une cadence hebdomadaire prélevées à la station du Bout du monde (Peiry 1988). Les valeurs ainsi enregistrées entre 1965 et 1988 ont été étudiées et transformées en une relation de concentration MES par Peiry (1988). Ces mesures n'étant pas forcément effectuées pendant les crues de l'Arve, on peut considérer que cette relation de concentration représente en quelque sorte une moyenne pour le bassin versant. La figure 2 illustre cette relation ainsi que les valeurs ponctuelles. Il s'avère que, lors de crues dans l'Arve, des valeurs de pointe de l'ordre de plusieurs dizaines de g/l (dizaines de milliers de g/m³) sont parfois atteintes. Afin de mieux tenir compte de ces valeurs de pointe, une nouvelle relation de concentration MES a été développée. Elle est de caractère exponentiel et met en valeur les concentrations lors des crues de l'Arve. Il s'agit donc d'une relation plutôt extrême qui ne pourrait être de vigueur en toutes circonstances. Finalement, les SIG ont effectué des mesures de MES lors de la crue du 4 juin 2005, permettant de confirmer la plausibilité de la relation exponentielle lors des crues de l'Arve.

Les mesures de MES et les relevés bathymétriques ont permis d'estimer le volume moyen annuel de sédiments transporté par suspension à environ 700 000 m³, dont environ 50% se dépose dans la retenue de Verbois, le solde étant transféré vers l'aval (GEOS 2000). Les diamètres de grain des MES se

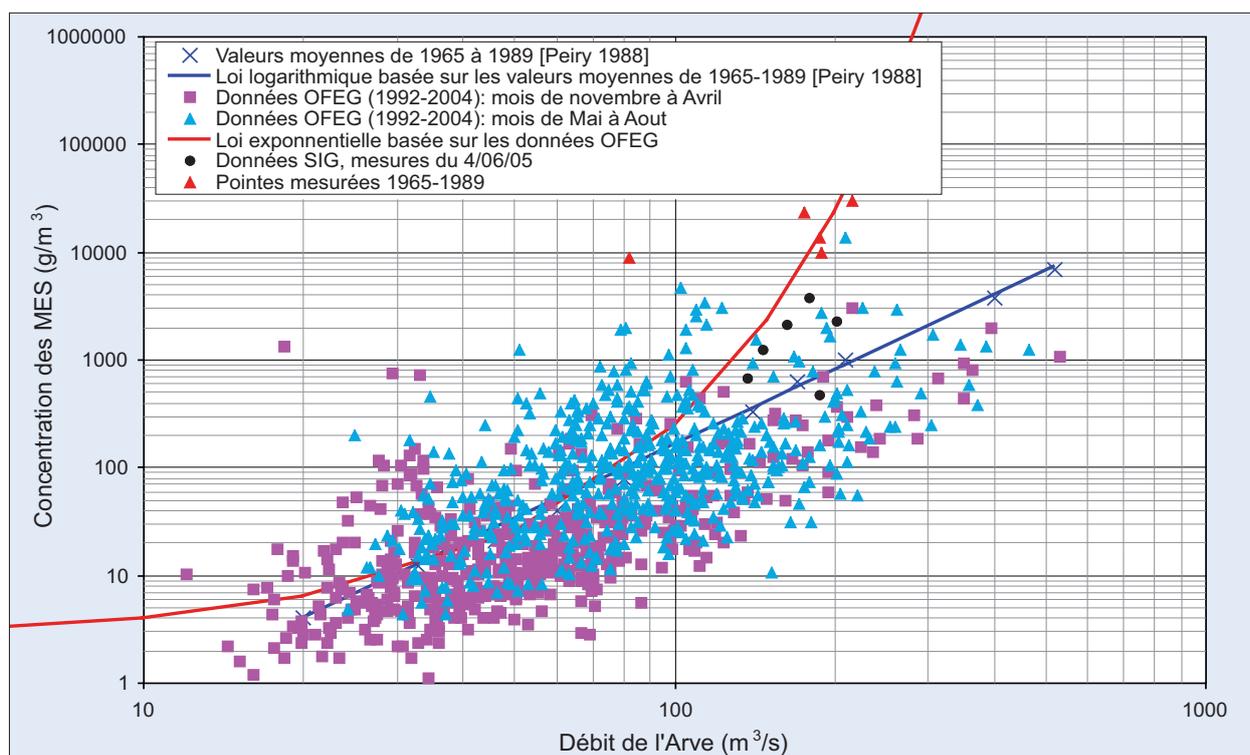


Fig. 2: Mesures de matières en suspension (concentration des MES) dans l'Arve (Aquavision 2006).

situent entre 0.01 et 0.20 mm, ce qui correspond à des sables fins et des limons sableux (CEMAGREF 1993; Perroud 2000). Le taux de matériaux cohésifs (argiles) est très faible. Lors des crues, les diamètres de grain se déposant dans la retenue sont entre 0.20 mm au barrage de Verbois jusqu'à 0.70 mm à la Jonction.

Transport solide par charriage

Le charriage de l'Arve dans sa partie helvétique a toujours été largement influencé par le régime naturel et les opérations d'extractions du gravier en amont en France voisine. Il y a un siècle environ, le volume moyen annuel transporté par charriage a été estimé à 150 000 m³, tandis que des extractions massives et systématiques des deux côtés de la frontière ont depuis conduit à un manque de matériaux graveleux dans l'Arve de l'ordre de 10 mio. m³ (Peiry 1988). Dans l'état actuel, le charriage de l'Arve en amont de Genève est estimé à environ 60 000 m³ par an (Peiry 1988).

D'après les profils en travers dans l'Arve (SIG) juste en amont de la Jonction depuis 1944 jusqu'à ce jour, il s'avère que le fond de l'Arve est en léger rehaussement. Néanmoins, de par le déficit énorme de matériaux graveleux en amont, un retour massif du gravier à la Jonction n'est pas à l'ordre du jour pour l'instant. Ainsi, les calculs de cette étude ne tiennent compte que des matières en suspension comblant la retenue de Verbois.

Morphologie de la retenue de Verbois

La morphologie de la retenue de Verbois est dictée par un fonctionnement cyclique triennal contenant des opérations de chasses (pendant une semaine environ) combinées avec des périodes d'accumulation des MES sur 3 ans en moyenne. Ainsi, les chasses effectuées depuis 1942 ont permis d'évacuer entre 1.0 et 1.4 mio. de m³ de matériaux en moyenne par chasse. Les matériaux évacués se sont déposés principalement le long des quelques derniers km de la retenue juste en amont du barrage de Verbois, tandis que la partie amont de la retenue est peu influencée. L'évacuation se fait principalement sous forme d'érosion des talus de sédiments fins formés à l'intérieur des courbes du Rhône. L'analyse détaillée des profils bathymétriques avant et après les chasses (Aquavision 2006) a révélé que les endroits de dépôts et d'érosion dans

la retenue restent toujours les mêmes au fil des années. De plus, avec des volumes déposés entre deux chasses de l'ordre de 0.98 à 1.37 mio. de m³, l'efficacité des chasses atteint environ 89% (Geos 2000). De ce fait, après plus de 60 ans de fonctionnement et de chasses triennales, la retenue de Verbois n'a perdu que 18% de son volume utile initial. Grâce à l'optimisation continue des opérations de chasse durant ces 20-25 dernières années, le volume utile résiduel est resté plus ou moins constant.

Méthodes d'analyse

L'analyse de l'évolution hydraulique et morphologique de la retenue de Verbois dans un horizon de 50 ans avec ou sans les chasses triennales est basée sur des méthodes analytiques et numériques. Les méthodes analytiques utilisent des expressions qui reposent soit sur le principe d'une vitesse critique de mise en mouvement des sédiments, soit sur le principe d'une contrainte de cisaillement critique. Ces méthodes sont faciles d'application et fournissent une vision globale des phénomènes. Les méthodes numériques permettent d'obtenir une appréhension plus détaillée de la morphologie de la retenue. Ceci nécessite néanmoins une grande quantité de données de base ainsi que des temps de calcul onéreux pour des évaluations sur le long terme. Dans ce qui suit, plusieurs expressions analytiques sont appliquées et comparées avec deux modèles numériques particulièrement adaptés à la présente problématique, CCHE-1D (1D) (NCCHE, Mississippi, Etats-Unis) et MIKE-21C (quasi-3D) (Danish Hydraulic Institute, Copenhague, Danemark).

Méthodes analytiques

Les critères de mise en mouvement des particules sont basés soit sur une vitesse critique, soit sur une contrainte de cisaillement critique. Ce dernier est considéré comme le plus fiable. Plusieurs critères ont

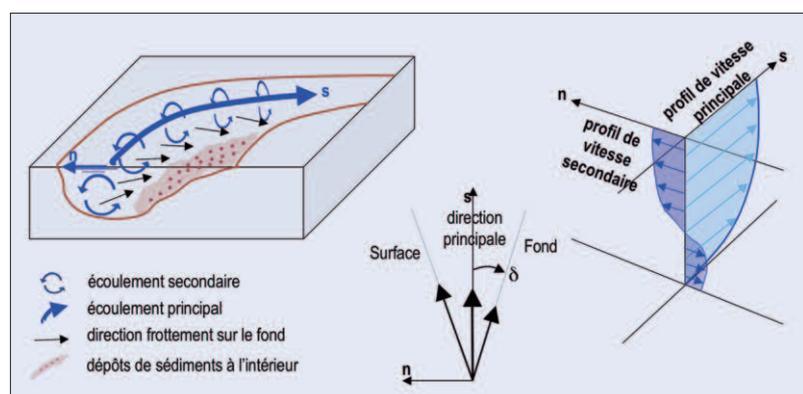


Fig. 3: Ecoulement secondaire dans une courbe du cours d'eau.

été appliqués ici en utilisant les diamètres d_{50} et d_{90} . Il convient de mentionner que ces méthodes ne tiennent pas compte des effets hélicoïdaux de l'écoulement dans les courbes du Rhône, tel qu'expliqué ci-après pour les méthodes numériques.

Méthodes numériques

La modélisation numérique a été effectuée avec le modèle MIKE-21C du DHI (Danish Hydraulic Institute). Le logiciel MIKE-21C est composé d'une suite de modules permettant de simuler les écoulements et le transport solide en quasi-3D. Le modèle tient compte d'une manière pragmatique et efficace des effets 3D des écoulements primaires et secondaires et de la morphologie de fond y relative dans les courbes du cours d'eau (voir figure 3). Le modèle utilise un maillage orthogonal et curvilinéaire résolu selon un schéma numérique implicite à différences finies. Le module hydrodynamique résout les équations complètes de Barré de St. Venant (continuité et quantité de mouvement) dans les deux directions horizontales et intégrées sur la verticale. A cette approche à caractère 2D se rajoutent des effets quasi-3D, tels que le profil vertical des vitesses primaires et la simulation de l'écoulement secondaire (hélicoïdale) dans les courbes du cours d'eau. Le module de transport solide permet de simuler en 2D le transport solide par charriage et en suspension. Pour la capacité du transport solide, les expressions de Engelund & Hansen (1967) et de Van Rijn (1984) ont été appliquées. Le transport solide non-équilibré, apparaissant typiquement pour le transfert de particules fines, est simulé à l'aide d'un modèle de convection-dispersion (intégré sur la verticale) qui représente le transport et la distribution verticale des particules en suspension et de l'écoulement même.

Un écoulement secondaire apparaît généralement dans un écoulement incurvé, typiquement dans les courbes des cours d'eau. Le phénomène a une influence potentiellement très importante sur la morphologie du cours d'eau. Proche du fond, l'écoulement secondaire est dirigé vers le centre du lit, tandis qu'à la surface, l'écoulement est orienté vers la rive extérieure. Les principales caractéristiques sont illustrées à la figure 3. Le modèle calcule l'intensité de l'écoulement secondaire, qui dépend du rayon de courbure des lignes de courant, de la profondeur d'eau et de la vitesse d'écoulement principal. L'écoulement secondaire influence le transport solide puisqu'il modifie l'orientation de la contrainte de cisaillement sur le fond. Cette approche simplifiée des écoulements secondaires s'est avérée efficace et fiable dans de nombreux projets de l'ingénierie pratique. La mise en œuvre dans le présent projet des profils de vitesses primaire et secondaire est essen-

tielle pour exprimer les effets 3D (courbes) de la retenue de Verbois. Ainsi, les résultats attendus peuvent être fondamentalement différents de ceux de la modélisation 1D.

Résultats et discussion

Définition des scénarios d'étude

L'objectif principal de l'étude était la prédiction des changements futurs de la morphologie de la retenue de Verbois sur le long terme, avec ou sans les chasses. Plusieurs scénarios ont été définis et calculés, chaque scénario correspondant à un futur fonctionnement potentiel de la retenue de Verbois:

Scénario 1: Maintien des chasses tous les 3 ans

Scénario 1b: Maintien des chasses tous les 6 ans

Scénario 2: Abandon des chasses (= scénario passif)

Scénario 2b: Remplacement des chasses par des dragages (=scénario passif avec intervention)

Scénario 2t: Ouverture du Seujet lorsque $Q_{Arve} > 120 \text{ m}^3/\text{s}$ (= scénario actif seujet)

Scénario 3: Abaissement de 2 m de la retenue lorsque $Q_{Verbois} > 620 \text{ m}^3/\text{s}$ (= scénario actif crue)

Scénario 3b: Abaissement planifié de 4m de la retenue en moyenne 1 semaine par année (=scénario actif planifié)

Toute évolution morphologique significative du fond de la retenue est définie ci-après comme faisant partie de l'état transitoire de la retenue. Cette évolution morphologique devrait tôt ou tard retrouver un nouvel équilibre, appelé généralement un équilibre «dynamique». Le terme dynamique signifie que des modifications du fond de la retenue sont toujours probables, par contre ces modifications interviennent uniquement après des événements de crue importants ou suite à une manipulation anthropique importante au barrage de Verbois. De plus, ces modifications ne sont plus à caractère progressif et unidirectionnel dans le temps et dans l'espace. Au contraire, des périodes de comblement et d'érosion peuvent s'alterner et oscillent en général autour d'une situation de fond moyenne, appelée la morphologie «d'équilibre». Comme pour les cours d'eau, chaque retenue a forcément une morphologie d'équilibre. Cet équilibre dépend largement des conditions d'exploitation de la retenue. Les questions prépondérantes formulées comme objectifs au début peuvent donc être reformulées comme suit:

- 1. Quelle serait la nouvelle morphologie d'équilibre des retenues sans chasses futures?
- 2. Dans combien de temps risque-t-on de trouver ce nouvel équilibre dynamique?

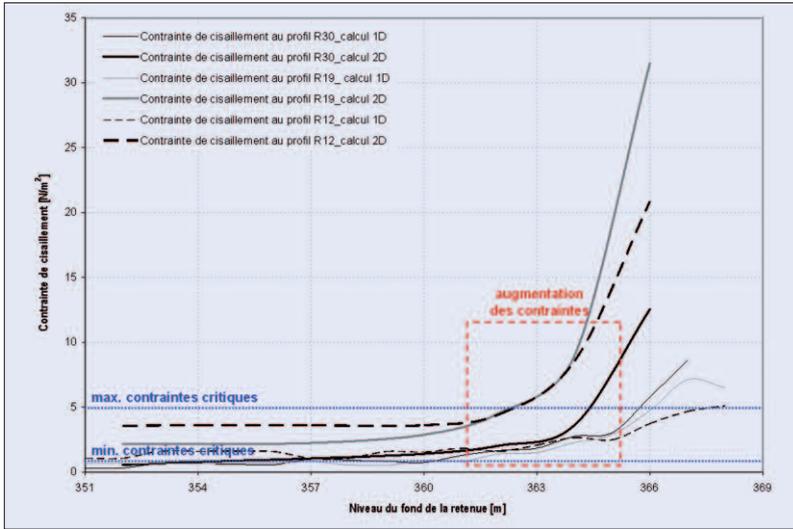


Fig. 4: Comparaison des contraintes de cisaillement pour différents niveaux du fond de la retenue et pour un débit annuel moyen de 400 m³/s (pour le scénario 2, profils localisés à la figure 5).

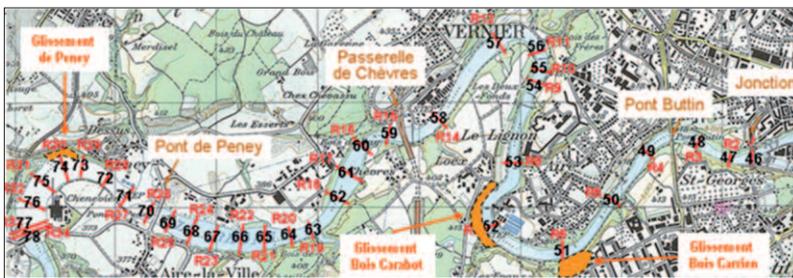


Fig. 5: Profils en travers du tronçon 3 (Junction – Verbois).

fond de la retenue sur les vitesses et contraintes de cisaillement pour un débit donné. Les résultats pour les contraintes sont illustrés à la figure 4. Celle-ci montre une augmentation brusque des contraintes à partir de niveaux de fond de 361 msm pour la partie amont de la retenue (profil R12) et à partir de 364 msm pour la partie aval de la retenue (proche du barrage, profil R30). Dans la partie aval, les contraintes critiques sont de l'ordre de 0.5 N/m², ce qui résulte en un niveau d'équilibre du fond qui est très bas a priori. Ceci indique que l'état d'équilibre du fond de la retenue pourrait se situer autour d'un niveau de 363 msm dans la partie amont, tandis que la partie aval devrait actuellement déjà se trouver dans un état d'équilibre.

- 3. Ce nouvel équilibre permet-t-il de continuer l'exploitation des retenues?
- 4. Quelles sont les nouvelles lignes d'eau à Genève pour cet état d'équilibre? Y aura-t-il un risque d'inondation ailleurs?
- 5. Pourrait-on intervenir lors de la phase transitoire afin de retrouver un état d'équilibre sans chasses acceptable sur le long terme et si oui comment?

Modélisation numérique de la retenue de Verbois

Tous les 6 scénarios ont été modélisés sur une période de 48 ans. Pour obtenir des conditions de bord sur cette période, le panel de données à disposition sur 6 ans (mesures in situ de 1997 à 2003) a été répété 8 fois. La période 1997-2003 est considérée comme pleinement représentative des conditions hydraulique, hydrologique et morphologique de la retenue de Verbois. Les résultats des calculs numé-

Modélisation analytique de la retenue de Verbois

Seul le scénario 2 a été considéré dans ce modèle. Les vitesses d'écoulement et les contraintes de cisaillement ont été calculées pour un débit de 400 m³/s. Ces calculs ont été effectués pour des fonds de retenue fictifs et positionnés à différents niveaux absolus (entre 350 et 368 msm). Ainsi, ces calculs permettent-ils de manière très simple de mettre en évidence l'influence du niveau du

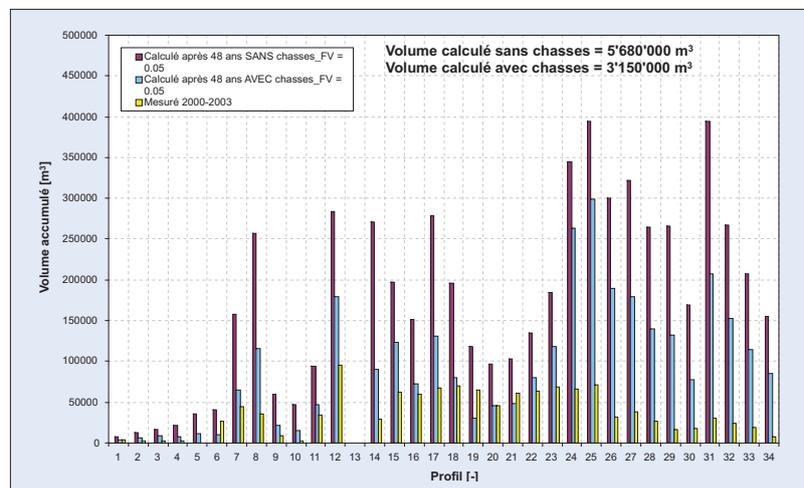


Fig. 6: Comparaison des volumes déposés dans la retenue après 48 ans AVEC ou SANS chasses.

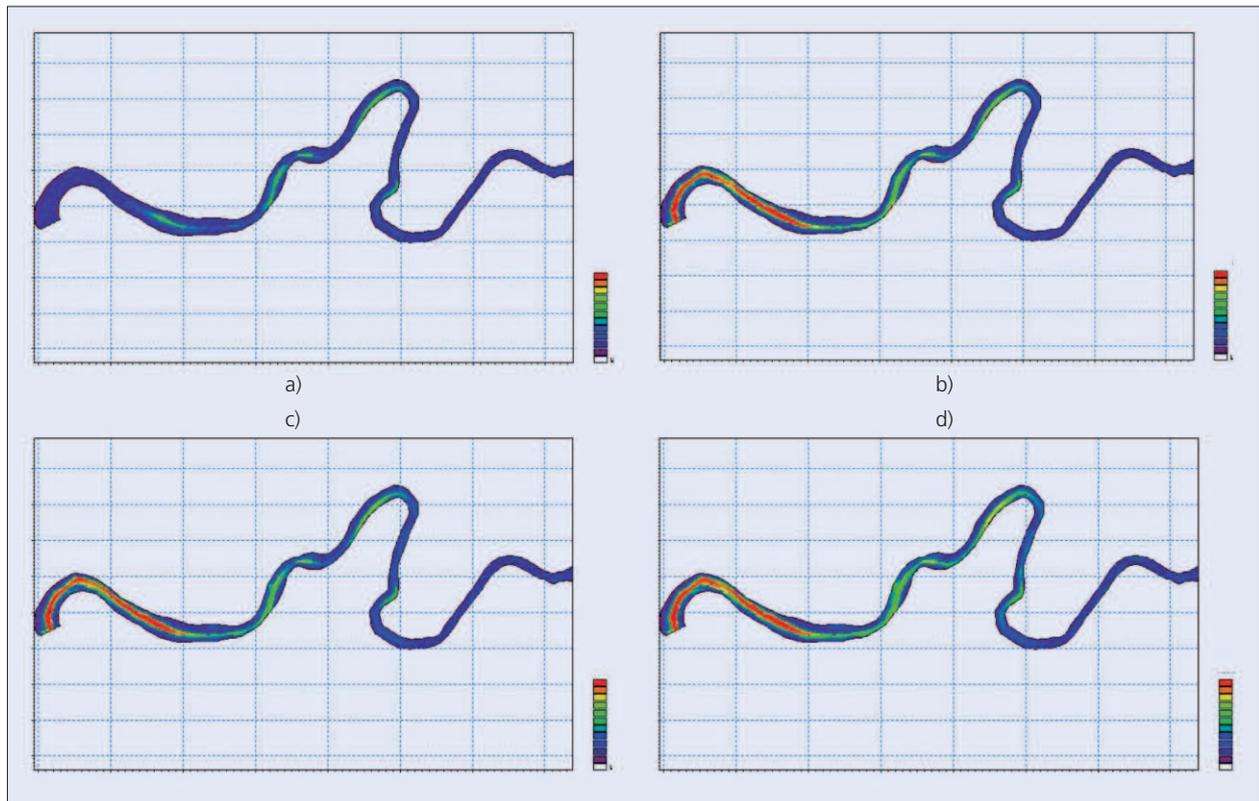


Fig. 7: Evolution temporelle des zones de dépôt dans la retenue pour le scénario sans chasses: a) après 3 ans; b) après 12 ans; c) après 24 ans; d) après 48 ans. Echelle des profondeurs d'accumulation de 0 m (bleu foncé) à 10 m (rouge)

riques sont représentés aux profils en travers R1 (Jonction) à R34 (barrage de Verbois) localisés à la figure 5:

La figure 6 compare les volumes accumulés (en m^3) dans la retenue après 48 ans selon les scénarios 1 (maintien des chasses) et 2 (abandon des chasses). Les barrettes représentent les volumes entre deux profils consécutifs pour les profils en travers allant de la Jonction (R1) au barrage de Verbois (R34). Le pas de temps des calculs est de 10 min. et l'expression théorique de transport solide utilisée est la formule de Van Rijn (1984). Les diamètres de grain considérés dans les calculs étaient de 0.02 et 0.10 mm respectivement. La quantité de matières en suspension injectée en amont du modèle numérique pendant 48 ans suit la relation de Peiry (1988) (Fig. 2). La figure 6 montre premièrement que la majeure partie des sédiments se dépose dans la partie aval de la retenue, du profil R21 au profil R34. Très peu de dépôts se forment sur les premiers profils. En termes de volumes totaux déposés sur 48 ans, la différence entre les deux scénarios est remarquable avec $\sim 3'150'000 m^3$ de dépôts avec chasses et $\sim 5'700'000 m^3$ de dépôts sans chasses.

De la même manière, la figure 7 illustre l'évolution temporelle des zones de dépôts de la retenue pour le scénario sans chasses triennales. L'échelle des pro-

fondeurs d'accumulation de sédiments s'étend de 0 m (couleur bleu foncé) à 10 m (couleur rouge). Après 3 ans sans chasses, c'est principalement à l'intérieur des courbes que s'accumulent les sédiments. Après 12 ans sans chasses, la partie aval de la retenue commence à se combler de manière significative. Cette tendance continue sur le plus long terme. Quasi aucun dépôt ne se forme en amont du point PK 8.2. La figure 8 résume l'évolution morphologique globale de la retenue lors des 48 ans de calcul pour tous les scénarios. Seul le volume total d'accumulation de la retenue est représenté. Il s'avère qu'un dragage régulier du fond de la retenue ne permet pas d'obtenir un volume total de sédiments accumulés inférieur à celui obtenu dans l'absence de futures chasses. De la même façon, le scénario avec chasses tous les 6 ans est inapproprié avec un volume total accumulé de l'ordre de 5 mio. de m^3 sur 48 ans. Le scénario actif Seujet a un volume total accumulé de 4,7 mio de m^3 .

Seulement des scénarios actifs sont capables de diminuer de manière significative le volume total accumulé sur 48 ans. Ainsi, le scénario avec abaissement de 2 m pour des débits à Verbois au-dessus de $620 m^3/s$ (environ 1 mois par année en moyenne) et le scénario avec un abaissement programmé de 4m pendant une semaine par année permettent une stabilisation de ce volume total accumulé à environ 4 mio. de m^3 .

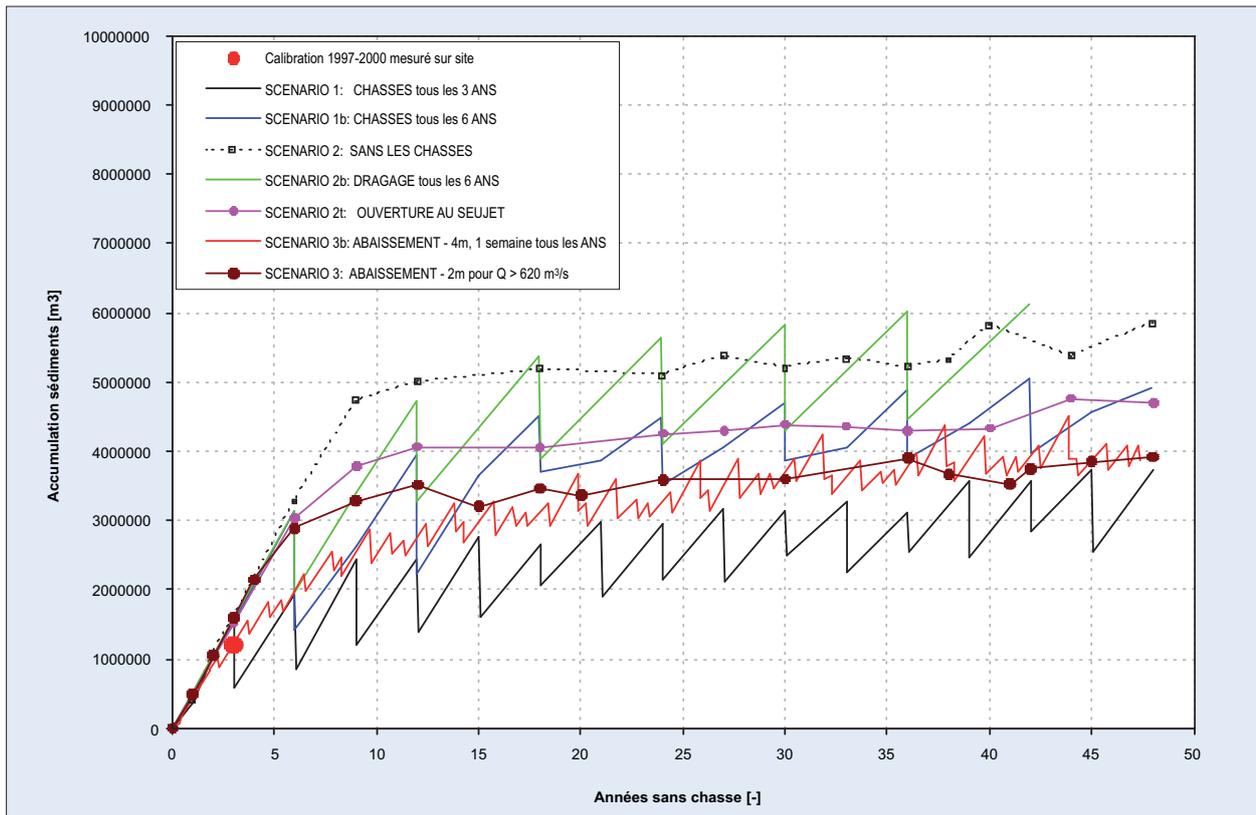


Fig. 8: Evolution temporelle du volume total accumulé dans la retenue pour tous les scénarios calculés.

Pour tous les scénarios calculés, la tendance asymptotique vers un nouvel état d'équilibre morphologique dynamique de la retenue est clairement visible. Dans le scénario avec l'absence de futures chasses, un état d'équilibre est atteint après environ 10 à 15 ans, tandis que, pour le scénario avec maintien des chasses, la tendance ne se stabilise pas entièrement, même après 48 ans de calcul.

L'importance de cette tendance asymptotique est soulignée en reportant sur l'échelle du temps la période 1942-2000, i.e. les volumes totaux accumulés mesurés dans la retenue dans le passé à partir des relevés bathymétriques (Fig. 9).

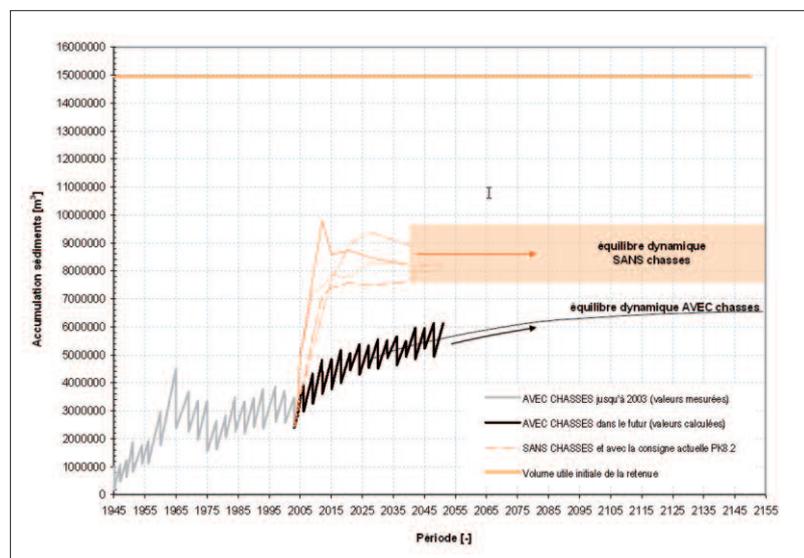
Influence sur les lignes d'eau à la Jonction

L'évolution morphologique du fond de la retenue, telle que décrite ci-dessus pour les différents scénarios, a des répercussions importantes sur les lignes d'eau depuis le

barrage de Verbois jusqu'à la digue de Reichlen environ 1 km en amont de la Jonction. Ainsi, un comblement de la retenue provoque un rehaussement des lignes d'eau vers l'amont. Il peut en résulter un accroissement du risque d'inondations à la Jonction, au centre de Genève.

La figure 10 compare les lignes d'eau pour les scénarios prépondérants pour un débit de crue de 1'400 m³/s. Le scénario sans chasses montre un

Fig. 9: Evolution temporelle du volume total accumulé dans la retenue pour les scénarios AVEC et SANS les chasses et en tenant compte du volume accumulé dans le passé.



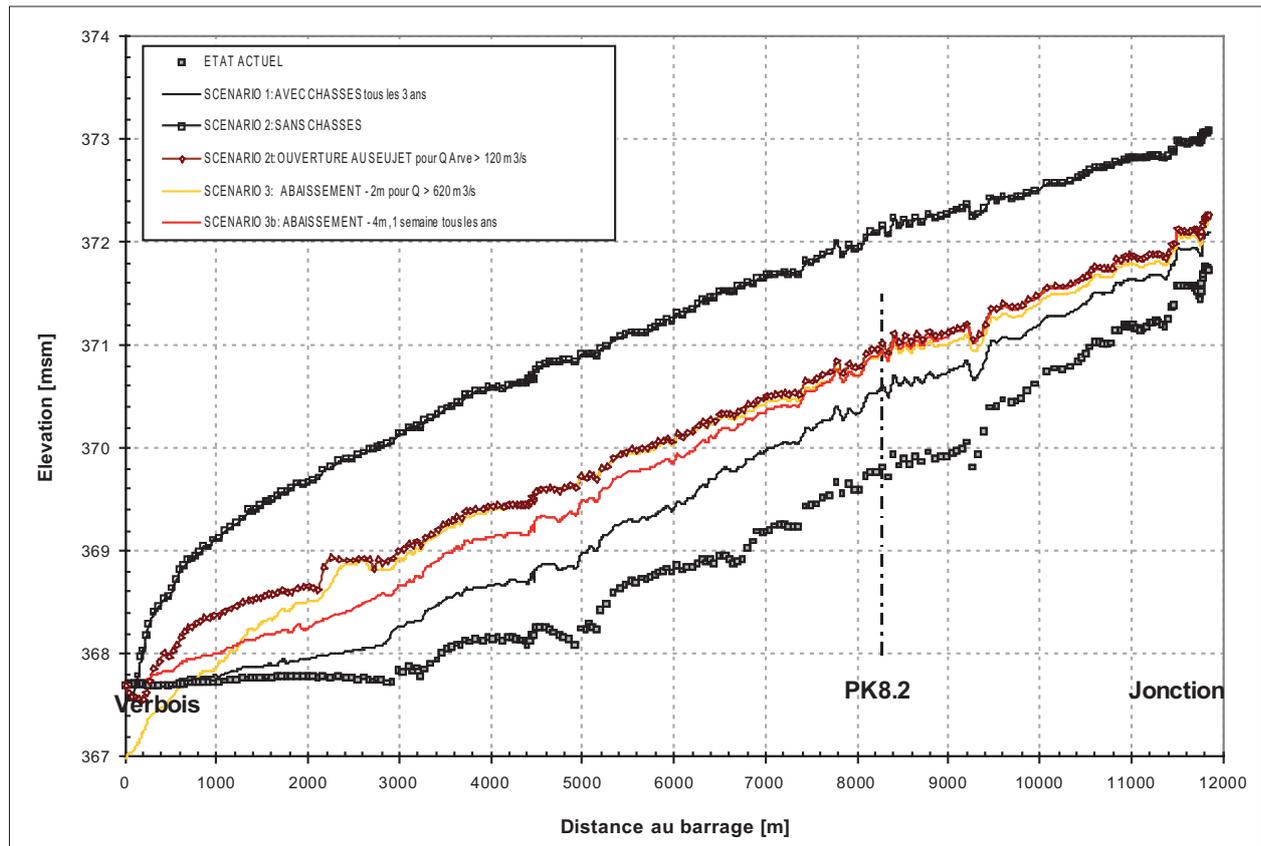


Fig. 10: Lignes d'eau entre le barrage de Verbois et la Jonction pour les scénarios prépondérants et pour un débit de 1400 m³/s.

rehaussement important de la ligne d'eau à la Jonction (~ 1.40 m). Il convient néanmoins de mentionner que les niveaux d'eau extrêmes obtenus à la Jonction ne tiennent pas compte de l'influence positive éventuelle du niveau du Lac Léman, généralement situé entre 371.50 msm et 372.30 msm. Ainsi, une inversion de l'écoulement depuis la Jonction vers le Lac Léman n'a pas été modélisée. Même si une telle inversion permettait de diminuer les niveaux d'eau, d'importantes inondations ne seraient pas exclues.

Les scénarios actifs (3 et 3b) ont un niveau d'eau à la Jonction qui serait très proche du niveau d'eau qu'on obtiendrait tout en maintenant les chasses triennales actuelles. En d'autres termes, même en maintenant la situation actuelle de chasses, une légère augmentation du niveau d'eau lors des crues (~40 cm) ne peut être évitée dans le futur.

Conclusions

En guise de conclusion, les réponses suivantes ont été trouvées aux questions de base posées comme objectif principal de la présente étude:

Quels sont les risques en cas d'un abandon des chasses triennales?

Le risque d'inondations à la Jonction est réel et devra être géré de manière appropriée. De plus, un risque de comblement des vannes de fond du barrage de Verbois existe.

Quels sont les arguments en faveur d'un maintien des chasses?

Maintenir les chasses pourrait a priori avoir un intérêt significatif. Néanmoins, l'intérêt réel dépend de la plausibilité de solutions alternatives aux chasses, telles que par exemple une modification de la consigne d'exploitation lors des crues ou encore un abaissement annuel programmé pendant une semaine. Ces deux alternatives démontrent a priori une efficacité quasi similaire à celle des chasses triennales.

En cas d'abandon des chasses, quelles seraient les mesures d'accompagnement à mettre en œuvre?

A part une gestion active (abaissement de la retenue lors des crues) ou passive (protection contre les inondations) du risque d'inondation à la Jonction et une fréquence d'opération plus élevée des organes de sécurité afin d'éviter leur comblement, un certain nombre de structures hydrauliques le long de la rete-

nue devrait être adapté pour éviter tout problème de fonctionnement et/ou de comblement par des sédiments. Quelques exemples sont les multiples prises d'eau le long des berges ou encore les vannes de fond du barrage de Verbois. Pour la navigation, un chenal de 4-5 m de profondeur et une largeur de l'ordre de 50 m subsisterait.

La garantie du bon fonctionnement de ces structures nécessiterait la détection et le suivi régulier de l'ensablement du fond de la retenue, notamment à l'intérieur des courbes et à l'approche du barrage de Verbois. Le suivi régulier de la bathymétrie en général permettrait de suivre de près l'évolution morphologique de la retenue et de l'arrivée imminente de graviers à la Jonction lors des crues de l'Arve. Le cas échéant, une solution durable se doit d'être trouvée afin d'éviter des inondations à la Jonction, indépendamment de la gestion de la retenue même.

Etat futur de la retenue sans les chasses

Les résultats des calculs de l'évolution morphologique sur le long terme de la retenue de Verbois mènent au constat suivant: dans l'absence de futures chasses, le comblement de la retenue va progresser relativement vite durant les premières 10-15 ans, suivi par un ralentissement pour atteindre de manière asymptotique un nouvel état d'équilibre dynamique morphologique. Ce nouvel état d'équilibre correspondra à un comblement des zones mortes, i.e. les parties intérieures des multiples courbes et les zones actuellement à largeur considérable. Le volume total comblé à Verbois serait ainsi de l'ordre de 8 à 9 mio. m³, soit un comblement de 55-60% du volume initial total de la retenue. Or, ce nouvel état d'équilibre permettrait a priori de continuer l'exploitation à Verbois, mais ne pourra pas exclure des problèmes d'inondation à la Jonction lors de futures crues.

Ainsi, une gestion de la future morphologie de fond s'impose. Cette gestion pourrait être imaginée, soit sous forme d'une gestion passive des risques d'inondations (p. ex. par des rehaussements locaux le long des rives), soit sous forme d'une gestion active, p. ex. par une modification des consignes d'exploitation actuelles lors des crues ou encore un abaissement annuel programmé pendant plusieurs jours. Il convient de mentionner qu'un maintien des chasses triennales permettrait d'éviter des inondations à la Jonction et représente donc, des points de vue hydraulique et morphologique seuls, une gestion appropriée.

Fin d'exploitation du barrage de Verbois

La question du transfert vers l'aval des volumes de sédiments accumulés dans les retenues se posera dans tous les cas à la fin d'exploitation, même en maintenant les chasses actuelles. Un arrêt des chasses rendra ce transfert toutefois plus encombrant dans le temps et l'espace, de par des volumes à transférer plus importants. Une solution pourrait consister en un abaissement progressif du niveau d'eau de la retenue, abaissement qui pourrait s'étaler sur plusieurs années. Ceci permettrait d'adapter la morphologie du fond à des états d'équilibre intermédiaires acceptables pour l'environnement, permettant de gérer l'influence sur la nappe phréatique et la stabilité des versants de la retenue. Les implications détaillées pour l'aval d'une telle opération, telles que programme et durée d'abaissement, volumes de sédiments déplacés et concentrations en MES lors des crues, ne font pas partie de la présente étude. Elles devraient faire l'objet d'une optimisation numérique appropriée.

Références

- **AQUAVISION ENGINEERING** 2006. Etude hydraulique et morphologique de la retenue de Verbois – Rapport de synthèse, Ecublens.
- **CEMAGREF, GROUPEMENT DE LYON** 1993. Chasse des retenues de Verbois et Chancy-Pougny – Caractérisation des matières en suspension. Concentrations métalliques de l'eau et des MES.
- **DANISH HYDRAULIC INSTITUTE** 2004. MIKE-21C Reference Manual.
- **ENGELUND F, HANSEN E.** 1967. A monograph on sediment transport in alluvial streams. Teknisk Forlag. Copenhagen, Denmark.
- **GEOS INGÉNIEURS CONSEILS SA** 2000. Retenue de Verbois – Etude des lignes d'eau du Rhône en cas de suppression des chasses- Rapport n° 1092-502.
- **GICOT O.** 1989. Barrage de Verbois: Rapport sur les crues et leurs conditions d'évacuation, Fribourg.
- **PEIRY JL.** 1988. Approche géographique de la dynamique spatio-temporelle des désiments d'un cours d'eau intra-Montagnard : l'exemple de la plaine alluviale de l'Arve (Hte-Savoie). Thèse présentée à l'université de Jean Moulin, Lyon 3, France.
- **SIG CENTRE DE GESTION HYDRAULIQUE ET SOCIÉTÉ DES FORCES MOTRICES DE CHANCY-POUGNY** 2003. Campagne 2003 Protocole de Chasse, Tome I, Hydraulique.
- **PERROUD A.** 2000. Etude sédimentologique et géochimique des sédiments de la retenue de Verbois (Genève). Mémoire de diplôme n°49, Université de Genève, Université de Lausanne.
- **VAN RIJN** 1984. Sediment transport, part II, suspended load transport. J. of Hydr. Division, ASCE, 110: 1613-1641.