

# Gestion des retenues genevoises: morphologie et monitoring

Damien SIDLER<sup>1</sup>, Seydina DIOUF<sup>1</sup>,  
Carole NAWRATIL DE BONO<sup>1</sup>, Sylvie POUCHOL BAUDIER<sup>1</sup>

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

## | Abstract

**Geneva's dam management: morphology and monitoring.**- Historical data put in evidence that the main aim of flushing events on the Rhône river downstream of Geneva since 1900 was to deal with huge quantities of gravel carried by the Arve river River (80 000 m<sup>3</sup>/year). Since the early 30's, with the decrease of gravel, input the aim of flushing became the evacuation of fine grained sediments, deposited from suspension, to preserve sufficient bed slope to evacuate gravel in the case of return of bed load. Indeed, such a situation is likely to occur, as the extraction of gravel quarries on the Arve river stopped in 1983. Today, the Verbois reservoir morphology still guarantees the evacuation of gravel. However, the absence of any further flushing could limit the transit of the gravel on the long term.

Gravel and suspended sediment management can be performed by different ways modifying water level, discharge and direct modifications in the Rhône river bed, such as dredging. Also, the choice of the best sediment management method is difficult because of the complexity of the «Rhône system». Multicriteria analysis helps to select the best possible solution. A monitoring to define scientifically the state of the Rhône river and the Verbois reservoir is currently set up. The selected method will allow to measure in an objective way the consequences of reservoir management according to the criteria of sustainable development.

**Keywords:** Sediment management, gravel transit, river bed slope, sediment flushing Rhône river, Geneva, Chèvres dam, Verbois dam, monitoring.

## | Résumé

L'objectif principal des vidanges-chasses réalisées sur le Rhône genevois depuis 1900 était le transit d'importantes quantités de graviers charriés par l'Arve (80 000 m<sup>3</sup>/an). Depuis les années 1930, avec la diminution des volumes de gravier, le but des chasses est devenu l'évacuation des limons afin de maintenir une pente suffisante dans le lit du Rhône en cas de retour du gravier. Or, cette situation est à prévoir du fait de l'arrêt depuis 1983 de plusieurs gravières sur l'Arve. Aujourd'hui, la morphologie du lit du Rhône semble pouvoir permettre encore le transit du gravier lors des chasses, mais un abandon actuel de ces dernières risque de limiter son transit sur le long terme.

La gestion du gravier et celle des MES peut se faire de plusieurs façons en modifiant les niveaux d'eau, les débits et les interventions directes sur le lit du Rhône. Le choix d'un mode de gestion des sédiments est très difficile du fait de la complexité du «système Rhône». L'analyse multicritère apporte la méthodologie nécessaire pour la sélection du meilleur compromis possible.

La mise en place d'un système de suivi permettant de définir scientifiquement l'état du Rhône et son évolution est en cours. Ainsi lorsqu'un mode de gestion des sédiments sera retenu, ce monitoring du Rhône permettra de mesurer ses conséquences selon les axes du développement durable.

**Mots clefs:** gestion des sédiments, transit du gravier, pentes moyennes du lit du Rhône, vidanges, chasses, barrage de Chèvres, barrage de Verbois, monitoring.

**Abréviations:** MES: matières en suspension; SIG: Services Industriels de Genève; Q: débit

---

<sup>1</sup> Cellule Environnement Rhône, Services Industriels de Genève (SIG), Site de Verbois, case postale 18, CH-1288 Aire-la-Ville  
Tél: +41 22 727 43 21 – damien.sidler@sig-ge.ch

## Introduction

### Le dispositif Seujet-Verbois-Chancy à la confluence du Léman et de l'Arve

Genève est située à l'extrémité du lac Léman. Son émissaire, le Rhône, reçoit au centre de la ville un affluent important issu de la chaîne du Mont-Blanc, l'Arve.

A l'origine, les centrales du Rhône genevois étaient exploitées au fil de l'eau, sans aucune modulation des débits issus du Léman. La modulation dite simple (ré-tention en heures creuses et le week-end, évacuation en heures pleines) a été introduite au milieu des années 70 afin de permettre à la communauté genevoise d'économiser sur les achats d'énergie électrique auprès d'Energie Ouest Suisse (EOS). L'optimisation de la gestion hydraulique du Rhône genevois passe ensuite par l'introduction d'une modulation plus fine, dite double (évacuation en heures pleines accompagnée d'une accentuation en heures de pointe), rendue possible par l'ouvrage du Seujet dès la mise en fonction du barrage en 1994. Le niveau du lac n'est pas affecté de façon sensible. En effet, il faudrait un débit différentiel de 67 m<sup>3</sup>/s pendant 24 heures pour faire varier d'un centimètre le niveau du Léman, dont la superficie est de 582 km<sup>2</sup>.

Ces lâches, renforcées par les apports de l'Arve (non régulés), descendent le Rhône et sont valorisées par les aménagements hydroélectriques de Verbois (21 m de chute, mise en service en 1942) et de Chancy-Pougny (10 m de chute, construction 1925), avant de rejoindre les ouvrages du territoire français.

Dans la gestion hydraulique Léman-Rhône genevois, la priorité revient à la régularisation des niveaux du lac Léman. La consigne d'exploitation du lac qui relève de la Convention intercantonale de 1884 (reconduite en 1984) est fixée dans le «règlement du barrage du Seujet». Elle consiste en un abaissement du lac en hiver afin qu'il puisse emmagasiner les eaux de fonte des neiges sans rehaussement excessif. Le rè-

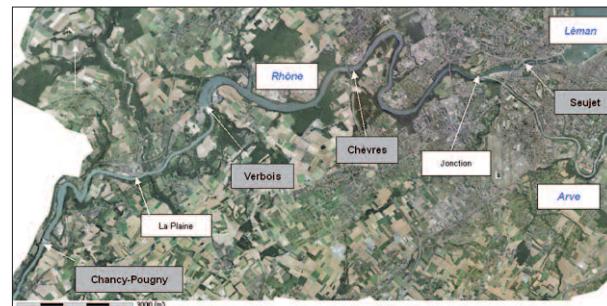


Fig. 1: Vue partielle du Lac Léman, de l'Arve et du Rhône genevois avec les différentes installations hydroélectriques qui se situent sur le territoire du canton de Genève (source: SITG – Système d'information du Territoire Genevois)

gement du barrage du Seujet et les modalités relatives à ce règlement fixent, en outre, les limites de cette modulation double.

D'autre part, les règlements des barrages de Verbois et de Chancy-Pougny fixent des contraintes concernant leur exploitation respective (vitesses d'abaissement, niveau maximum, ...).

### La gestion sédimentaire sur le Rhône genevois

Dès la construction du barrage de Chèvres en 1896, les sédiments du Rhône genevois n'ont cessé de susciter des inquiétudes liées au fonctionnement de l'usine hydroélectrique et aux risques d'inondation, car de grandes quantités de matériaux proviennent de l'Arve lors des crues. A Chèvres, les sédiments furent tout d'abord gérés selon un «régime de retenue réduite» consistant en un abaissement du niveau de la retenue en fonction de l'augmentation du débit du fleuve. Cette méthode se révéla peu efficace pour faire transiter les sédiments et, dès 1900, des vidanges accompagnées de chasses furent pratiquées.

L'utilisation de la force motrice hydraulique du Rhône est réglementée depuis 1892 par une concession accordée par l'Etat de Genève à SIG. La concession pour Verbois (Loi 7395 du 5 octobre 1973) oblige à un

Tableau 1: Quelques données hydrologiques de l'Arve et du Rhône (Q1= débit pour une crue annuelle, Q10=débit pour une crue décennale, Q100=débit pour une crue centennale)

Données hydrauliques et sédimentaires	Arve	Rhône (Jonction)
Débit d'étiage	21 m <sup>3</sup> /s	50 m <sup>3</sup> /s
Débit moyen	79 m <sup>3</sup> /s	337 m <sup>3</sup> /s
Q1	400 m <sup>3</sup> /s	850 m <sup>3</sup> /s
Q10	700 m <sup>3</sup> /s	1050 m <sup>3</sup> /s
Q100	1200 m <sup>3</sup> /s	1450 m <sup>3</sup> /s
MES	715 000 m <sup>3</sup> /an	négligeable
Gravier	0 - 60 000 m <sup>3</sup> /an	0

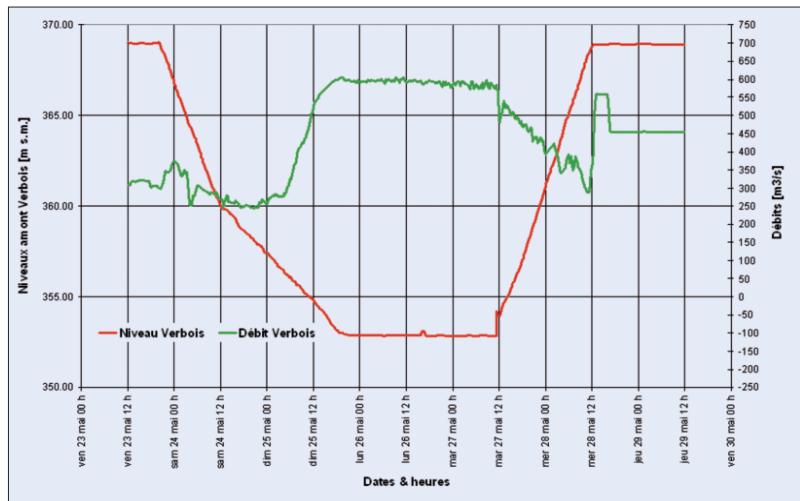


Fig. 2: Evolution des niveaux d'eau et des débits lors de la vidange/chasse à Verbois de 2003.

entretien du lit et des berges sur la section concédée. Elle propose des dragages ou des chasses pour éviter un alluvionnement excessif.

Depuis la mise en eau du barrage de Verbois (1942), les vidanges-chasses se déroulaient sur une période de 5 jours, selon le mécanisme suivant:

- Une première phase d'abaissement du plan d'eau ou vidange accompagnée d'une augmentation graduelle du débit jusqu'à l'atteinte du débit de chasse maximum.
- Une phase de chasse à proprement dite (ou purge) à retenue vide, le niveau de retenue et le débit étant constants.
- Une phase de remontée de la retenue avec réduction du débit.

Malgré les mesures de minimisation des impacts mises en place (sur le long terme et pendant chaque événement) par SIG, les chasses engendrent des dégâts considérables sur l'environnement: d'une part, à cause de l'abaissement des lignes d'eau du Rhône entraînant des modifications au sein des habitats piscicoles, de la faune et des végétaux aquatiques, et, d'autre part, en raison de l'augmentation des concentrations en matières en suspension dans l'eau du Rhône pendant la chasse. SIG étudie différentes alternatives de gestion de sédiments afin de définir une gestion optimale de la retenue de Verbois selon les critères du développement durable en prenant en compte dans leur interdépendance les aspects environnementaux, économiques et sociaux.

### **La problématique actuelle en regard du Développement durable**

La problématique de gestion du barrage de Verbois peut se résumer en la gestion des flux entrants principaux: l'eau, les graviers et les MES. Le passage de

l'eau ne pose pas de problème particulier, Verbois étant conçu au fil de l'eau. La gestion des graviers et des MES a pour but le maintien du volume utile.

Le système «Rhône» peut être étudié sur la base de relations de causalité entre les entités significatives du milieu et les facteurs de changement. Il apparaît clairement que les seules composantes modifiables dans le cadre de l'exploitation de Verbois sont les niveaux, les débits et les interventions directes sur le lit (tels que les dragages). La fréquence et la saison de l'intervention influence également l'impact sur l'écosystème.

La gestion des sédiments peut être réalisée de différentes façons et le mode de gestion des sédiments choisi va influencer la réponse morphologique des retenues. La morphologie du cours d'eau aura des influences tant sur le plan écologique que social ou économique.

Par exemple, une réduction de la largeur du lit du Rhône et une augmentation des vitesses du cours d'eau auront un impact sur toute la succession écologique rivulaire, depuis le type d'implantation végétale jusqu'à sa colonisation par le monde animal. Ce changement pourra aussi favoriser directement certaines espèces de poissons ou d'oiseaux d'eau, par exemple.

Ce même changement morphologique des berges et du courant pourrait induire des changements sur le plan social (pour les baigneurs, navigateurs ou naturalistes). Un arrêt des vidanges-chasses, par exemple, engendrerait des risques d'inondations réels à la Jonction et à la Plaine, et nécessiterait des mesures pour assurer la sécurité de la population.

La réponse morphologique aura également un impact économique non négligeable sur la production électrique et sur la gestion des ouvrages liés au Rhône. Il serait en effet probablement nécessaire, suivant le mode de gestion choisi, d'effectuer des dragages ponctuels afin de pouvoir garantir l'exploitation des prises d'eau et exutoires, ainsi que la pratique de la navigation.

La problématique de gestion des sédiments est complexe de par la multiplicité des composantes et de leurs interactions. L'enjeu est grand puisque le choix du mode de gestion va déterminer la morphologie du Rhône ainsi que ses fonctionnalités écologiques, sociales et économiques.

## ■ Matériel et méthodes

Le présent document s'appuie sur l'analyse de données historiques concernant la gestion des sédiments du Rhône genevois. Ces données proviennent des nombreux rapports et études réalisés dès 1890, année des premières recherches pour la construction du barrage de Chèvres. Parmi les principaux travaux effectués, nous nous sommes plus particulièrement intéressés aux données suivantes:

- les raisons du choix des vidanges/chasses,
- la façon dont elles étaient effectuées (fréquence et débits moyens),
- l'efficacité des chasses et les volumes des sédiments évacués,
- leur impact du point de vue chimique.

Cette analyse de l'historique nous amène à nous intéresser à la gestion des graviers et plus particulièrement à leur capacité de transit dans le Rhône genevois.

Une hypothèse basée sur la pente du lit du Rhône nous conduit à l'examen de l'évolution de la pente de la retenue de Verbois. Une analyse comparative de 7 profils en long mesurés entre 1930 et 2003 nous permet d'évaluer la capacité de transit du gravier de la Jonction jusqu'au barrage de Verbois. Une modélisation numérique (Aquavision 2006) a permis d'évaluer le profil en long tel qu'il serait en 2048 dans le cas d'une suppression des chasses.

Pour vérifier cette hypothèse empirique, nous présentons les résultats d'une modélisation du transit du gravier réalisée par Dusal (2005) basée sur les vitesses moyennes et les contraintes tractrices.

## ■ Résultats

### ***La gestion de la retenue de Chèvres entre 1896 et 1943***

Des études pour l'utilisation de la force motrice du Rhône à l'aval de la Jonction du Rhône et de l'Arve ont été réalisées entre 1890 et 1893. Le projet d'un barrage de plus de 8 mètres de hauteur était exceptionnel à l'époque car aucune installation de ce type n'existeait dans le monde. Ce projet nécessita d'importantes recherches. Mais la grande préoccupation des

promoteurs et ingénieurs fut le problème de l'évacuation des matériaux provenant de l'Arve pendant les crues.

En effet, plus tard, grâce à de nouveaux outils d'analyse, des experts chiffreront les inquiétudes des ingénieurs de l'époque: l'Arve charrie entre 1 000 000 et 2 400 000 m<sup>3</sup>/an de MES et son volume annuel maximum de graviers est estimé à 200 000 m<sup>3</sup> (Collet 1918). Wilhelm (1931) évalue l'apport annuel de graviers à 160 000 m<sup>3</sup> soit 80 000 m<sup>3</sup> en déduisant les 80 000 m<sup>3</sup> extraits par les exploitations. En se basant sur des sondages bathymétriques entre 1899 et 1929, Saugey est également arrivé à la conclusion d'un dépôt annuel moyen dans le bief de Chèvres de 80 000 m<sup>3</sup>.

Il fut finalement admis, en 1893, que les matériaux pourraient transiter par Chèvres à condition d'abaisser le niveau de la retenue en fonction de l'augmentation du débit du fleuve. Le but de cette démarche était de maintenir à l'amont du barrage une pente minimum de 0.5‰ pour permettre au Rhône d'entraîner les matériaux graveleux de l'Arve (Lugeon 1931). Ce mode de gestion a été appelé «régime de retenue réduite».

L'usine de Chèvres voit le jour en 1896. Le régime de retenue réduite, appliquée entre 1896 à 1899, n'a pas donné les résultats prévus. En effet, environ 300 000 m<sup>3</sup> de matériaux occupaient la retenue de Chèvres en novembre 1899. La fréquence des crues extraordinaires s'est révélée trop faible (environ huit crues de plus de 900 m<sup>3</sup>/s en 30 ans) pour assurer le curage du lit.

Des consignes d'abaissement plus sévères ont alors été proposées, entraînant une diminution de la hauteur de chute significative pour des débits dépassant 500 m<sup>3</sup>/s. En 1900, il fut décidé de faire un essai du curage de la retenue en ramenant l'écoulement du Rhône à son état primitif: deux chasses de 600 m<sup>3</sup>/s pendant 10 heures ont permis de déblayer 1 800 000 m<sup>3</sup> de matériaux.

L'efficacité des chasses étant largement supérieure à celle du «régime de retenue réduite», il était prévu qu'elles aient lieu chaque année. Or, jusqu'en 1912, Genève ne possédait pas assez de réserve d'électricité (même la réserve thermique de la Jonction mise en service en 1906 ne permit pas de répondre à la demande croissante en électricité) et Chèvres ne put faire que deux vidanges de courte durée entre 1901 et 1912. Ce n'est qu'à partir de 1913 que la réserve thermique (portée à 3800 kW) permit d'effectuer de nouvelles vidanges. En 1921, grâce à l'apport d'EOS les arrêts de Chèvres purent durer jusqu'à plusieurs jours.

Tableau 2: Usine de Chèvres: données relatives aux vidanges (Saugey 1930; Rapports de chasse jusqu'en 1940).

Année	Débit [m <sup>3</sup> /s]	Durée [h]	Volume d'alluvions évacués[ m <sup>3</sup> ]
1899	200	n.d	40 000
1900	600	10	90 000
1900	600	10	90 000
1901	500	7	70 000
1906	400	10	77 984
1913	400	13	89 000
1913	440	15	100 000
1913	280	15	82 000
1914	450	13	93 000
1916	350	15	90 000
1917	360	16	94 000
1919	580	16	114 000
1920	220	16	77 000
1922	500	123	300 000
1924	475	176	350 000
1926	300	18	94 000
1927	440	66	208 000
1929	540	66	235 500
1931	453	68	192 500
1932	600	24	90 000
1935	n.d	n.d	n.d
1936	920 -1060	9 jours	Crue naturelle
1937	850	n.d	154 000
1940	595	n.d	n.d

Sans vidanges pendant 6 ans, et ce, à deux reprises (de 1901 à 1913), le lit de la retenue s'est remblayé dans des proportions considérables. En 1913, trois chasses déblayèrent une quantité importante d'alluvions. Dès 1913, les chasses ont eu lieu de façon plus rapprochée et les dépôts n'ont plus augmenté.

Entre 1903 et 1929, il s'est formé un dépôt de gros cailloux d'un mètre de haut et sur une distance de plus d'1 km. Ce dépôt se situait environ à 4.5 km à l'amont de Chèvres et résistait aux chasses (Saugey 1930). Il semble que la crue naturelle de 1936, avec des débits de 920 à 1060 m<sup>3</sup>/s pendant 9 jours, ait déplacé en partie ces matériaux lourds jusqu'à l'usine.

En 1931, Lugeon écrit que «ce ne sont pas les quantités d'alluvions apportées qui sont inquiétantes, mais le déblayement des matériaux lourds. Les chasses à Chèvres exigent un très grand nombre d'heures, si on veut se débarrasser de tout l'apport. La chasse courte de 1906 avait enlevé 77 984 m<sup>3</sup> en 10 heures, soit à peu près l'apport annuel [évalué à 80 000 m<sup>3</sup> par Saugey (1930) Wilhelm (1931)]. Ces alluvions déblayées étaient constituées de graviers moyens et ont laissé derrière eux une énorme masse de gros graviers [que l'on n'arriverait pas à déblayer par une chasse plus longue]. Pour la grosse alluvion qui probablement restera stagnante, j'estime son dépôt annuel à 17 400 m<sup>3</sup>. Wilhelm (1931) l'évalue à 5 000-6 000 m<sup>3</sup> par an».

Dès 1931-1932, l'apport de graviers (env. 60 000 m<sup>3</sup>) paraît faible comparé aux 80 000 m<sup>3</sup> observé antérieurement et Saugey (1930) croit en «l'heureuse influence des entreprises d'extraction de graviers de l'Arve qui deviennent de plus en plus nombreuses». Ainsi, la problématique de l'évacuation des matériaux lourds en provenance de l'Arve s'estompe progressivement. Et comme l'atteste le rapport du Service

Fédéral des Eaux en 1941, «l'Arve en année normale ne charrie plus que du sable, le gravier faisant entièrement défaut» (Sogreah 2000).

### Les chasses de Verbois de 1943 à aujourd'hui

En 1897, un an après la mise en service de l'usine de Chèvres, le premier projet d'aménagement de la section du Rhône disponible entre Chèvres et la Plaine voit le jour. L'utilisation de l'importante force disponible sur ce tronçon fait l'objet de nombreuses études qui aboutiront finalement en 1936 au projet de l'actuel barrage de Verbois.

Lors de ces études et projets, la gestion de sédiments est étudiée avec grande attention. M. Collet (1918) rapporte que l'Arve charrie annuellement des quantités de matériaux beaucoup plus considérables qu'on ne l'admettait: 1 400 000 m<sup>3</sup> dont 200 000 m<sup>3</sup> de matériaux roulés. L'alluvionnement de l'Arve présente donc un risque pour le bon fonctionnement de cette nouvelle usine ainsi qu'un risque d'inondation pour le secteur de la Jonction (Filliol 1936; Lugeon 1931). Le dragage de ces alluvions ne peut être envisagé à cause du prix de revient et des difficultés d'évacuation et de stockage sur un emplacement vaste. Les experts consultés – en particulier, Lugeon (1931), Wilhelm (1931) et Meyer-Peter (1933) – conseillent donc de s'en tenir à la pratique des

Tableau 3: Usine de Verbois: données relatives aux chasses (SIG et EPFL 1984; Source: Rapports de chasse SIG, 1987-2003).

Année	Débit moyen de chasse	Durée de la chasse	Volume d'eau utilisé	Matériaux déposés entre 2 chasses	Matériaux évacués	Rendement de la chasse
-	$m^3/s$	h	$10^6 m^3$	$10^3 m^3$	$10^3 m^3$	%
1945	530	29	553	997	812	81
1947	570	22	451	910	615	68
1949	570	20	410	746	590	79
1951	1000	20	720	1240	1052	85
1954	500	21	378	945	665	70
1956	450	20	324	812	798	98
1960	560	24	484	1844	1186	64
1965	540	30	583	2750	2140	78
1969	530	50	954	1298	1435	111
1972	460	42	696	1123	1399	125
1975	550	35	693	1379	1798	130
1978	625	30	675	1093	1022	93
1981	500	32	576	1200	743	62
1984	560	42	847	1400	1240	89
1987	804	72	2084	1082	1141	105
1990	520	40	749	1273	1051	83
1993	530	40	763	1375	1406	102
1997	557	40	802	1493	1257	84
2000	576	42	871	1103	1144	104
2003	591	40	851	889	1066	120

chasses pour faire transiter le gravier le long de la future retenue. Les ouvrages de Verbois sont donc établis pour permettre les chasses.

Sur le tronçon Jonction-Chèvres, les pratiques d'évacuation du gravier ont montré tant bien que mal leur efficacité lors de l'exploitation de l'usine de Chèvres. Il s'agissait donc de vérifier le passage du gravier à l'aval de l'usine de Chèvres. Les pentes étant plus importantes sur ce tronçon aval, la force d'entraînement moyenne sera forcément plus importante que sur le

tronçon amont. Certes, des dépôts de graviers se feront sur certaines parties, mais ceux-ci cesseront de se produire une fois que la pente minimum aura été atteinte. En outre, M. Wilhelm ajoutait qu'il n'était pas nécessaire qu'une même chasse transporte les graviers déposés dans la partie amont jusqu'en aval du futur barrage. Il faudra que chaque chasse fasse sortir de la retenue un volume moyen de gravier égal à celui qui est déposé annuellement sur le tronçon Jonction-Chèvres. Pour Wilhelm (1931), le bon état de la retenue peut ainsi être assurée au moyen d'une chasse annuelle, d'un débit de  $600 m^3/s$ , effectuée pendant 24 heures.

En 1945, trois ans après la mise en eau du barrage de Verbois, a lieu la première chasse. Environ 20 vidanges seront ensuite effectuées jusqu'en 2003 (Chèvres avait connu 23 chasses en 47 ans). A Verbois, les vidanges ont eu lieu tous les 2 ans de 1945 à 1951. Mais dès 1951, certains milieux français se plaignirent du

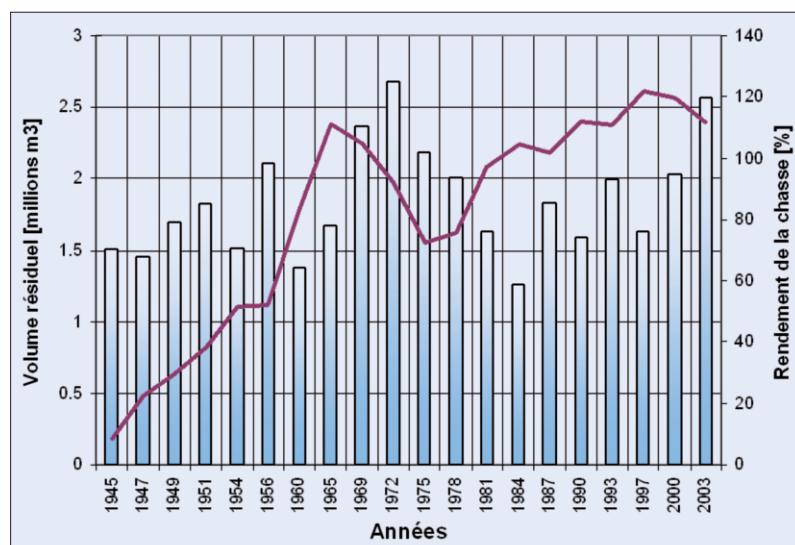


Fig. 3: Evolution du comblement de la retenue de Verbois de 1945 à 2003  
(d'après rapports de chasses SIG 1945 à 2003)

préjudice causé aux poissons et de la pollution des eaux. Les vidanges ont alors été espacées de 4 ans, 5 ans puis de nouveau 4 ans jusqu'en 1969. Cela n'avait pas amélioré la situation. Une commission franco-suisse décida donc en 1969 de fixer la périodicité des chasses à 3 ans (Dupond 1974).

Dans un rapport de février 1958, le service de l'électricité de SIG a établi le bilan des 15 premières chasses. Il s'accumule dans la retenue de Verbois un volume moyen annuel d'alluvions de 470 000 m<sup>3</sup>, les chasses réduisant ce chiffre à 93 000 m<sup>3</sup>/an (SIG, 1958).

En 1984, SIG et l'EPFL constatent que les chasses ont maintenu le lit mineur à son état lors de la mise à l'eau des ouvrages.

De nos jours, l'Arve transporte principalement des matières en suspension. Le flux de MES entrant dans la retenue de Verbois peut facilement dépasser 1 000 000 de tonnes par année (soit environ 700 000 m<sup>3</sup>/an). Afin d'éviter tout risque d'inondation dans les bas quartiers de Genève, les exploitants de Verbois et Chancy-Pougny, de concert avec les autorités concédantes, ont continué à effectuer des chasses périodiques.

En se basant sur les données du tableau 3, nous pouvons constater que le rendement moyen des chasses est de plus de 91%. Le système de gestion par chasse a ainsi permis de maintenir la majeure partie du volume utile initial de la retenue (environ 14 millions m<sup>3</sup>). Le volume résiduel (comblement cumulé) est actuellement de 2.4 millions de m<sup>3</sup>; la retenue étant alors-comblée à 17%. La figure 3 montre que le volume résiduel varie de manière significative jusque dans les années 80. Depuis la chasse de 1981, ce comblement résiduel semble suivre une tendance relativement stable indiquant (en dehors de la chasse de 1987) un maintien du même protocole de vidange. Par une analyse plus fine des données ci-dessus, nous constatons que de 1945 à 2003, 77% des dépôts de sédiments (MES) se font dans la section Chèvres-Verbois et 84% de ces sédiments sont évacués par les chasses. L'envasement a lieu donc principalement dans le deuxième tronçon de la retenue. Environ 40 000 m<sup>3</sup> de sédiments fins s'accumulent ainsi chaque année malgré les épisodes de chasses. Les simulations sur le long terme d'une gestion des sédiments par chasses [effectuées par Aquavision (2006)] montrent que ce comblement sera progressif jusqu'à la réalisation d'un équilibre dans plusieurs dizaines d'années, correspondant à un comblement de 6-7 millions de m<sup>3</sup>.

Il n'existe aucune corrélation évidente entre le rendement de la chasse et le volume d'eau utilisé. Les résultats de la chasse de 1987 montrent, en outre, que malgré un débit et une durée de chasse particulière-

ment importants (800 m<sup>3</sup>/s pendant 72 heures), cette chasse a permis uniquement d'évacuer les sédiments déposés après la chasse de 1984 (rendement de 105%). Nous pouvons en conclure que les sédiments «anciens» sont très difficilement mobilisables.

### **Vidanges et qualité des eaux**

Depuis 1951, l'état sanitaire du Rhône pose problème lors des chasses. Le déversement des eaux usées dans l'Arve et le Rhône en est la cause principale. Chaque chasse met en mouvement une multitude de substances polluantes, retenues dans les sédiments, ce qui provoque de fortes mortalités pour la faune piscicole.

La pression des associations de pêche augmente à partir de la chasse de 1956, durant laquelle l'influence sur la faune piscicole a été étudiée. Si, pour le laboratoire cantonal de chimie, l'ammoniaque est le principal agent destructeur pour les poissons (0.1 mg/L NH<sub>3</sub> libre); pour l'EAWAG, ce sont les limons fins, qui, en colmatant leurs branchies, les étouffent. Pour SIG, c'est le manque de nourriture et d'oxygène provoqué par la pollution croissante du Rhône qui fait que les poissons, affaiblis, ne possèdent plus la vitalité nécessaire pour résister aux modifications que provoquent les chasses. Les concentrations en MES à Verbois lors de la chasse de 1956 ne dépassent pas celles des grandes crues d'Arve, qui ne provoquent pas une telle mortalité chez les poissons (SIG 1956). Néanmoins, SIG décide en 1958 de renvoyer la prochaine chasse à l'année 1959 afin de «liquidier certaines affaires litigieuses avec moins de tension».

1967 voit la mise en service de la station d'épuration d'Aire et de l'usine d'incinération des Cheneviers. Lors de la vidange de 1972, la pollution des sédiments n'était presque plus le fait de Genève mais provenait de plus en plus de l'Arve. La vidange de 1975 se déroule dans des circonstances bien plus favorables pour les poissons (sans afflux massif de boues putrides et consommatrices d'oxygène).

### **Et quelles conséquences si le gravier revenait?**

Dans cette partie, on se propose de décrire l'évolution de la retenue dans le cas d'un retour de l'apport de gravier par l'Arve. En effet, les chasses à Verbois ont été établies dans un souci de maintien du lit du Rhône dans une pente suffisante pour entraîner les graviers. Lugeon (1931) évalue cette pente à 0,5 % avec une vitesse de fond de 1,70 m/s. Malgré la diminution, dès le début des années 1930, de l'arrivée de graviers par l'Arve (exploitations de graviers sur

Fig. 4: Evolution du talweg de la retenue de Verbois. (Source: Données SIG (1930-2003), simulations Aquavision (2006) pour l'état 2048 – sans chasses)

France), pour Wilhelm (1931), «si des dépôts de limons devaient se produire, et que les chasses ne puissent les enlever que partiellement, les conditions prévues pour l'évacuation des graviers ne seraient plus remplies». Depuis les années 1930-40, bien que les vidanges évacuent principalement des MES, c'est aussi dans un souci du retour d'importantes quantités de graviers que les vidanges sont maintenues. Ce scénario semble d'ailleurs se réaliser puisqu'en France, depuis 1983, certaines concessions d'exploitations de graviers de l'Arve n'ont pas été renouvelées. Depuis 2000, à part sur le secteur de Chamonix - Les Houches, les extractions sont arrêtées sur l'Arve (Sogreah 2000). Il s'agit d'étudier si ce gravier pourrait aujourd'hui transiter par la retenue de Verbois durant les chasses.

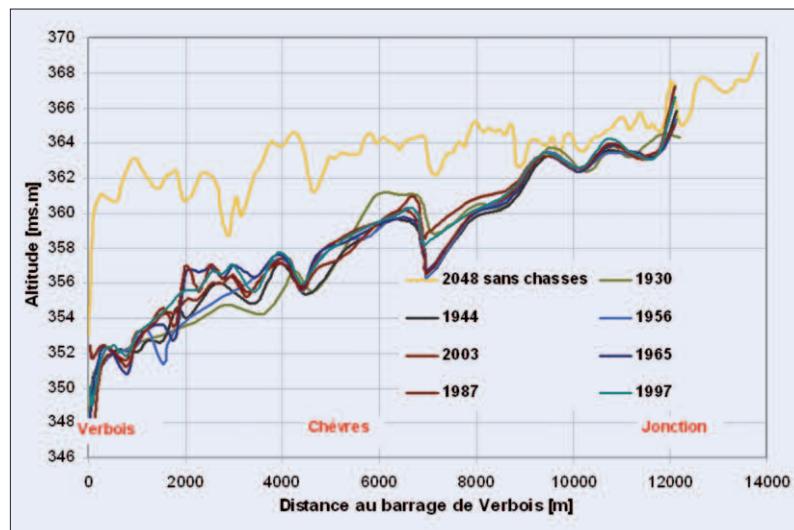
A partir des profils en travers, nous avons superposé sur la figure 4 les profils en long du Rhône de différentes périodes entre 1930 et 2003. Le profil en long simulé, du thalweg en 2048 (Aquavision 2006) dans le cas d'une suppression des chasses, est également indiqué.

Dans son rapport de 1930, le professeur Meyer-Peter décomposait l'actuelle retenue de Verbois en 2 tronçons:

- Tronçon 1: Jonction - Chèvres, soit une distance de 7.2 km
- Tronçon 2: Chèvres - Verbois, soit une distance de 5 km

Nous pouvons constater que le tronçon 1, et sa partie amont en particulier, a été maintenu à l'équilibre depuis 1930. La pente moyenne sur ce tronçon est restée quasiment inchangée, ce qui permet de conclure que le gravier pourrait de nouveau transiter sur cette partie de la retenue de Verbois.

Sur le tronçon 2, les pentes sont très variables d'année en année. On rencontre par endroits des



pentes peu importantes. En 1929, Saugey a signalé déjà sur un tronçon donné, l'existence d'une pente de 0.5‰. Pour Wilhelm, une pente si faible n'est pas suffisante pour permettre de faire passer le gravier provenant de la première section. Mais les dépôts qui se formeront dans la deuxième section occasionneront un remaniement de son profil en long, avec tendance à créer partout une pente qui se rapprochera de la pente moyenne du tronçon.

Nous avons calculé les pentes moyennes de chacun des tronçons par régression simple, à partir des différents profils en travers historiques. Notons que pour le tronçon 2, nous n'avons pas tenu compte des 200-300 derniers mètres (à l'approche du barrage de Verbois) qui ne sont pas représentatifs car trop pentus.

Les chasses ont permis de maintenir les pentes moyennes du thalweg entre 1930 et 2003. Ce constat laisse supposer la possibilité du transit du gravier lors d'abaissements, sur toute la retenue de Verbois, d'autant plus que la pente moyenne du tronçon 2 est supérieure à celle que l'on observe sur le 1<sup>er</sup> tronçon. La force d'entraînement du gravier y sera donc à priori supérieure, sachant que les opérations de chasses s'effectuent en écoulement libre (retenue abaissée) sur le lit mineur du Rhône.

Nous constatons que dans le cas d'un abandon des chasses, les pentes moyennes des 2 tronçons en 2048 seraient inférieures à 0.5‰. Malgré l'augmentation des vitesses d'écoulement du fait de la réduction des sections, il n'est pas certain que les forces tractrices

Tableau 4: Evolution de la pente moyenne du talweg du 1930 à 2048.

Ttronçon	1930	1944	2003	2048 (sans chasses entre 2003 et 2048)
Jonction-Chèvres	0.9‰	1.0‰	1.0‰	0.4‰
Chèvres-Verbois	1.2‰	1.2‰	1.3‰	0.3‰

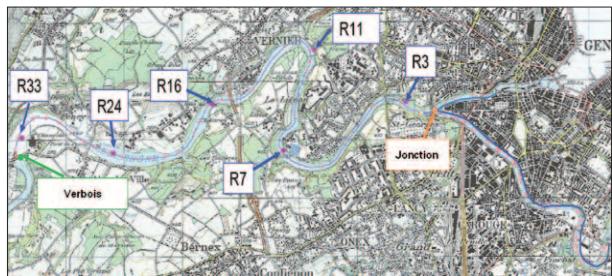


Fig. 5: Localisation des profils en travers utilisés (Sources: Dusal 2005).

soient suffisantes pour permettre de faire transiter le gravier sur l'ensemble de la retenue, à l'occasion des chasses.

Une modélisation du transit du gravier a été réalisée par Dusal en 2005 et peut nous éclairer sur la validité de certaines hypothèses empiriques énoncées ci-dessus. Selon la théorie de Shields, les diamètres mobilisables ont été calculés en fonction des vitesses moyennes et des contraintes tractrices, pour les situations suivantes:

- en exploitation normale, pour des débits entre 100 et 1000 m<sup>3</sup>/s
- en situation de chasse, lors des différentes phases de celle-ci (durée = 120 heures environ)

Le graphique de la figure 6 montre les diamètres de matériaux potentiellement mobilisables en fonction du débit à la Jonction durant les conditions normales d'exploitation (sans abaissement du plan d'eau). Les résultats montrent que, si les matériaux de diamètre inférieur à 6 mm peuvent être charriés jusqu'au profil 11 environ (Vernier), pour des crues supérieures à 800 m<sup>3</sup>/s, ils ne pourront en aucun cas atteindre les tronçons plus à l'aval. Sachant que Sogreich (2000) estime un diamètre potentiel moyen de 24 mm dans le tronçon aval de l'Arve, nous pouvons déduire que le gravier ne peut pas transiter par la retenue de Verbois pendant les conditions normales d'exploitation, même lors des crues importantes.

Le graphique de la figure 7 indique le diamètre des matériaux potentiellement charriés durant un épisode de chasse, dans les conditions pratiques en 2003 (voir figure 2). Les résultats montrent que la phase de chasse (48h-88h) permettrait de mobiliser des matériaux de diamètre inférieur à 30-40 mm sur l'ensemble de la retenue. La grande majorité du gravier arrivant de l'Arve serait ainsi susceptible de transiter par la retenue de Verbois durant les chasses. La fraction grossière de ces graviers serait cependant stockée à la Jonction.

Les résultats corroborent l'hypothèse initiale de la possibilité de transit du gravier par la retenue de Verbois par une gestion par chasse. Au contraire, en l'absence de chasses, les conditions ne sont pas réunies pour assurer le passage du gravier le long de toute la retenue. Le gravier arrivant de l'Arve se déposerait ainsi après la Jonction, engendrant alors à moyen terme, un bouchon susceptible d'entraîner des inondations dans le quartier de la Jonction.

## Discussion

L'analyse des vidanges-chasses effectuées de 1900 à 2003 montre qu'il est très difficile de définir de quoi dépend leur efficacité. Ni les débits, la durée ou le volume d'eau, dans une certaine mesure bien sûr, ne modifient l'efficacité des chasses.

Comme le montre l'historique, à l'origine, le but principal des chasses était le transit d'importantes quantités de gravier (80 000 m<sup>3</sup>/an). Dès les années 1930-40, avec la diminution des volumes de gravier charriés par l'Arve, ce fut plutôt le transit des limons afin de maintenir une pente suffisante dans le lit du Rhône en cas de retour du gravier, qui importait. Depuis 1983, l'arrêt de certaines exploitations de gravier de l'Arve laisse présager le retour du gravier à la Jonction. Sogreich (2000) estime le transport solide à la frontière franco-suisse à environ 46 000 m<sup>3</sup>/an après une [longue] période de stabilisation.

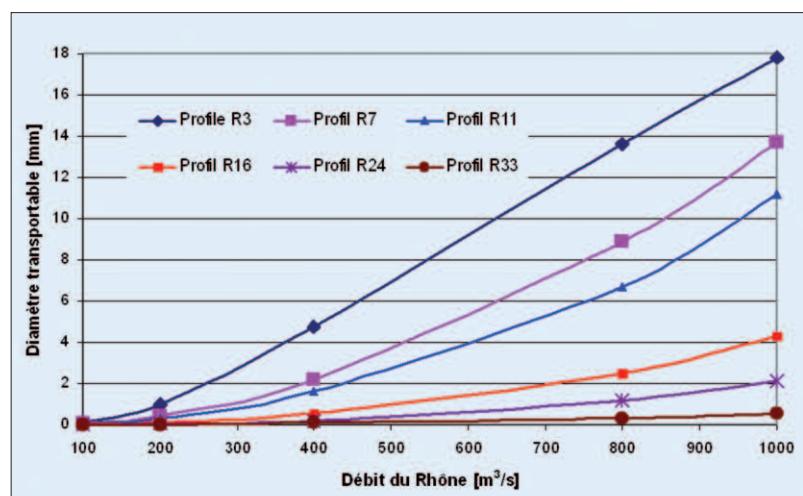


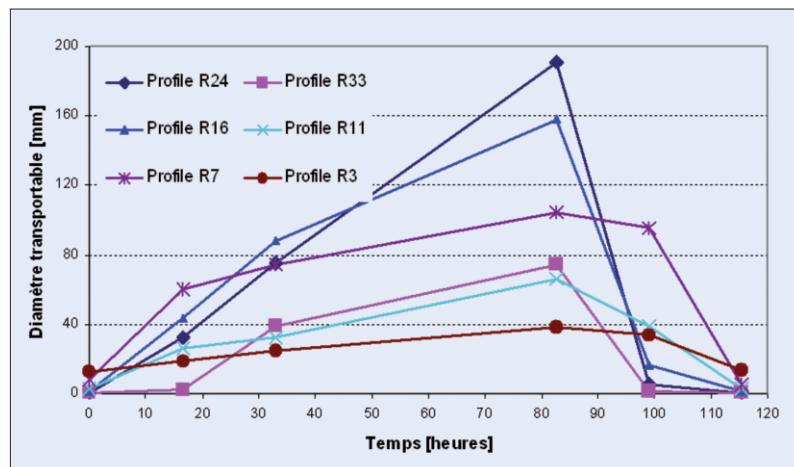
Fig. 6: Evolution des diamètres potentiellement mobilisables en exploitation normale en fonction du débit du Rhône.

*Fig. 7: Evolution des diamètres potentiellement charriés pendant une chasse.*

La morphologie actuelle du lit du Rhône semble pouvoir permettre encore le transit du gravier lors des chasses. En effet, les modélisations ont montré que les vitesses moyennes et les forces tractrices actuelles du Rhône sont suffisantes pour entraîner le gravier de diamètre inférieur à 40 mm lors des chasses. Une étude plus récente (Aquavision 2007) montre également qu'un diamètre de l'ordre de 30 mm peut transiter par la retenue de Verbois. Le diamètre moyen du gravier étant estimé à 24 mm (Sogreah 2000), nous pouvons supposer qu'une faible proportion des matériaux atteignant la Jonction pourrait résister aux chasses. Ces cailloux pourraient être dragués puis déposés plus à l'aval dans la retenue de Verbois, afin de bénéficier de contraintes tractrices suffisantes lors de la chasse suivante.

Il apparaît ici clairement que l'évolution de la morphologie de la retenue et le mode de gestion des sédiments sont des enjeux importants pour la gestion des graviers. Sans un abaissement complet de la retenue accompagné d'une chasse, le gravier ne peut pas transiter par la retenue de Verbois. Celui-ci serait alors retenu au niveau de la Jonction pouvant entraîner des inondations en cas de crue. Cette situation nous contraindrait à un mode de gestion par dragage (exploitation de gravières, par exemple). Cette façon de faire n'est pas impossible mais il est important d'être conscient des conséquences du choix d'un arrêt des vidanges-chasses. De plus, au niveau biologique, on ne pourrait plus compter dans la retenue de Verbois sur l'apport de gravier, élément important pour la reproduction de certaines espèces piscicoles.

Un arrêt trop long des chasses est en outre susceptible de limiter les possibilités de transit du gravier sur l'ensemble du tronçon. Sans tenir compte des impacts environnementaux importants qu'une telle procédure pourrait engendrer, il serait intéressant de simuler le transit du gravier par une vidange complète, une fois la retenue totalement comblée, afin de pouvoir constater l'influence de la réduction conjointe des sections d'écoulement et des pentes du thalweg sur la force tractrice.



Précisons également que les chasses n'auraient pas d'influence sur les graviers accumulés en amont de la Jonction. La gestion par chasse serait donc une solution nécessaire mais non suffisante, pour résoudre la problématique des inondations à la Jonction.

Indépendamment de la problématique du gravier, un abandon des chasses entraînerait aussi une accumulation des matières en suspension, jusqu'à un équilibre à partir duquel les sédiments fileraient directement à l'aval (Aquavision 2006). Cette situation de comblement ne serait pas sans conséquence sur les lignes d'eau: on peut s'attendre à des exhaussements à la Jonction de plusieurs dizaines de centimètres selon l'importance du débit. Une gestion des sédiments «passive» peut ainsi déjà être exclue; dans le cas d'un abandon des chasses, il serait en effet nécessaire de mettre en place des mesures constructives.

## Conclusion

Il paraît nécessaire aujourd'hui d'avoir une vision plus large du mode de gestion possible des MES et des graviers, l'important étant d'envisager toutes les variantes réalisables.

## Analyse multicritère

La gestion des sédiments peut être réalisée de différentes façons et le mode de gestion des sédiments choisi va influencer la réponse morphologique des retenues. Si ces différentes réponses sont relativement faciles à imaginer, il est nécessaire de traduire celles-ci en termes de représentation paysagère, d'évolution de la qualité environnementale, fonctionnelle, de la sécurité, des coûts induits, etc... Il est en outre nécessaire d'aboutir à une perception commune de ces états futurs, afin de pouvoir travailler sur un référentiel identique.

Ces modes de gestion peuvent se décomposer en trois groupes analysés sommairement ci-dessous:

**Scénarios type 1:** un abaissement complet du plan d'eau accompagné de chasses triennales ou plus espacées encore, permettrait de maintenir le volume utile de la retenue dans une proportion suffisamment importante pour ne pas engendrer un remous important à la Jonction. L'impact négatif sur l'écosystème du Rhône genevois resterait cependant inchangé lors des purges. Globalement, nous trouverions un écosystème relativement proche de celui que nous connaissons actuellement.

**Scénarios type 2:** une gestion sans abaissement du plan d'eau engendrerait un comblement rapide de la retenue, ayant pour conséquence une réduction de la largeur du lit et donc une augmentation des vitesses. Ceci aurait également pour conséquence la sélection d'espèces de poissons ou d'oiseaux d'eau adaptés à cette situation. Le long de la retenue de Verbois, les vitesses seraient équivalentes à celles que nous observons actuellement entre la Jonction et Aïre. La formation de bancs de sédiments pourrait favoriser l'expansion de la couverture végétale aquatique et palustre. Cependant des questions se posent notamment au niveau de la sécurité à la Jonction (inondations), de la sécurité pour la navigation, ainsi que de l'exploitation des ouvrages liés au Rhône (déversoirs, prises d'eau, etc...).

**Scénarios type 3:** Ce scénario de gestion permet d'obtenir une réponse morphologique équivalente à celle du scénario de type 1, tout en évitant de procéder à des abaissements complets de la retenue. Il peut s'agir:

- d'abaissements partiels (2 m par exemple) pendant une crue,
- d'abaissements partiels (4 m par exemple) programmés chaque année,
- d'une accentuation des crues de l'Arve, en favorisant l'apport du Léman pendant les crues de l'Arve (actuellement les crues d'Arve sont tamponnées, entraînant la décantation des MES).

Etant donné la complexité du problème, des enjeux et de la difficulté à prédire précisément les conséquences des différents modes de gestion envisageables, il s'avère illusoire de vouloir trouver *le meilleur* mode de gestion, celui qui surpassé objectivement tous les autres. Il est donc de mise de trouver un autre processus décisionnel que la démonstration par le formalisme mathématique et le calcul numérique de l'optimalité d'une solution.

L'analyse multicritère semble pouvoir apporter la méthodologie nécessaire pour la sélection du meilleur compromis possible. Pour appliquer cette méthode

d'aide à la décision multicritère, les étapes sont les suivantes:

- Dresser la liste des actions ou solutions potentielles (ici, les modes de gestion).
- Identifier les critères qui orienteront les décideurs (critères biologiques, économiques, sécuritaires, ...).
- Comparer chacune des solutions par rapport à chacun des critères.
- Agréger ces jugements pour choisir le mode de gestion ou le compromis le plus satisfaisant.

### **Le monitoring du Rhône**

SIG travaille d'ores et déjà à la mise en place d'un système de suivi permettant de définir scientifiquement l'état du Rhône. C'est ce que nous avons appelé le «Monitoring du Rhône». Ainsi, lorsqu'un mode de gestion des sédiments sera retenu, les conséquences «réelles» pourront être suivies selon tous les axes du développement durable.

Le dispositif d'observation de la retenue est actuellement efficace en ce qui concerne la connaissance des débits entrants et les niveaux d'eau. Il convient de le compléter avec de nouveaux paramètres tels que la charge solide entrant et sortant des retenues, tant pour la fraction en suspension que pour le gravier. C'est ce que nous appelons communément le modèle de la «boîte noire»: la différence de charge entre l'entrée et la sortie permet d'identifier globalement une tendance au dépôt ou à l'érosion, sans localiser le ou les phénomènes. Les campagnes bathymétriques permettent d'obtenir cette information géographique complémentaire tout en offrant un recouplement global avec les données de la boîte noire. L'observation parallèle des nappes d'accompagnement du fleuve ainsi que des zones de glissement complètent les informations concernant la connaissance de la morphologie des retenues.

Au-delà des facteurs abiotiques décrivant la retenue, il convient de suivre également des indicateurs sur l'état biologique du cours d'eau, tant quantitatifs que qualitatifs. Les informations existantes relatives à la couverture des espèces végétales, aux cheptels des espèces résidentes, aux séjours et transits des espèces migratrices, aux taux de reproduction doivent être compilées et les lacunes comblées afin d'obtenir une image commune de la situation et de son évolution.

Le but est de hisser les indicateurs de «diversité biologique» et de «biomasse» au même niveau que les macro-indicateurs qui existent déjà pour l'approvisionnement électrique, la gestion des dangers naturels et des risques industriels.

Pour mener à bien ce monitoring du Rhône, il convient dans un premier temps d'identifier cet ensemble d'indicateurs cohérents permettant de suivre l'évolution des tronçons concédés. Pour cela nous nous basons sur:

- le «système modulaire gradué» de gestion des cours d'eau de l'Office Fédéral de l'Environnement (1998),

- le manuel Rivermanagement et ses 50 indicateurs développés par Woolsey et al de l'EAWAG (2005),
- les composantes déterminantes proposées par BTEE (2006).

La mise en œuvre de ce vaste suivi se basera en grande partie sur les efforts existants d'associations bénévoles, des universités, des suivis mandatés par SIG ou le canton de Genève.

## Références

- **AQUAVISION** 2006. Barrage de Verbois: Etude hydraulique et morphologique.
- **AQUAVISION** 2007. Barrage de Verbois: Etude hydraulique et morphologique (suite).
- **BTEE BC INGÉNIEURS SA**, Dériaz SA, HES Lullier, Interface 21 Sàrl, FMO, 2006. Rapport Abandon des vidanges du barrage de Verbois: volet développement durable, SIG, 50 pp.
- **COLLET**. 1918. Le charriage des alluvions dans l'Arve à Genève - Rapport de M. le Prof. L.W. Collet du 27 avril 1918 (avec 2 annexes).
- **COPPAUX A.** 1956. Rapport sur la retenue et l'ensablement du bief Verbois-Jonction.
- **DULAL K.** 2005. Numerical modeling of hydraulics and morphology of the Rhône between Geneva and Chancy-Pougny, MsC Thesis in Advanced Studies, AquaVision Engineering Ltd., Ecublens.
- **DUPOND**. 1974. Rapport à M. Jaccard: Vidanges de Verbois.
- **ECOTEC**. 1991. Vidange de la retenue du barrage de Verbois sur le Rhône du 8 au 12 juin 1990: Rapport du suivi biologique, 39 pp.
- **EAWAG**. 2005. Handbuch für die Erfolgskontrolle bei Fließgewässerrevitalisierungen.
- **FILLIOU A.** 1933,. Historique des projets de l'usine 3 soumis au conseil d'administration des SIG.
- **FILLIOU A.** 1936. Comparaison des récents projets d'aménagement de la chute du Rhône.
- **INSTITUT D'HYGIÈNE DE GENÈVE**. 1966. Rapport concernant la vidange de 1965: Résultats des examens physico-chimiques et biologiques à Verbois et Chancy.
- **INSTITUT D'HYGIÈNE DE GENÈVE**. 1975. Vidange et chasse de la retenue de Verbois de 1975: Rapport concernant les analyses physico-chimiques.
- **LEROY**. 1953. Rapport sur la chasse de la retenue de Verbois à M. Comisetti, président du conseil d'administration de SIG.
- **LIECHT P, SIEBER U, BUNDI U, FRUTIGER A, PETER A, VON BLÜCHER U, WILLI HP, GÖLDI C, KÜPPER U, MEIER W, NIEDERHAUSER P.** 1998. Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau en Suisse: système modulaire gradué, Informations concernant la protection des eaux n°26, OFEFP, IFAEPE, OFEE, AWEL Zurich, 42pp.
- **LUGEON**. 1931. Lettre de M. Lugeon à M. Albaret.
- **MARKI, JAAG**. 1956. Conclusions du rapport de l'EAWAG sur les recherches chimiques exécutées pendant la chasse de Verbois de 1956.
- **MEYER-PETER**. 1930. Étude des conditions d'écoulement de l'eau dans le bief entre la Jonction et le barrage projeté
- **MEYER-PETER**. 1933. Rapport sur les conditions sous lesquelles pourront s'effectuer les chasses des alluvions dans le bief de l'usine 3 d'après le projet 1923
- **OFEFP**. 1994. Conséquences écologiques des curages de bassins de retenue.
- **SAUGEY**. 1929. Rapport sur la retenue de l'usine de Chèvres.
- **SAUGEY**. 1930. Rapport sur la retenue de l'usine de Chèvres.
- **SCHÄLCHLI, ABEGG, HUNZINGER**. 2003. Barrage de Verbois. Recherche de procédures alternatives aux vidanges actuelles.
- **SIG**. 1918. Note sur l'Usine de la Plaine.
- **SIG**. 1919-1943. Chèvres - Vidanges - Correspondance générale.
- **SIG**. 1945-1949. Centrale de Verbois – Vidanges.
- **SIG**. 1956. Rapport sur la chasse de 1956.
- **SIG**. 1957. Rapport sur la vidange de Verbois.
- **SIG**. 1957. Renseignements pour le service fédéral des eaux sur les chasses de Verbois.
- **SIG**. 1958. Extraits des registres du Conseil de direction du 19 mai 1958.
- **SIG**. 1958. Le lac artificiel de Verbois.
- **SIG**. 1958. Rapport sur les chasses du bief de Verbois.
- **SIG**. 1967. Procès-verbal de la réunion de la commission franco-suisse chargée d'examiner les problèmes posés par les vidanges de Verbois.
- **SIG, EPFL**. 1984. Les chasses de la retenue de Verbois: 1945 – 1984.
- **SOGREAH CONSULTANTS**. 2000. Etude des transports solides de l'Arve - Rapport d'étude, Syndicat mixte d'aménagement de l'Arve et de ses abords.
- **WILHELM I**. 1931. Aménagement de la chute du Rhône entre le confluent de l'Arve et Russin.
- **WOOLSEY S, WEBER C, GONSER T, HOEHN E, HOSTMANN M, JUNKER B, ROULIER C, SCHWEIZER S, TIEGS S, TOCKNER A, PETER K.** 2005. Handbuch für die Erfolgskontrolle bei Fließgewässerrevitalisierungen. Publikation des Rhone-Thur Projektes. Eawag, WSL, LCH-EPFL, VAW-ETHZ. 112 pp.