

AMÉNAGEMENT HYDROÉLECTRIQUE ET CONTINUITÉ DE LA CHARGE DE FOND : CONTRIBUTION À UNE MISE EN PERSPECTIVE HISTORIQUE DANS DES BASSINS ALPINS AFFLUENTS DU RHÔNE

Jean-Paul BRAVARD

Résumé

La question de la continuité sédimentaire a pris une actualité récente à l'échelle européenne en complément de la continuité écologique. C'est en fait une question ancienne qui a culminé au XIX^e siècle, époque de surcharge sédimentaire des lits fluviaux du fait de l'érosion intense des versants défrichés sous un climat agressif. Cet article montre comment, dans le bassin du Rhône : 1) les premiers ouvrages hydroélectriques ont été adaptés à cette surcharge en permettant le passage des crues et de la charge solide grossière ; 2) de grands barrages-réservoirs ont été construits à partir des années 1930 pour optimiser le potentiel énergétique mais au risque d'un fort piégeage des sédiments ; 3) les extractions ont permis de partiellement contrôler les entrées sédimentaires et de ménager leur capacité ; 4) Les barrages à dérivation du Rhône (1899-1986) ont été réalisés dans un contexte de très forte réduction des entrées dans le fleuve, leurs contraintes propres fragmentant profondément la continuité sédimentaire.

Mots clés

charge de fond, sédimentation, barrages à hausses mobiles, barrages réservoirs, extractions, Alpes, Rhône, France

Abstract

Sediment continuity along the river continuum has recently become a topical subject in Europe, together with ecological continuity. In reality it is an old subject, dating back to the 19th century, an era of sediment overloading in river channels resulting from the intense erosion of slopes caused by an aggressive climate. This paper shows how, in the Rhône watershed: 1) the first hydro-development schemes were adapted to excessive load by allowing flood and coarse bed load passage; 2) large retention dams were erected in the 1930s in order to optimize the energy potential, but with a risk of intense sediment trapping; 3) gravel harvesting has partially made it possible to control sediment input and to conserve reservoir capacity; 4) the Rhône River diversion dams (1899-1986) were erected within a context of a marked decrease of bed load input into the river from tributaries and constraints related to their technology, to such an extent that sediment continuity was considerably fragmented.

Key words

bed load, sediment deposition, fuse gates, retention dam, gravel harvesting, Alps, Rhône River, France

I. INTRODUCTION

La Directive Cadre Européenne sur l'eau et le bon état des rivières (2000) a placé au premier plan une série de concepts et de mesures pratiques visant à restaurer la continuité sédimentaire et la continuité écologique sur les cours d'eau de l'Union européenne, signe que la dimension longitudinale des hydrosystèmes est dorénavant considérée comme une composante majeure de leur fonctionnement. Cette directive entend corriger les dégradations de l'environnement fluvial causées par les obstacles rencontrés par certaines espèces dans leur migration ; ils sont rendus responsables

du recul des populations piscicoles, voire de la disparition d'espèces. Quant au concept de continuité sédimentaire, il repose sur le constat d'un appauvrissement des milieux d'eau courante tant par l'effet aval des barrages que par le piégeage des sédiments qu'exercent les retenues. Ce dernier est dans certains cas compensé par des chasses de sédiments fins dont les effets nocifs sont avérés. L'objectif est de restaurer à terme une relative continuité, notamment en ce qui concerne la charge de fond dont on sait l'importance pour assurer la reproduction des espèces nobles de la faune piscicole européenne. Les cours d'eau d'Europe, des organismes de rang inférieur aux grands fleuves,

sont en effet segmentés en d'innombrables biefs et « masses d'eau » dont la délimitation repose en général sur l'existence d'obstacles artificiels, sans exclure cependant des accidents naturels du profil en long (chutes, rapides et lacs). La politique encouragée par les pouvoirs publics est d'effacer autant que faire se peut les obstacles artificiels ou tout au moins d'annihiler leurs effets néfastes vis-à-vis de la continuité sédimentaire et écologique. Cette politique récente est de mise en œuvre difficile dans les Alpes françaises et sur le Rhône, non seulement parce que les cours d'eau (les « masses d'eau » de la DCE) sont équipés de grands ouvrages hydrauliques depuis au moins un siècle, mais aussi parce que des ruptures sont intervenues : i) à l'échelle de certains bassins (protection des versants), ii) dans la nature même des ouvrages hydrauliques, ce qui a induit iii) une action indirecte sur la charge de fond dans le but de la réduire à l'échelle des lits fluviaux pour préserver la capacité de production des ouvrages.

La question de la réduction des flux sédimentaires (flux de charge de fond et de matières en suspension) aux embouchures fluviales est un sujet de recherche majeur depuis une vingtaine d'années (Meade, 1996 ; Vorosmarty *et al.*, 2003 ; Syvitsky *et al.*, 2005 ; Syvitsky et Saito, 2007 ; Walling, 2007), voire davantage dans le cas spécifique des cours d'eau impactés par les grands barrages. En France, la question du transfert des sédiments composant la charge de fond a été considérée comme importante dès le début des années 1980 comme en témoigne le colloque de Propriano consacré à la gestion des sédiments organisé par le Bureau de la Recherche Géologique et Minière (Savey, 1982). Depuis une quinzaine d'années, la Société Hydrotechnique de France (2001) a explicitement posé la question de la « gestion des sédiments depuis les sources à la mer ». Ce colloque a été suivi par ceux consacrés à la « variabilité spatio-temporelle des transports » et à la « gestion des sédiments en milieux naturels et urbains » (SHF, 2007) en attendant le colloque consacré à la « Gestion des sites soumis à forte sédimentation » (2016) ; de nombreux rapports d'études et des travaux scientifiques ont aussi porté sur les transits sédimentaires des Alpes et du Rhône (Couvert *et al.*, 1999 ; Barbiero *et al.*, 2003 ; Doutriaux, 2006).

Dans cette contribution, qui fait le choix de ne pas prendre en compte les transports en suspension, nous nous interrogerons en premier lieu sur les

origines du concept de continuité, ou du moins, de manière pragmatique, sur la façon dont la continuité des transferts a pu être implicitement ou explicitement prise en compte dans la gestion des cours d'eau français à l'époque préindustrielle. Nous analyserons ensuite, grâce à des études de cas, la façon dont les transferts sédimentaires sont entrés en collision avec les projets d'aménagements hydroélectriques jusqu'à ce que des solutions soient mises en œuvre. Dans une troisième partie, nous présenterons quelques uns des problèmes rencontrés dans la gestion de la continuité rhodanienne à l'ère des grands aménagements.

II. LA CONTINUITÉ SÉDIMENTAIRE DANS LE BASSIN DU RHÔNE AVANT L'ÈRE DES BARRAGES

Les usages économiques des cours d'eau européens se sont amplifiés au XVIII^e siècle, notamment pour le transport des marchandises par flottage et navigation, en complément des usages traditionnels qu'étaient alors la pêche et la meunerie. La navigation et la construction de canaux font progresser la connaissance de l'hydraulique. C'est à la fin du XVIII^e siècle que la question de l'érosion des montagnes et de la torrentialité se fait jour avec un corpus d'observations et de concepts nouveaux.

A. La surabondance de la charge aux XVIII^e et XIX^e siècles

Les sources écrites et iconographiques du XVIII^e siècle permettant de suggérer l'importance du transport sédimentaire sont abondantes. Les documents les plus démonstratifs sont les cartes représentant le style en tresses des rivières. Une carte de 1591 figure même la charge solide du Rhône qui se jette dans le Golfe du Lion par sept embouchures ou *graus*, une représentation qui souligne la réalité et sans doute l'importance du phénomène d'apport à la mer ; cette représentation de l'embouchure du Rhône fut plusieurs fois reproduite par la suite (Pichard et Roucaute, 2014). Sans que figure dans son ouvrage une éventuelle aggravation des flux solides en provenance de l'amont, Belidor (1750) insiste sur l'importance des apports de limon (donnant en fait des dépôts de sable, comme le précise l'auteur) qui sont repoussés par la mer et encombrant l'embouchure du Rhône ; en 40 ans, le fleuve « a fait des dépôts sous l'eau et des atterrissements qui se sont

successivement étendus à la mer... à une grande lieue au-delà des anciennes bornes du rivage », pour une avancée d'au moins 100 m par an.

À l'échelle du territoire français, la carte de Philippe Buache (1744-1750, publiée en 1770) a contribué à la pénétration dans la science française des notions de bassin versant et de réseau hydrographique en soulignant les lignes de partage des eaux par des chaînes de montagnes parfois imaginaires (Lagarde, 1987). L'ingénieur Jean-Antoine Fabre (1797) a montré la continuité du transport solide qui naît dans les torrents de la montagne, se propage dans les *torrents-rivières* vers les fleuves et se termine dans les embouchures remplies de sédiments, à l'exemple de celle du delta du Rhône où l'absence de marée empêche l'évacuation des dépôts. La continuité sédimentaire va de soi et inquiète puisqu'elle « ruine » les montagnes défrichées, élargit la bande active des rivières en tresses au détriment des activités riveraines et enfin obstrue les accès à la mer. L'excès de charge est ainsi une question majeure qui se pose tout au long du système fluvial.

Au XIX^e siècle, des forestiers, comme Alexandre Surell (1841) et Scipion Gras (1857), affinent les analyses théoriques et les techniques permettant le reboisement des hauts bassins versants et la construction de barrages forestiers capables de retenir la charge. Les apports conceptuels de Surell concernent les notions de bassin torrentiel, de changement induit par la déforestation, de jeunesse et vieillesse des torrents ; aussi les notions de réduction de la charge et de réponse fluviale par approfondissement des chenaux ; de reboisement et de contrôle torrentiel ; implicitement et avant la lettre, Surell a conçu le concept de réversibilité. Gras conceptualise la saturation du courant par le transport de gravier dans les rivières torrentielles affouillables. Les forestiers sont résolument modernes puisqu'ils prônent la gestion des sédiments à la source, seule à même de résoudre les problèmes à l'aval. En cela, ils s'opposent aux ingénieurs des Ponts et Chaussées dont les solutions techniques à l'excès de charge et aux crues exacerbées par la montée des lits fluviaux se cantonnent à l'érection de digues longitudinales sur des tronçons localisés (Bravard, 2002). En un sens, ces derniers gèrent les effets de la crise érosive alors que les forestiers ont l'ambition d'agir prioritairement sur les causes amont, et par là sur l'ensemble du système lui-

même. Les lois de 1860 et 1882 sur la « restauration des terrains de montagne », consécutives à la crue générale de 1856 et à des dégâts localisés dans les montagnes furent votées dans le but de réduire l'érosion des versants et les transports solides dans les rivières. Le XIX^e s. fut bien le siècle du bassin versant et de la première gestion sédimentaire en France.

B. Le comblement sédimentaire des retenues : une expérience ancienne dans les Alpes méridionales

La compréhension des problèmes posés par la charge de fond des rivières torrentielles progressa de manière empirique dans les Alpes du Sud, plusieurs décennies avant les travaux de restauration des terrains de montagne (Demontzey, 1882). La construction de barrages torrentiels dans la vallée de l'Ubaye et la haute vallée de la Durance fournit les exemples classiques de rétention provoquée des sédiments avec la mise en service du Grand Barrage du Riou Bourdou en Ubaye en 1881 (Delsigne, 2001). La théorie forgée sur les torrents de rang inférieur quant à leur efficacité ne semble pas avoir été transposée à l'échelle du barrage des rivières torrentielles, organismes de rang supérieur collectant les apports des torrents et cônes de déjections. Elle a cependant pu servir de socle aux connaissances et à la pratique des ingénieurs hydrauliciens modernes, sans que les filiations aient été réellement mises au jour.

Un exemple, devenu classique à la fin du XIX^e siècle, est le premier barrage de Quinson sur le Verdon (1866-1869) (Figure 1). Construit par la Compagnie du Canal du Verdon pour alimenter en eau la ville d'Aix-en-Provence, il a disparu en 1974 sous les eaux de la retenue EDF de Quinson (Bordes, 2005). D'une hauteur de 13 m et construit sans vanne de fond, il a arrêté tous les graviers charriés par la rivière. La retenue, longue de 4700 m, a été remblayée par du limon en 4 à 5 ans, puis le gravier a progressé dans la retenue, affouillant et repoussant le limon ; le remblai de gravier a exhaussé le lit en amont de la retenue sur une longueur atteignant 12 km en 1899. Le volume de gravier déposé a été de 44 500 m³/an par comparaison de profils de 1878 et 1899. Cet exemple a permis à l'ingénieur Ivan Wilhem (1902) de mettre au point une formule de transport permettant d'évaluer le débit solide de la Durance (charge de fond) en prévision des barrages

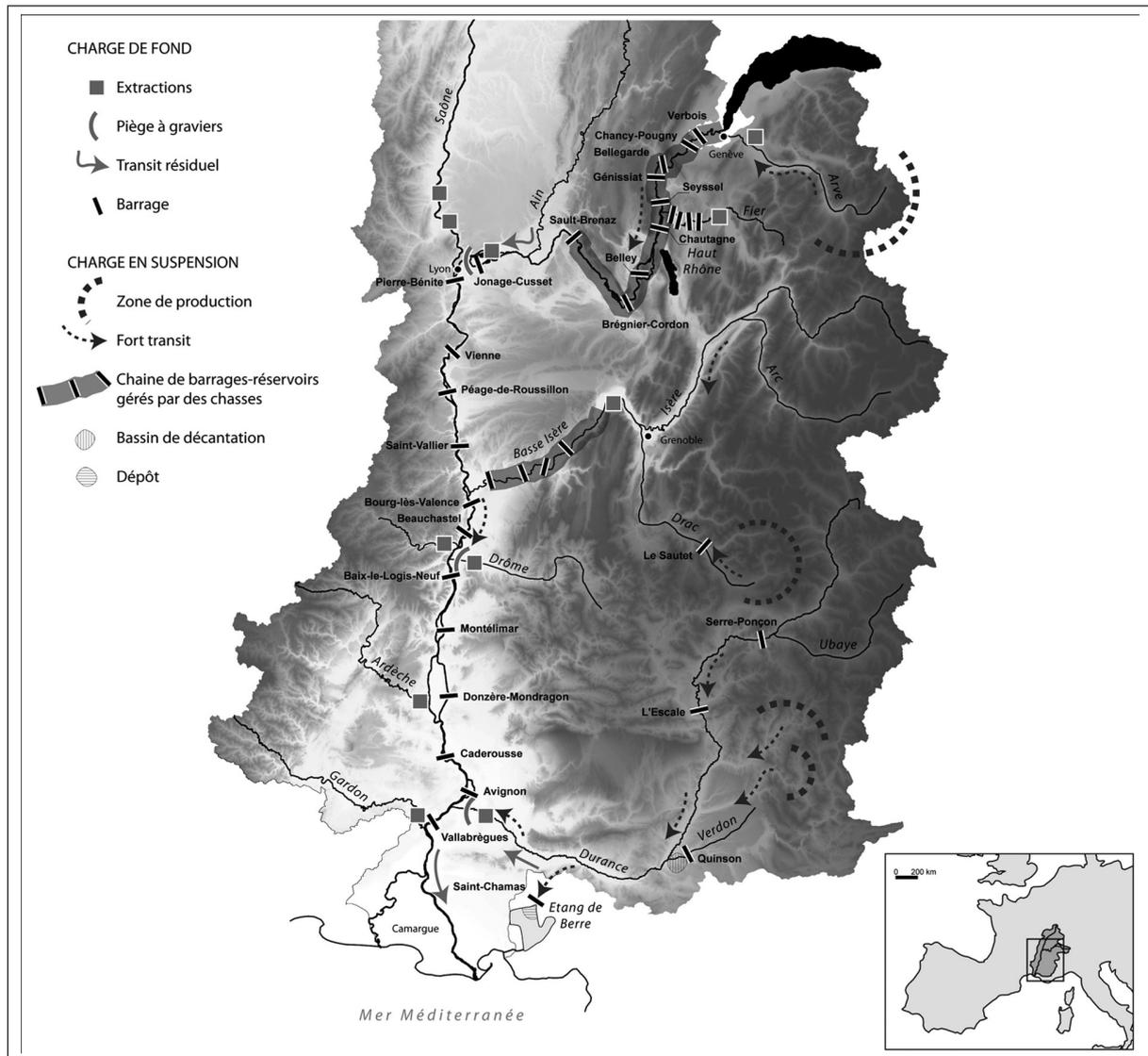


Figure 1. Carte des principaux ouvrages hydroélectriques cités dans le texte, des secteurs d'extraction et des tronçons soumis aux chasses

à construire. Les difficultés rencontrées par ce barrage inaugurent les adaptations technologiques des ouvrages hydrauliques au transfert de charge de fond dans les lits fluviaux.

III. CONCILIER USAGES ÉNERGÉTIQUES DE L'EAU ET TRANSIT DE LA CHARGE DE FOND

A. Du seuil de moulin aux hausses mobiles

Les premiers aménagements utilisant l'énergie hydraulique ont repris la technique des moulins. L'eau était dérivée vers la prise d'eau, son niveau étant maintenu à peu près constant grâce à un seuil déversoir bâti en poutres de bois ou en pierre en tra-

vers de la rivière ; ce dispositif permettait de laisser passer les crues et la charge sédimentaire tout en épargnant le dispositif de production hydraulique de l'usine. Dans le bassin du Rhône, on trouve de tels dispositifs par exemple sur le Doubs, sur un tronçon de l'Ain à l'amont de Pont d'Ain et sur l'Ardèche, où les roues ont été remplacées par les turbines de micro-centrales.

À partir de la fin du XIX^e siècle, le dispositif hydraulique hérité de l'époque des moulins est adapté à la production d'électricité grâce au remplacement des roues par des turbines, mais la production reste limitée par le débit turbiné. La forte augmentation de la demande énergétique enregistrée en Europe à partir des années 1870 suscite alors des innovations technologiques capables d'accroître la production

sans porter atteinte aux flux d'eau et de sédiments encore très abondants, la restauration des montagnes n'ayant pas encore produit ses effets et les extractions de gravier dans les lits fluviaux restant très modestes. La technologie mise en oeuvre dans les Alpes permet d'évacuer les crues et le débit solide par un barrage mobile de manière à éviter l'engrèvement des ouvrages, la prise d'eau située dans la retenue étant alimentée en permanence tout en entraînant la quantité de particules la plus limitée possible, notamment pour ménager les turbines (Drouhin, L.-P., 1902). Deux cours d'eau vont nous permettre d'illustrer ce point, sachant que l'on trouve des dispositifs similaires dans de nombreuses vallées.

B. Le Fier

Prenons l'exemple du Fier, un affluent de rive gauche du Rhône qui descend du massif des Bornes et coule au nord d'Annecy. De l'amont vers l'aval, la chaîne des modestes ouvrages du Fier se présente ainsi (Tableau 1 et Figure 2).

La charge solide étant considérable au début du XX^e siècle, la technique d'équipement énergétique

Aménagement & investisseur	Type de barrage	Hauteur de chute (m) & Débit dérivé (m ³ /s)	Puissance max installée (MW)	Date de construction
Brassilly. Société des Forces du Fier	Barrage à hausses mobiles et déversoir, canal, chute, usine	21 14	2,9	1904
Chavaroche. Société des Forces du Fier	Barrage mobile (2 m), galerie, usine	42 25		1918-1924
Vallières « Val de Fier ». Société hydroélectrique de Lyon	Barrage de basse chute, partie mobile et usine avec écluses à l'étiage	18 m 100 ou 72 ?	7,8	1928
« Portes du Fier » à Motz	Barrage poids, vanne de fond, galerie, usine	35	20	1911-1919

Tableau 1. Les aménagements hydroélectriques de la basse vallée du Fier

associe sur trois aménagements une série de dispositifs comportant un barrage à hausses mobiles et un déversoir adapté au transfert des crues et de la charge de fond, une galerie de dérivation terminée par une chute, enfin l'usine hydroélectrique dont la puissance est limitée à la fois par le débit dérivé et par la hauteur de chute. Seul l'aménagement de Vallières présente une usine couplée à un barrage mobile ; les autres barrages alimentent une dérivation conduisant à une chute et à une usine.

C. Le Haut Rhône

Le fleuve a un débit moyen annuel de 360 m³/s et une charge de fond fournie par l'Arve au débouché

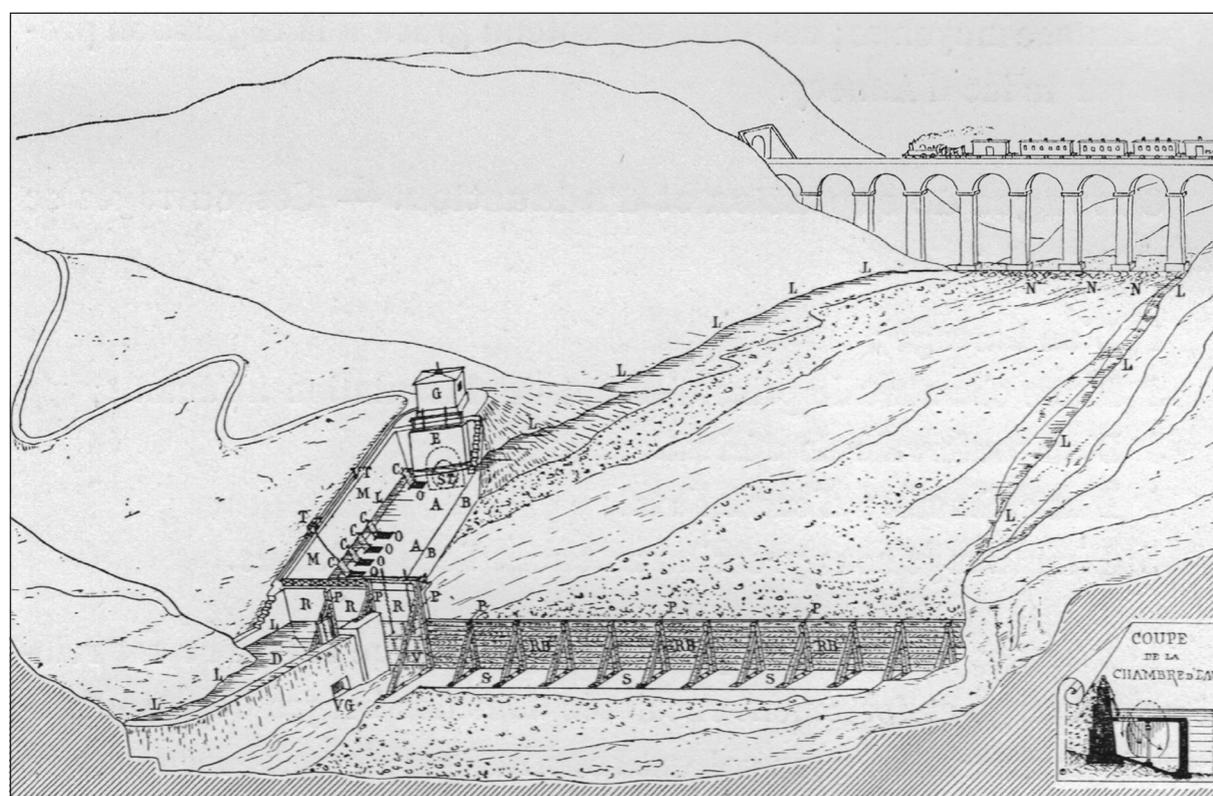


Figure 2. Dessin du barrage de Brassilly, sur le Fier à l'aval d'Annecy (Congrès de la Houille Blanche, 1902, notice anonyme)

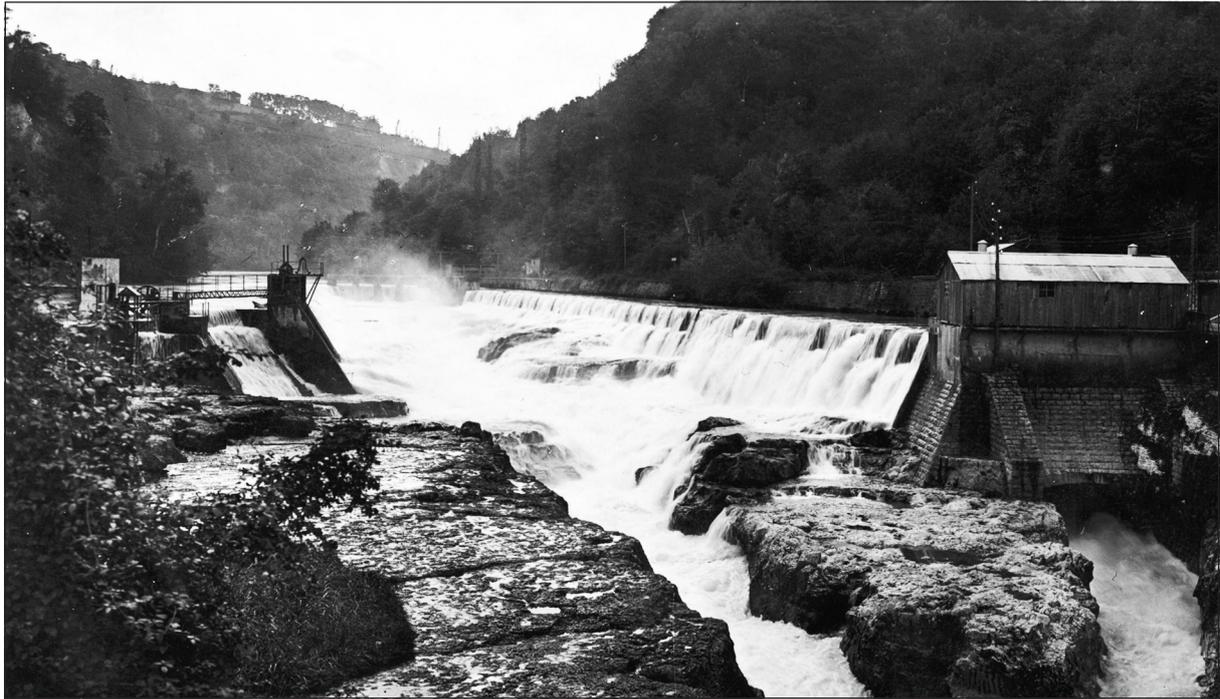


Figure 3. Photo du barrage de Bellegarde en crue vers 1930 ; sur chaque rive les vannes sont ouvertes en complément du déversement (carte postale, droits réservés)

d'un bassin à forte production sédimentaire. Le barrage de Bellegarde a été construit sur le Rhône en deux étapes entre 1874 et 1911, à l'amont du canyon des Pertes, la première usine étant au confluent de la Valserine qui descend du Jura (Figures 2 et 3). Il permet d'abord de dériver l'eau vers une première galerie creusée en rive droite ($60 \text{ m}^3/\text{s}$) ; puis vers un deuxième canal-galerie de capacité similaire, établi en rive gauche. Une porte permet d'évacuer vers la Perte les graviers du Rhône pour protéger les turbines capables de fournir (en théorie) une puissance de 7,5 MW (1874) puis 16 MW (1911) sous une chute inférieure à 15 m (Saint-Pierre, 2013).

À l'aval de Genève est ensuite construit le barrage-usine au fil de l'eau de Chèvres (1896) qui est un temps le plus puissant d'Europe, avec sa hauteur de chute de 8,5 m et sa puissance de 4 MW portée en 1899 à 13 MW (Figure 4). L'eau était guidée vers le bâtiment des turbines et la hauteur de chute était produite par un barrage à hausses mobiles. En crue, les hausses étaient relevées pour laisser passer sur le radier le débit et les matériaux charriés selon le profil longitudinal naturel. C'est selon le même principe qu'a été construit le barrage franco-suisse de Chancy-Pougny (1924), avec une chute portée à près de 17 m, donnant une puissance de 37 MW lors de la mise en service.

On conçoit aisément que, dans la quasi totalité des cas, seule la charge de fond ait inquiété les constructeurs d'ouvrages, le transit de la charge en suspension ne posant pas de problèmes une fois les hausses des barrages relevées. C'est la raison pour laquelle la mesure de la charge de fond a fait l'objet d'un nombre inhabituel de travaux, surtout suisses ; les estimations utilisées dans le projet de Génissiat en sont dérivées.

Le Tableau 2 révèle que le barrage de Chèvres retenait dans sa retenue et son remous une partie de la charge de fond malgré le fonctionnement de ses hausses mobiles et des dragages. Le talweg aurait probablement atteint un profil d'équilibre si le barrage de Chèvres n'avait été remplacé par le barrage-retenu de Verbois qui, en 1943, prit le relais. Il possède une puissance installée non plus de

Auteur	Année	Charge à Genève	Charge à Génissiat	Source
Coutagne A.	1911		1 213 000 (charge de fond + MES)	Article
Boissomas	1911		100 000	
Lugeon M.	1912	86 000 + 60 000 dragués	86 000 + apports locaux = 112 000	Article
Collet	1916	200 000 (sur 1 an)		
Boissier	1916	200 000		
Pardé M.	1925		100 à 150 000	Thèse
Saughey	1930	80 000 + 13 000 dragués + transit à Chèvres (non connu)		In Wilhelm (1934)
CNR	1937		60 000	Rapport interne

Tableau 2. Estimation des transports de cailloux, gravier et sable en m^3/an à Genève et Génissiat (sources non mentionnées dans le tableau : Peiry, 1988 pour la charge à Genève et Bravard, 1994, pour la charge à Génissiat)

37 MW, comme son prédécesseur, mais de 100 MW grâce à un barrage-poids haut de 20 m équipé de vannes mobiles et d'une usine. Des exemples similaires existent entre autres sur le cours de l'Arc en Maurienne, sur la Romanche, sur le Drac et sur le cours inférieur de l'Isère (Figure 5).

IV. LES EXTRACTIONS AU SERVICE DES BARRAGES RÉSERVOIRS

Le passage des barrages à hausses mobiles aux barrages réservoirs sur les cours d'eau à forte charge de fond mérite quelques éclaircissements. La préoccupation majeure exprimée dès la fin du XIX^e siècle était devenue le remplissage sédimentaire des retenues hydroélectriques construites sur les cours d'eau à charge alluviale abondante car il menaçait leur espérance de vie. La solution pouvait être d'installer une vanne de fond et l'une des premières fut celle du barrage des Portes de Fier à Motz (Tableau 1) ; elle devint vite inutilisable et la retenue se remblaya. Le dragage des sédiments fut

considéré comme une solution mais elle ne fut mise en pratique que lorsque les usages du gravier prirent de l'importance dans l'économie contemporaine.

A. Le barrage du Sautet sur le Drac (1930-1935)

L'exemple le plus connu du recours effectif aux extractions se rencontre dans la haute vallée du Drac. Au tout début du XX^e siècle, une série de 4 barrages à hausses alimentant chacun un canal de dérivation terminé par une conduite forcée était envisagée dans la gorge du Drac à l'amont de La Mure, sur un parcours d'une vingtaine de kilomètres, mais divers obstacles s'opposèrent à la réalisation de cette chaîne d'ouvrages de conception classique. Les projets furent réactivés après la première guerre mondiale selon cette formule. L'usine du Motty, la première à avoir été réalisée, était alimentée par le barrage réservoir du Pont-du-Loup (1927-1930) qui connut un processus de comblement remarquablement rapide. La crue de septembre 1928 déposa en effet 536 000 m³ de graviers et celle d'octobre 1928, 465 000 m³ sur un total de 1 860 000 m³ en

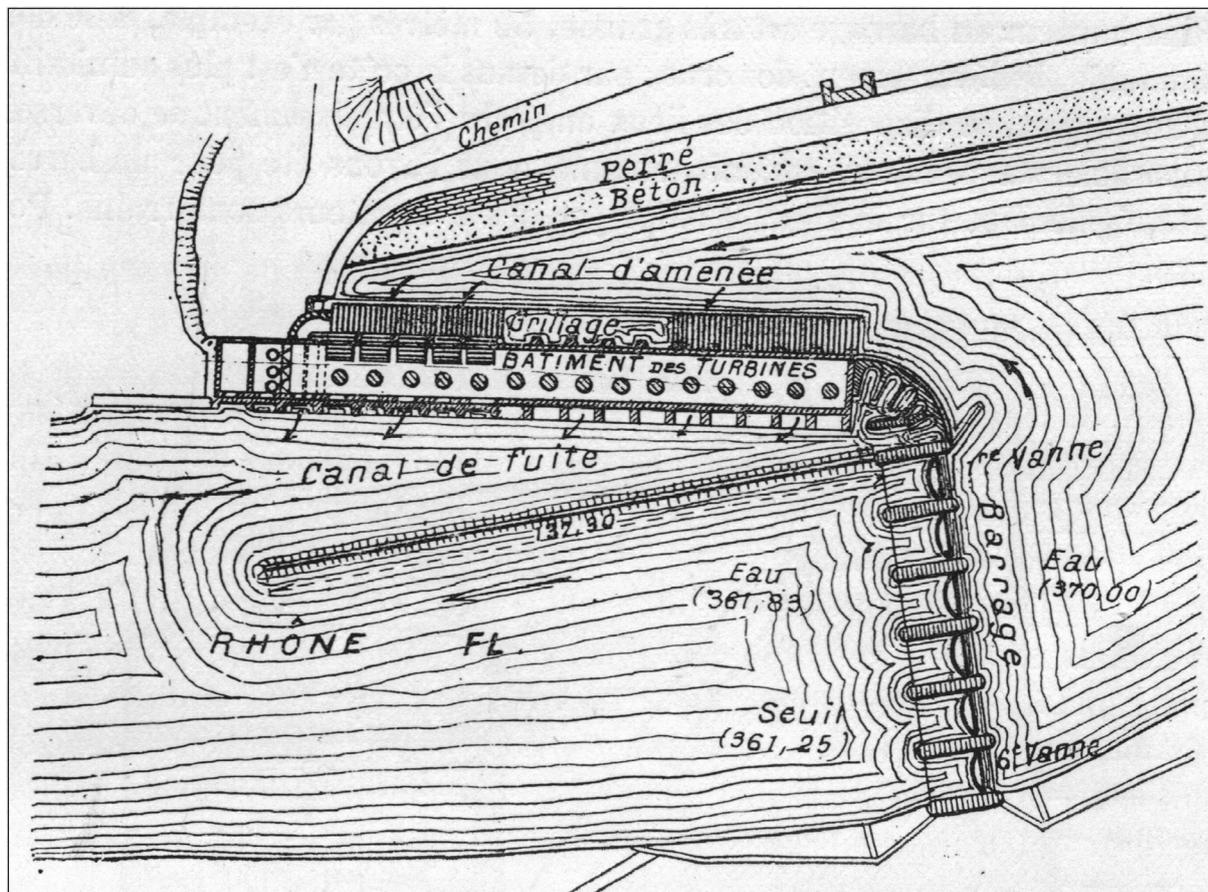


Figure 4. Plan schématique du barrage de Chèvres (Congrès de la Houille Blanche, 1902). Une digue *divisioire* a été rajoutée dans la retenue entre 1902 et 1942 pour mieux protéger les turbines vis-à-vis de la charge de fond en en restreignant l'accès

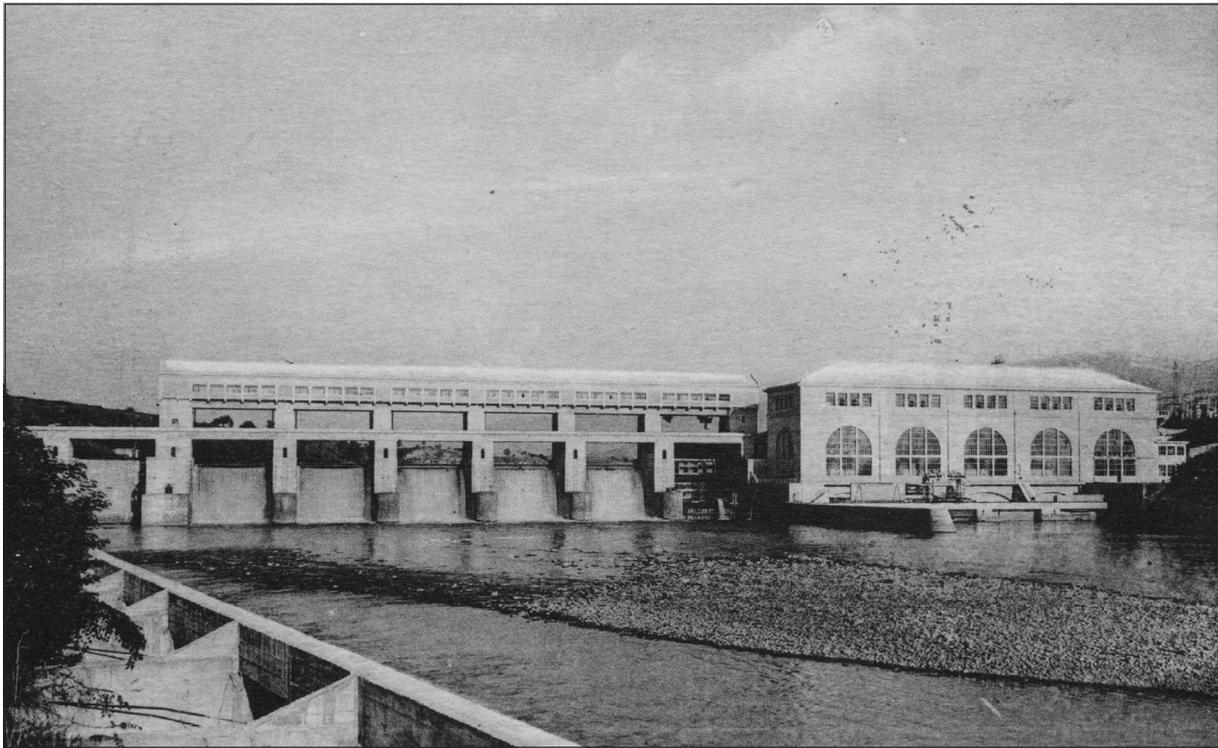


Figure 5. Le barrage de Pizanon (Romans-sur-Isère) vers 1935. Noter la présence d'un grand banc de galets à l'aval du barrage à hausses mobiles. Les hausses mobiles sont à gauche et l'usine hydroélectrique est à droite, sur la commune de Pizanon (carte postale, droits réservés)

deux ans. La retenue du Pont-du-Loup fut dégradée en 1934, un des premiers exemples de gestion des entrées sédimentaires par dragage des queues de retenues. Les apports moyens en provenance du haut Drac étaient estimés à 250 000 m³ par an en 1935 lorsque le barrage du Sautet (Figures 1 et 6) fut mis en service, provoquant l'envoiment de l'ancienne installation (Walther, 1936 ; Vivian, 1982). Les apports auraient été de 350 000 m³ par an en moyenne à l'amont de la retenue du Sautet entre 1930 et 1965 (Salvador, 1991).

Si le barrage-retenu du Pont-du-Loup/Motty eut une existence éphémère, c'est que la politique d'aménagement connut un changement brutal à la fin des années 1920 (Dalmasso, 2008). Sur le Drac, l'État imposa la construction du barrage réservoir à niveau variable du Sautet (1930-1935), capable de donner une production très supérieure puisque les débits de crue seraient entièrement turbinés (chute de 93,5 m ; puissance installée 67,5 MW ; réservoir d'une capacité utile de 96,2 hm³). La nouvelle conception consistait en la distinction faite entre la *tranche morte* (30 hm³), destinée au stockage des alluvions et la tranche superficielle dite *utilisable* pour la production énergétique. La voute du barrage fut équipée d'une vanne de fond dimensionnée pour

un débit de 145 m³/s. Destinée à purger les matériaux déposés dans la tranche morte, elle se bloqua rapidement et ne permit pas le transit des graviers : « tous les barrages construits jusqu'à ce jour sont pourvus de tels dispositifs, mais leur insuffisance est malheureusement patente » (Widman, 1950), même au Sautet. Il s'avérait impossible d'évacuer par des vannes de fond et des chasses les matériaux de classe supérieure à celle des sables très fins. En somme, ni la leçon de Quinson, ni la leçon du Motty, n'avaient été tirées : au lieu de gagner la tranche morte, les graviers se déposaient dans un delta au détriment de la partie amont de la tranche utile et exhaussaient le lit torrentiel à l'amont de la retenue.

B. Le projet de Serre-Ponçon (1857-1960)

Le projet d'un grand barrage-réservoir sur le site de Serre-Ponçon, à l'aval du confluent de la Durance et de l'Ubaye, fut d'emblée conçu dans la perspective d'usages multiples : la rétention des crues, une assurance contre les effets des pénuries d'eau agricole (à partir des années 1895) et industrielles. Les premiers sondages eurent lieu en 1857 au lendemain de la grande crue de 1856 puis furent repris à la fin du XIX^e siècle, mais la profondeur des fondations à réaliser (plus de

40 m) et la hauteur même du barrage (85 m) firent repousser la décision. Le cube de gravier apporté par les tributaires du réservoir était estimé par Wilhem (1913) à 200 000 m³/an, dont une moitié se déposerait dans les lits des tributaires fluviaux (la Durance et l'Ubaye), l'autre moitié dans le réservoir d'une capacité totale de 607 millions de m³, dont 526 millions de capacité utile. La retenue actuelle, qui a un volume total double, soit 1,272 millions de m³, ne fut mise en eau qu'en 1960 (Bertin, 1960). Même dans le projet primitif, la consommation de volume utile était relativement faible mais plusieurs solutions étaient envisagées pour réduire les effets des apports : des barrages de retenue de gravier sur l'Ubaye et la Durance et/ou le dragage et le transport du gravier par chalands vers la tranche morte du réservoir. La question qui se posait véritablement, mais qui sort de notre propos, était celle des limons, avec un apport moyen 2,6 millions de m³/an. Ce grand projet montre que la façon de résoudre l'excès de charge de fond avait été précocement envisagée, à défaut de pouvoir régler la question des limons qui fut reportée.

C. Le barrage de Génissiat sur le Rhône (1937-1948) bénéficia de l'extraction des apports de l'Arve

L'achèvement du barrage-retenu du Sautet précède de deux ans le début de la construction de celui de Génissiat (1937). Comme sur le Drac, la valorisation optimale de l'énergie sur le site de Génissiat était devenue un enjeu national majeur (Martel, 1911). Les travaux furent lancés en 1937 et l'ouvrage, dont l'achèvement fut retardé par la guerre, fut couplé au réseau en 1948. Compte tenu d'un débit moyen annuel voisin de 350 m³/s dans la gorge du Rhône à l'aval de Bellegarde et d'une hauteur de chute de 64,5 m, la puissance installée est de 42 MW pour un débit d'équipement maximum de 750 m³/s (l'excédent passe par le déversoir de surface). Il s'agissait à la mise en service du plus puissant ouvrage d'Europe occidentale, capable de garantir 10 % de la consommation française d'électricité.

Dans la phase de conception de l'ouvrage, une des difficultés résidait dans le volume de la charge de fond en provenance du bassin versant de l'Arve ; quelques affluents, dont la Valserine, apportaient une contribution modeste entre Genève et Génissiat. À défaut de pouvoir envisager des chasses de galets à travers un haut barrage, et la solution de deux



Figure 6. Le barrage du Sautet achevé en 1935 (carte postale, droits réservés)

barrages successifs à vannage ayant été abandonnée, le fort transport de charge de fond inquiétait les promoteurs et les opposants au projet avant la 1^{ère} guerre mondiale. La demande croissante de granulats exprimée par la ville de Genève s'avéra être la clé du problème dans les années 1920-1930 en ponctionnant de façon croissante la ressource de la basse Arve (elle fut aussi un élément clé vis-à-vis de la construction du barrage de Verbois). Il n'est pas étonnant, dans ces conditions, que la construction de barrages-réservoirs en travers du fleuve, ait été engagée en 1935 à Génissiat et en 1938 à Verbois. La CNR envisageait à la fin des années 1930 un flux réduit à 60 000 m³/an, somme toute limitée par rapport au volume du réservoir (56 hm³) ; le dépôt s'effectuant dans le remous de la retenue, à L'Etournel, la question fut en grande partie réglée par des extractions dans ce secteur. Les apports de charge de fond sont aujourd'hui très réduits et la question des sédiments se pose toujours à Génissiat, mais en de tout autres termes.

D. La généralisation des extractions comme mode de gestion de la charge solide

Au tout début du XX^e siècle, à Génissiat et ailleurs, la question de la charge de fond restait à résoudre et

la solution de l'extraction n'allait pas encore de soi. En 1912 un projet, jugé farfelu à l'époque, était de créer des retenues sur les affluents, de les laisser se combler puis d'utiliser le gravier pour fabriquer de la « pierre factice » (Bravard, 1994). Les extractions réalisées dans le Drac à l'amont du Motty puis du Sautet, à peu près à l'époque où Genève extrayait les graviers de la basse Arve, devinrent la norme. Après la guerre, l'exploitation des graviers non pas pour protéger les retenues aval, mais pour satisfaire la demande régionale en granulats, prit une ampleur considérable.

Le Fier à hauteur d'Annecy a subi un enfoncement de 15 m et coule sur le substratum rocheux. Le phénomène s'est étendu à la quasi-totalité des cours d'eau au motif de réduire le risque de débordement et de fournir en matériaux les grandes infrastructures de transport et l'industrie du bâtiment. Les cours d'eau les plus touchés ont été la Dranse, l'Arve, l'Arc, l'Isère et la Romanche dans les Alpes du Nord, dans un contexte de réduction des entrées dans le système fluvial du fait du reboisement des pentes (Peiry, 1988 ; Salvador, 1991 ; Peiry *et al.*, 1994). Les cours d'eau des Alpes du Sud (le Buëch, la Durance notamment) ont aussi fait l'objet d'extractions massives mais la pression est moindre que dans les Alpes du Nord. Les affluents du Rhône à l'aval de Lyon, entre la Galaure et l'Eygues, ont été systématiquement ponctionnés avec des

pics de 250 000 m³/an sur la Drôme (années 1970-80), 400 000 m³/an sur l'Eygues (années 1980), 200 000 m³/an sur le Roubion (1982-91), 140 000 m³/an sur l'Ardèche au début des années 1980 (Landon, 1999).

V. LE RHÔNE, UNE CHAÎNE D'OUVRAGES HYDROÉLECTRIQUES DE GESTION DÉLICATE

Si la question de la charge de fond du Rhône a pu être beaucoup plus aiguë naguère, elle n'a jamais perdu de son actualité. Elle s'exprime dans différents tronçons et dans les différents compartiments des aménagements hydroélectriques construits par la Compagnie Nationale du Rhône. Le modèle rhodanien adopté en 1934 par la CNR sur les recommandations de l'Etat comporte dans presque tous les cas : i) un réservoir contrôlé par un barrage de garde et des digues latérales, ii) le vieux Rhône utilisé pour le passage des crues, iii) un canal de dérivation équipé d'une usine hydroélectrique et d'une écluse de navigation.

A. Gérer la charge de fond d'un vieux Rhône dans un environnement impacté depuis plus de 150 ans : le secteur de Miribel-Jonage

L'aménagement le plus ancien existant à l'aval de Génissat est celui de Jonage-Cusset (1899) ; il

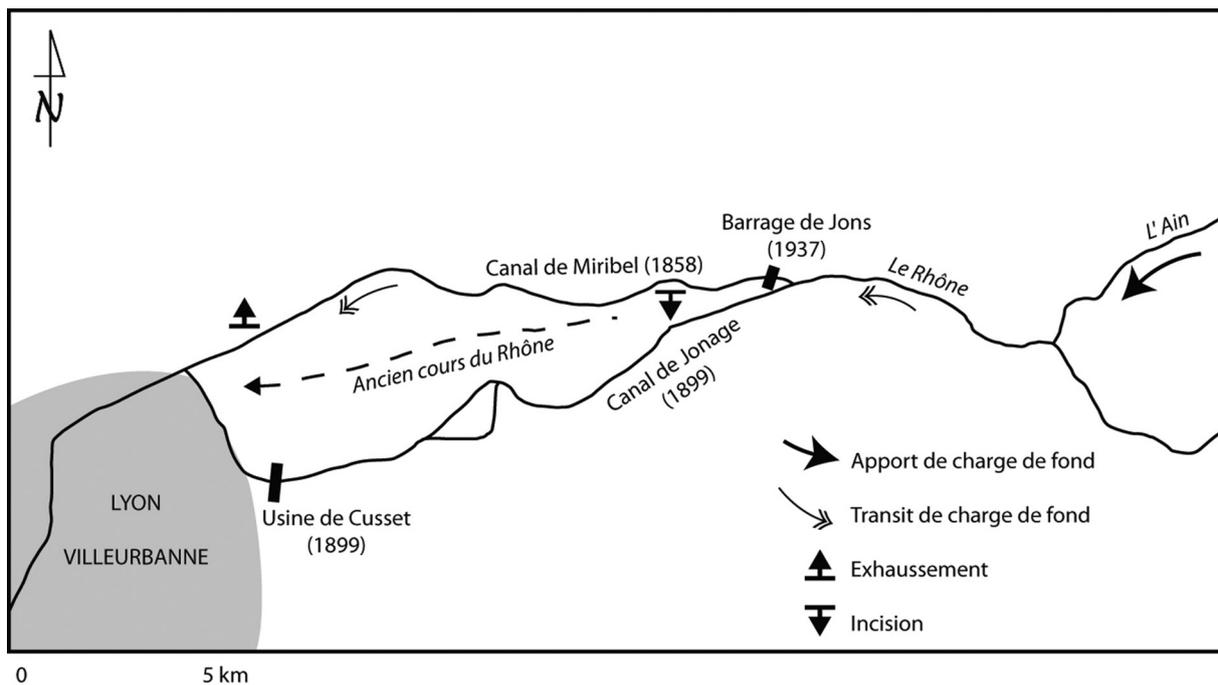


Figure 7. Schéma du système hydraulique du Rhône à l'amont de Lyon

Aménagement	Action	Composante		
		Retenue	Vieux Rhône	Canal
Seysssel	Extraction au confluent des Ussets	Les Ussets (20 000)	0	0
Chautagne	Extraction amont de la chaîne de barrages	Le Fier (60 000, en réalité 0)	-	-
Belley		-	-	-
Brégnier-Cordon	Extractions aval du Guiers	-	Le Guiers (10 à 20 000)	-
Sault-Brénaz		-	-	-
Jonage-Cusset (EDF)	Extractions vieux Rhône (canal de Miribel) puis protection apports de l'Ain	L'Ain (60 000, en réalité 30 000 ?)	-	-
Pierre-Bénite	Extractions dans le lit de la Saône	La Saône	-	-
Vaugris	Extractions dans la retenue	Le Gier	0	0
Péage-de-Roussillon		-	-	-
Saint-Vallier	Extraction au confluent	La Galaure (10 000 ?)	-	-
Bourg-lès-Valence	Extractions confluent du Doux	Le Doux (5000 ?)	-	L'Isère
Beauchastel		-	-	-
Baix-Le Logis Neuf	Extractions confluent de l'Eyrieux et piège à graviers sur la basse Drôme	L'Eyrieux (5-10 000 ?) La Drôme (20-40 000)	La Payre	-
Montélimar	Extractions sur le Roubion aval	Le Lavézon	Le Roubion L'Escoutay	-
Donzère-Mondragon	Extractions dans le lit de l'Ardèche et du Léz	-	L'Ardèche	Léz
Caderousse	Extractions sur la basse Cèze	L'Aigues	La Cèze	-
Avignon	Extractions	-	L'Ouvèze	-
Vallabrègues	Extractions dans les lits fluviaux, fosses servant de pièges à gravier	La Durance	Le Gardon	-

Tableau 3. Les entrées de charge de fond en provenance des affluents du Rhône et leur relation aux composantes des aménagements de la CNR. Données quantitatives en m³/an: SOGREAH (2000), en italiques : modifications par l'auteur de l'article. Souligné : apports significatifs. Localisation des barrages sur la Figure 1

comporte la dérivation de Jonage (conçue à l'origine pour recevoir un débit de 150 m³/s, le module du Rhône étant de 600 m³/s) et l'usine de Cusset. Il fut réalisé dans un environnement fluvial particulièrement instable. La protection du canal et de l'usine vis-à-vis des entrées de sédiments provenant de l'amont se faisait par une digue « divisoire » établie dans le Rhône (Figure 7). Le creusement du canal de Miribel pour les besoins de la navigation (1848-1857) fut suivi du basculement de son profil en long dès le début des années 1870 selon des modalités qui furent mal comprises lors de la construction de la dérivation de Jonage (Winghart et Chabert, 1965). Le basculement du canal de Miribel, attirant les sédiments dans son chenal, obligea la Société Lyonnaise des Forces Motrices du Rhône à construire en 1937 le barrage à hausses mobiles de Jons à son entrée amont. La charge de fond de ce tronçon ne provient que de l'Ain dont le débit solide fut compromis par une chaîne de barrages établie à partir des années 1930 (le Rhône n'a pas de charge de fond à l'amont de la confluence car cette dernière est piégée dans la cuvette des Basses Terres plus à l'amont). L'excès de prélèvements de gravier dans le canal de Miribel a depuis exacerbé le déficit amont du canal de sorte que les apports en

provenance de l'Ain sont indispensables et que la gestion du barrage de Jons a du être « optimisée » (Poinsart, 1992 ; Petit *et al.*, 1996). Le cas de Miribel-Jonage est unique en ce sens que le système ayant évolué de manière négative par effet d'impact, l'apport sédimentaire d'un affluent s'impose au motif qu'il influence de manière positive sa gestion.

B. Gérer un excès de charge de fond dans les retenues et les vieux Rhône

La CNR a toujours considéré, à juste titre, qu'un excès de charge de fond en transit dans une retenue, dans un canal d'amenée et même un vieux Rhône, mettrait en cause la sécurité en cas de relèvement de la ligne d'eau en crue (Tableau 3). La question a été traitée très sérieusement avant la mise en chantier de deux ouvrages à dérivation de la moyenne vallée du Rhône (Donzère-Mondragon en 1952 et Montélimar en 1957). Le transport solide a été évalué, des mesures d'accompagnement du transit ont été prises, des portes ont été construites à l'entrée du canal de Donzère et un dragage massif a été envisagé à l'aval de la retenue de cet aménagement. Fort heureusement le calcul avait surestimé le volume de la charge de fond en transit et les précautions prises se sont révélées inutiles (Savey et Deléglise, 1967). Ce fut ensuite une campagne d'extraction à la traversée de Villeurbanne et Lyon pour protéger la retenue de l'ouvrage de Pierre-Bénite (1966) d'un alluvionnement inévitable en provenance de l'Ain (avec le risque inhérent à la montée de la ligne d'eau en crue à la traversée d'une grande ville endiguée). Ce furent aussi des extractions à l'amont de Vienne, dans la retenue de Vaugris (1980). À l'aval de Valence, trois pièges à graviers importants sont installés à proximité de grandes confluences pour bloquer la totalité du flux avant son entrée dans le Rhône : sur la Drôme (1960), la Durance et le Gardon (1970).

La protection de l'axe fluvial devient prioritaire de sorte que la discontinuité entre les affluents et le fleuve est érigée en principe de gestion après la deuxième guerre mondiale. Les ingénieurs sont, comme au siècle précédent, mis en situation de gérer l'excès de charge solide grossière et le système ne peut la faire transiter puisque sa conception l'interdit dans une partie notable des cas. En principe les barrages de retenue à vannes mobiles sont conçus pour faire transiter les débits de crue excédant le débit d'équipement de l'usine hydroélectrique ainsi

que la charge de fond, mais dans la pratique les choses fonctionnent rarement ainsi car le transit complet dans le Rhône ne serait assuré que pour le débit centennal du fait de pertes de charge pour les débits plus fréquents (SOGREAH, 2000).

VI. CONCLUSION

Le bassin du Rhône est un exemple de gestion non coordonnée des transferts sédimentaires entre les montagnes, le fleuve, le delta et la côte. Une des raisons à cet état de fait est que la loi du Rhône (1921) a tourné le dos à la vision intégrée du bassin qu'avait promue la loi de 1858 en matière d'hydrologie et de respect des champs d'inondation. En concédant à un opérateur unique la totalité du cours du fleuve à l'aval de la frontière suisse et jusqu'à la hauteur de Tarascon-Beaucaire (et exception faite du vieil aménagement de Jonage-Cusset hérité du XIX^e siècle), le Parlement a suivi les concepteurs de ce dernier aménagement en prévoyant d'intégrer la production énergétique, la navigation et le développement agricole. Dans la conception de la loi de 1921, les affluents et le tronçon compris entre Beaucaire et la mer étaient placés hors du système technique à construire par le concessionnaire.

Les affluents apportaient au fleuve une charge caillouteuse (Drôme, Ardèche, Durance, Gardons) ou en suspension (Isère, Durance) importantes et l'aménageur devrait dégager les solutions pour s'en accommoder. Certes le tronçon aval, long d'une soixantaine de kilomètres, ne pouvait pas être aménagé pour la production énergétique. Mais la coupure entre d'une part la gestion des flux sédimentaires d'origine fluviale et d'autre part l'évolution du delta et du trait de côte a été organisée par la loi dans l'oubli complet des logiques qui avaient présidé à la restauration des terrains de montagne. Le sable (en tant que composante singulière de la charge en suspension) a été et reste le grand oublié de la gestion du Rhône qui n'est pas une gestion pleinement intégrée. De plus, l'aménagement du fleuve dans son delta favorise l'exportation des matériaux au large, sans bénéfice pour le littoral.

Ainsi la gestion à l'échelle du bassin, promue par l'Agence de l'Eau RMC dans les SDAGE, la continuité sédimentaire mise en place par la Directive cadre sur l'eau (2000) et transcrite dans la législation française et promue par l'ONEMA sont-elles pleinement nécessaires. La gestion de la

charge de fond a été d'une certaine manière résolue par le quasi épuisement des apports au Rhône et des transits dans le Rhône ; il n'en reste pas moins que des solutions correctrices devront être trouvées dans les années à venir. L'Étude Globale Rhône (SOGREAH, 2000) avait souligné pour la première fois la question des sédiments dans une démarche consécutive aux crues de 1993 et 1994. Elle reste d'actualité car les ouvrages prennent de l'âge et les problèmes, là où ils se posent, peuvent interroger sur le caractère durable des solutions jusqu'ici retenues. Il ne fait pas de doute qu'une certaine dose d'innovation devra se faire jour dans le système rhodanien. Ainsi, à titre d'exemple, la réactivation des marges des vieux Rhône, introduite en 2003 en tant que concept et soutenue par le Plan Rhône depuis 2008, est-elle un élément susceptible de restaurer le transit partiel des sables piégés dans les ouvrages construits sur les bords du fleuve entre 1860 et 1940 et dont on avait sous-estimé l'importance une fois la chaîne d'ouvrages hydroélectriques réalisée.

Un autre problème, qui sort du champ de cette brève analyse, est celui des matières en suspension. Les volumes en transit dans le fleuve n'ont été que faiblement réduits depuis un siècle et ils doivent procéder à une course d'obstacles avant d'arriver à la mer (Figure 1). La faible réduction des entrées de fines dans le système fluvial s'explique par le fait que l'érosion a été réduite par la protection améliorée des versants (notamment dans les zones de marnes des Alpes du Sud ou à haute altitude même si la végétation progresse du fait d'une moindre utilisation des alpages et du réchauffement climatique), mais trois vastes secteurs du bassin versant fournissent depuis des siècles des quantités de sédiments considérables, environ 500 tonnes/km²/an aujourd'hui. Il s'agit du haut bassin de l'Arve, de celui de la Romanche et de ceux de la Bléone et de l'Asse dans les Alpes du Sud. En outre les ouvrages de basse chute des grandes vallées ont des retenues dont le courant a une faible énergie et dont le niveau est doté de faibles variations, ce qui facilite la décantation des matières en suspension.

Il est difficile aux gestionnaires des barrages du haut Rhône et de la basse Isère de les faire transiter au fil de l'eau sans dommage mais des marges de progrès existent et font l'objet d'expérimentations. Nul doute que la gestion de la charge de fond et des matières en suspension sera une question majeure dans les prochaines décennies.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie S. Gaillot pour la mise au net de la figure 2, Sarah Scarrott pour la révision du résumé en anglais et deux lecteurs anonymes qui ont permis l'amélioration du texte.

BIBLIOGRAPHIE

- Barbiero, C., Bouchard, J.-P., Pereira, A. & Poirel, A. (2003). L'expérience d'Electricité de France dans la gestion du transport solide au droit des retenues. Comité Français des Grands Barrages (CFBR) et Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (MEDD). Colloque Barrages et développement durable en France, Paris, 191-211.
- Belidor (1750). Architecture hydraulique. Paris, Jombert éd., livre 2, t. 2, 312 p.
- Bertin, A. (1960). Le barrage de Serre-Ponçon, pièce maîtresse de l'aménagement de la Durance. *Revue de Géographie Alpine*, 48(4), 625-687.
- Boissier, R. (1916). Le charriage des alluvions en suspension dans l'eau de l'Arve. *Archives des Sciences Physiques et naturelles, Genève*, 41, 331-33.
- Bordes, J.-L. (2005). Les barrages-réservoirs du milieu du XVIII^e au début du XX^e siècle en France. Paris, Presses des Ponts et Chaussées, 443 p.
- Bravard, J.-P. (1994). La charge de fond du Haut-Rhône français, mise en perspective historique. *Les Dossiers de la Revue de Géographie Alpine*, 12, 163-170.
- Bravard, J.-P. (2002). Le « traitement » des versants dans le département de la Drôme. Des inondations de 1840 à la loi du 27 juillet 1860. *Annales des Ponts et Chaussées*, 103, 37-43.
- Collet, L.W. (1916). Le charriage des alluvions dans certains cours d'eau de la Suisse. *Annales Suisses d'Hydrographie du Service Fédéral des Eaux*, 2(51), 139-149.
- Congrès de la Houille Blanche (1902). Grenoble-Anneny-Chamonix. Compte rendu des travaux, des visites industrielles et des excursions. Grenoble, Syndicat des Propriétaires et Industriels possédant et exploitant des Forces motrices et hydrauliques, t. 2, 666 p.
- Coutagne, A. (1911). Apports et ensablement du Haut-Rhône. In : Aménagement du Haut-Rhône français, Bellegarde et Malpertuis, Société d'Agriculture, Sciences et Industrie de Lyon, 21-29.
- Couvert, B., Lefort, P., Peiry, J.-L. & Belleudy, Ph. (1999). La gestion des rivières. Transport solide et atterrissements. Guide méthodologique. Les Études des Agences de l'Eau, 65, 93 p.
- Dalmasso, A. (2008). Barrages et développement dans les Alpes françaises de l'entre-deux guerres. *Revue de Géographie Alpine*, 96(1), 45-54.
- Delsigne F., Lahousse Ph. & Guiter, G. (2001). Le Riou Bourdoux, un « monstre » alpin sous surveillance. *Revue Forestière Française*, LIII(5), 527-41.
- Demontzey, P. (1882). Traité pratique du reboisement et du gazonnage des montagnes. Paris, J. Rothschild éd., 2^e édition, 528 p.
- Doutriaux, E. (2006). Aménagements hydrauliques dans le cours du Rhône français. Bilan sédimentaire. *Genève, Archives des Sciences*, 59, 1-8.
- Drouhin, L.-P. (1902). Étude raisonnée sur la recherche du meilleur système de prise d'eau dans un torrent. Congrès de la Houille Blanche, Grenoble-Anneny-Chamonix, Compte-rendu des Travaux, 1, 269-278.
- Fabre, J.-A. (1797). Essai sur la théorie des torrents et des rivières. Paris, Bidault P. éd., 482 p. et planches.
- Gras, S. (1857). Études sur les torrents des Alpes. *Annales Ponts et Chaussées*, 2, 1-96.
- Lagarde, L. (1987). Philippe Buache, ou le premier géographe français, 1700-1773. *Mappemonde*, 2, 26-30.
- Landon, N. (1999). L'évolution contemporaine du profil en long des affluents du Rhône moyen. Thèse de géographie, Université Paris-Sorbonne, 560 p.
- Lugeon, M. (1912). Étude géologique sur le projet de barrage du Haut-Rhône français à Génissiat (près de Bellegarde). Mémoires de la Société Géologique de France, 4^e série, t. 2, mém. 8, 136 p.
- Martel, C.-E. (1911). Étude hydrologique et géologique de l'emplacement des barrages projetés sur le Haut-Rhône. In : Aménagement du Haut-Rhône français, Bellegarde et Malpertuis, Société d'Agriculture, Sciences et Industrie de Lyon, 31-66.
- Meade, R.H. (1996). River sediment input to major deltas. *Coastal Systems and Continental Margins*, 2, 63-85.
- Pardé, M. (1925). Le Régime du Rhône. Étude hydrologique. Études et Travaux de l'Institut de Géographie Alpine de l'Université de Grenoble, Lyon. Vol. 1, 883 p.
- Peiry, J.-L. (1988). Approche géographique de la dynamique spatio-temporelle des sédiments : l'exemple de la plaine alluviale de l'Arve (Haute Savoie). Thèse de géographie et aménagement, Université de Lyon III, 378 p.
- Peiry, J.-L., Salvador, P.-G. & Nougier, F. (1994). L'incision des rivières dans les Alpes du Nord : état de la question. *Revue de Géographie de Lyon*, 69(1), 47-56.
- Petit, F., Poinart, D. & Bravard, J.-P. (1996). Channel incision, gravel mining and bedload transport in, the Rhône river upstream of Lyon, France (« canal de Miribel »). *Catena*, 26, 209-226.
- Poinart, D. (1992). Effets des aménagements fluviaux sur les débits liquides et solides. L'exemple du Rhône dans les plaines du de Miribel-Jonage et de Donzère-Mondragon. Thèse de géographie et aménagement, Université Jean Moulin-Lyon 3, 501 p.
- Pichard, G. & Roucaute, E. (2014). Sept siècles d'histoire hydroclimatique du Rhône d'Orange à la mer (1300-2000). Climat, crues, inondations. Presses Universitaires de Provence, h.s. *Méditerranée*, 194 p.

- Saint-Pierre (de), D. (2013). Les Gorges perdues du Haut-Rhône, de la Suisse à Génissiat. Bourg-en-Bresse, M.G. Éditions, 287 p.
- Salvador, P.-G. (1991). Le thème de la métamorphose fluviale dans les plaines alluviales du Rhône et de l'Isère. Thèse de Géographie Université Jean Moulin-Lyon 3, 498 p.
- Savey, P. (1982). Plaine et domaine fluvial. Rapport général du colloque de Propriano. *Bulletin du BRGM* (2), III (1), 49-65.
- Savey, P. & Deléglise, R. (1967). Les incidences de l'aménagement du tiers central du Bas-Rhône sur les transports solides par charriage. Association Internationale d'Hydrologie Scientifique, Berne, 75, 449-461.
- Société Hydrotechnique de France (2001). Gestion des sédiments de la source à la mer. Lyon, 166^e session du Comité scientifique et technique de la SHF, non pag.
- Société Hydrotechnique de France (2007). Transports solides et gestion des sédiments en milieux naturel et urbain. Lyon, 187^e session du Comité scientifique et technique de la SHF, 268 p.
- SOGREAH (2000). Étude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. Étude du transport solide. Rapport de synthèse. Valence, Institution Rhône-Saône, 76 p.
- Surell, A. (1841). Étude sur les torrents des Alpes. Paris, Carillan-Goeury et Damont éd., 284 p.
- Syvitski, J.P.M. & Saito, Y. (2007). Morphodynamics of deltas under the influence of humans. *Global and Planetary Change*, 57(3-4), 261-282.
- Syvitski, J.P.M., Vorosmarty, C.J., Kettner, A.J. & Green, P. (2005). Impact of Humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*, 308(5720), 376-380.
- Vivian, H. & Thomas, A. (1982). Érosion et transport solide dans le bassin du haut Drac (en amont du Sautet). CEMAGREF Grenoble et Institut de Géographie Alpine, Grenoble, 105 p.
- Vorosmarty, C.J., Meybeck, M., Fekete, B., Sharma, K., Green, P. & Syvitski, J.P.M. (2003). Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments. *Global and Planetary Change*, 39(1-2), 169-190.
- Walling, D.E. (2007). Global change and the sediment loads of the world's rivers. In: Proceeding of 10th international Symposium on River Sedimentation, Moscow State University, Russia, August 2007, 1, 112-130.
- Walther, R. (1936). Note sur l'engravement et le dégravement d'un bassin d'accumulation. Histoire du lac du Motty. *Revue de Géographie Alpine*, 24(2), 315-328.
- Widman, M. (1950). Barrages hydroélectriques et érosion des terrains en montagne. *Revue Forestière Française*, 640-646.
- Wilhem, I. (1902). Climatologie, hydrologie. Congrès de la Houille Blanche, Grenoble-Annecy-Chamonix, Compte-rendu des Travaux, 1, 147-164.
- Wilhem, I. (1913). La Durance. Étude de l'utilisation de ses eaux et de l'amélioration du régime par la création de barrages. Paris, Éd. L. Laveur.
- Wilhem, I. (1934). L'aménagement de la chute du Rhône entre le confluent de l'Arve et Russin. Services Industriels de Genève, Service de l'Électricité, rapport de synthèse, 104 p.
- Winghart, J. & Chabert, J. (1965). Haut-Rhône à l'amont de Lyon : étude hydraulique de l'île de Miribel-Jonage. *La Houille Blanche*, 7, 1-20.

Coordonnées de l'auteur :

Jean-Paul BRAVARD
 Professeur de géographie émérite
 Université de Lyon, UMR 5600 EVS, France.
 Jean-paul.bravard@orange.fr