Le transit des courants de turbidité, une technique pour réduire l'alluvionnement des réservoirs de barrages

Autor(en): **Charmoun, Sabine / De Cesare, Giovanni / Schleiss, Anton**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **110 (2018)**

Heft 1

PDF erstellt am: **31.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-941569

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Le transit des courants de turbidité, une technique pour réduire l'alluvionnement des réservoirs de barrages

Sabine Chamoun, Giovanni De Cesare, Anton Schleiss

Résumé

La sédimentation des réservoirs est une problématique globale réduisant le volume d'eau disponible dans les réservoirs de barrages et induisant des pertes aux niveaux énergétique, économique et environnemental. Le transport de sédiments du bassin versant pendant les crues engendrent des courants chargés de sédiments. Dû à la différence de densité entre ces courants et l'eau dans la retenue, des courants de turbidité peuvent se former. Ces derniers sont capables d'atteindre les barrages et représentent la source principale de sédiments fins déposés dans les réservoirs. Afin de réduire la sédimentation qui résulte des courants de turbidité, leur évacuation à travers les vidanges ou prises de fond est proposée comme une solution économique et favorable à l'environnement. Dans l'étude présentée, il s'agit de tester plusieurs paramètres pouvant influencer la quantité de sédiments évacués des courants de turbidité à travers un orifice rectangulaire représentant la vidange de fond. D'un intérêt particulier sont les vidanges de fond à capacité restreinte par rapport aux débits des courants de turbidité comme c'est le cas en Suisse. Cela a permis la détermination des conditions menant à maximiser la masse de sédiments évacués et minimiser les pertes d'eau du réservoir. A cette fin, un modèle expérimental et un modèle numérique ont été utilisés.

Abstract: Venting of turbidity currents, a method for the reduction of reservoir sedimentation

Reservoir sedimentation is a global issue reducing water volumes in reservoirs and thus resulting in energetic, economic and environmental impacts. During floods, sediment transport from watersheds lead to sediment-laden flows. Once they reach the reservoir, turbidity currents are formed due to the density difference. Under adequate conditions of temperature and concentration, turbidity currents can flow along large distances until reaching the dam. They represent the main source of fine sediments deposited in reservoirs. In order to reduce the sedimentation caused by turbidity currents, their venting through bottom outlets or intakes is proposed as an economically and environmentally convenient solution. In the present work, different parameters affecting the amount of sediments evacuated by venting turbidity currents were tested. The particular case of bottom outlets having restrained capacities relatively to turbidity currents' discharges such as the case of Swiss dams, was highlighted. Venting was applied through a rectangular orifice representing a bottom outlet. The results offered the possibility to determine the conditions maximizing the mass of vented sediments and minimizing clear water losses from the reservoir. The approach used was both experimental and numerical.

Zusammenfassung: Durchleiten von Trübeströme als wirksame Massnahme zur Verminderung der Stauseeverlandung

Die Verlandung von Stauseen ist ein globales Problem, was der Verlust von wertvollem Speicherinhalt zur Folge hat und was mit energetischen, wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen verbunden ist. Infolge Sedimenteintrag vom Einzugsgebiet transportieren Fliessgewässer bei Hochwasser neben Geschiebe viele Schwebstoffe. Sobald diese sedimentbeladenen Abflüsse den Stausee erreichen, entstehen infolge des Dichteunterschieds Trübeströme, welche sich lawinenartig entlang dem Stauseegrund bis zur Talsperre bewegen. Trübeströme sind die Hauptursache der Verlandung von tiefen und langen Stauseen in den Alpen. Das regelmässige Durchleiten der Trübeströme mittels Grundablässen oder teilweise auch durch die Triebwasserfassungen kann deshalb die Verlandung erheblich reduzieren. In der vorliegenden Forschungsarbeit wurden die wesentlichen Parameter untersucht, welche das Sedimentvolumen beeinflussen, das durch Durchleiten von Trübeströmen ausgetragen werden kann. Insbesondere wurde der Einfluss einer beschränkten Grundablasskapazität, wie dies in der Schweiz häufig der Fall ist, auf die Wirksamkeit der Durchleitung von den Trübeströmen untersucht. Mit systematischen Experimenten in einem Versuchskanal sowie mit nummerischen Simulationen konnte das Durchleiten von Trübeströmen durch eine rechteckige Öffnung, die einen Grundablass darstellt, im Detail nachgebildet werden. Die Ergebnisse erlauben, die Masse der ausgetragenen Sedimente mittels Durchleiten von Trübeströmen zu maximieren und gleichzeitig den Reinwasserverlust aus dem Stausee zu minimieren.

1. Introduction

Lors des crues, une grande quantité de sédiments est transportée des bassins versants aux réservoirs de barrages. Dans le cas où les sédiments ne sont pas évacués ou dragués des réservoirs, ils s'y accumulent et mènent, éventuellement, à leur sédimentation *(Figure 1)*. Ce processus menace la durabilité des réservoirs dû à la réduction du volume de stockage d'eau et au colmatage et à l'usure des structures hydrauliques de fond telles que les prises et vidanges de fond. L'investissement annuel dépensé pour remplacer le volume perdu à cause de la sédimentation est en moyenne de 13 à 19 trillions (10^{12}) de dollars ($) (*Palmieri et al.*, 2001; *Schleiss et al.*, 2010; *Schleiss et al.*, 2016). Dans le passé, l'augmentation du volume de stockage était considérée comme une mesure de prévention contre la sédimentation. Néanmoins, cette mesure qui ne sert qu'à retarder le problème est de moins en moins faisable vu que le coût du m^3 d'eau stocké augmente sans cesse. Cela est dû au fait que les sites disponibles pour la construction de barrages sont de

moins en moins nombreux (*Vanoni*, 2006).

Plusieurs techniques existent pour la réduction de la sédimentation des réservoirs (*Basson* & *Rooseboom*, 1999; *Brandt*, 2000; *Müller et al.*, 2013; *Wen Shen*, 1999), notamment le dragage mécanique, le siphonage des sédiments et la vidange menant à l'abaissement du niveau du réservoir facilitant l'érosion des sédiments et leur transfert vers la rivière à l'aval. Toutefois, les sédiments qui se trouvent auprès du barrage sont des sédiments fins, formés principalement de limon, d'argile et de sable fin. Ce type de sédiments est transporté par les courants de turbidité qui se forment lors de crues annuelles. Chargés de sédiments, les courants provenant du bassin versant plongent sous la surface de l'eau claire du réservoir, formant ainsi des courants de turbidité capables d'avancer sur le fond du réservoir le long de plusieurs kilomètres, grâce à la différence de densité entre le courant et l'eau claire. La plus grande distance traversée par un courant de turbidité est de 129 km et a été observée au réservoir du Lake Mead (*Morris* et *Fan*, 1997). Ainsi, le contrôle des courants de turbidité est d'une grande importance. Plusieurs méthodes existent dont la mise en place d'obstacles ou d'écrans géotextiles pour réflechir les courants et les garder en amont du réservoir (*De Cesare et al.*, 2008; *Oehy* et *Schleiss*, 2007) ou l'utilisation de jets capables de freiner les courants (*Oehy et al.*, 2010). De même, dans le cas où les courants de turbidité sont maîtrisés (i. e., observations et mesures), leur évacuation à travers les vidanges de fond est une technique qui permettrait non seulement d'éviter la sédimentation des réservoirs mais également de revitaliser la rivière à l'aval du barrage. Ceci est assuré grâce au transit direct de sédiments nécessaires à la rivière, tout en utilisant des débits relativement faibles, voire restreints par rapport aux débits des courants de turbidité.

En effet, l'évacuation des courants de turbidité a été souvent mentionnée dans la littérature (*Annandale*, 2005; *Batuca* et *Jordaan*, 2000; *Brandt*, 2000; *Chen* et *Zhao*, 1992; *Schleiss et al.*, 2016). Les courants de turbidité ont été observés dans maints réservoirs, particulièrement en Suisse (i. e., les réservoirs de Luzzone [*De Cesare et al.*, 2001], Mapragg [*Müller* et *De Cesare*, 2009], Grimsel [*Oehy* et *Schleiss*, 2001]). Cependant, très peu d'études scientifiques systématiques ont été menées sur le sujet (*Chamoun et al.*, 2017a, 2017b; *Fan*, 1986, 2008; *Lee et al.*, 2014). Malgré les avantages mentionnés, il existe un manque de directives permettant aux propriétaires de barrages de maximiser l'efficacité de l'évacuation des sédiments contenus dans les courants de turbidité. Cela est principalement dû au manque de recherche scientifique sur le sujet mais aussi au fait que l'acquisition de données permettant le contrôle et la surveillance des courants de turbidité sur prototype est généralement exigeante parce qu'ils ont lieu en condition de crues. La présente recherche vise à répondre à certaines questions essentielles liées à des aspects géométriques et opérationnels du transit des courants de turbidité. Les questions traitées sont détaillées dans la section suivante.

Figure 1. Sédimentation du réservoir de Sufers aux Grisons, Suisse (photo obtenue avec l'aimable autorisation de Kraftwerke Hinterrhein AG).

2. Problématique

Les principales questions traitées vont dans le sens de l'optimisation de l'efficacité de l'évacuation des sédiments fins:

a. Quel débit de transit faut-il utiliser? Particulièrement pour des débits de vidange restreints par rapport aux débits des courants de turbidité tels que les réservoirs alpins en Suisse?
b. Quel est l'effet de la pente du lit sur l'efficacité du transit?
c. Quel est le meilleur moment pour ouvrir les vannes et débuter le transit des courants de turbidité?
d. Pendant combien de temps faut-il garder la vidange ouverte?
e. Quelles sont les dimensions souhaitées des vidanges de fond et où faut-il les placer ?

3. Aperçu global du transit des courants de turbidité

Il existe maints indicateurs de la formation des courants de turbidité dans un réservoir (*Morris* et *Fan*, 1997). Ils peuvent être détectés visuellement à travers l'accumulation de débris au point de plongée du courant *(Figure 2)*. De même, des mesures de profils de vitesses ou de concentration proches du fond du réservoir peuvent servir à tracer le développement du courant et à le caractériser.

Selon Batuca et *Jordaan* (2000), le premier à avoir mentionné la possibilité de transiter les courants de turbidité afin de réduire la déposition des sédiments serait *Bell* (1942). Cette technique a été employée au Taiwan, dans les réservoirs de Shihmen (*Sloff et al.*, 2016) et de Tsengwen (*Lee et al.*, 2014) où les événements de typhon causent le transport considérable de sédiments. Les courants de turbidité sont également utilisés pour le transit de sédiments en suspension en Chine où le fleuve Jaune, connue pour être la rivière qui transporte le plus de sédiments au monde, cause la sédimentation de plusieurs réservoirs (*Ren* et *Ning*, 1985; *Wang* et *Lin*, 2004). De même, cette technique est hautement recommandée en Iran où le barrage de Dez, Sefid-Rud et Rudbar Lorestan reçoivent une large quantité de sédiments fins provenant des courants de turbidité (*Amini et al.*, 2017; *Morris* et *Fan*, 1997; *Schleiss et al.*, 2010). En Suisse, le réservoir de Mapragg perd 0.4 % de son volume en moyenne annuelle à cause de la sédimentation (*Müller* et *De Cesare*, 2009). Des courants de turbidité y sont observés

et leur évacuation est appliquée en utilisant des débits et concentrations de sortie qui respectent la réglementation en vigueur. Un système d'alarme est déclenché lorsqu'un courant de turbidité atteint le réservoir avec une concentration plus grande que 2 g/l, valeur à partir de laquelle l'évacuation des sédiments devient plus économique que leur dragage mécanique dans le futur. Dans d'autres réservoirs, notamment Elephant Butte aux Etats-Unis, Sautet en France et Iril Emda en Algérie, les courants de turbidité sont observés et évacués afin de réduire la sédimentation (*Chamoun et al.*, 2016).

Toutefois, l'efficacité de l'évacuation des sédiments est très variable d'un pays à un autre, d'une région à une autre et même, d'un évènement à un autre pour un réservoir spécifique. En effet, l'efficacité dépend des conditions morphologiques du bassin versant, des conditions géométriques du réservoir, des caractéristiques des prises de fond, ainsi que des conditions opérationnelles lors de l'évacuation des sédiments.

4. Approche de l'étude

L'étude menée est principalement expérimentale. Cependant, afin d'augmenter le nombre de paramètres étudiés, un modèle numérique a été créé et validé sur la base des résultats expérimentaux.

Expérimentalement, un canal de 8.55 m de long et de 0.27 m de large a été utilisé. Le canal est divisé en trois parties: (1) le réservoir amont qui reçoit le mélange eau-sédiments, (2) le canal principal simulant le réservoir du barrage où se développe le courant de turbidité et (3) un réservoir aval qui sert à recevoir l'eau claire déversée du réservoir principal dû à la formation du courant de turbidité. Le mélange eau-sédiments est préparé dans un bac de 1 m^3 (bac noir sous le canal dans la *Figure 3b*).

Au moment du début du test, une porte coulissante placée entre le réservoir amont et le canal principal est ouverte déclenchant le courant de turbidité qui se forme et avance le long du canal sur une distance de 6.7 m. Le débit alimentant le courant de turbidité est constant et continu tout au long du test. Un mur représentant le barrage est placé à la fin du canal, muni d'un orifice rectangulaire de hauteur h_{outlet} = 12 cm et de largeur w_{outlet} = 9 cm, centré sur la largeur du canal *(Figure 3a)*. Au moment du début de l'évacuation du courant de turbidité, un débit prédéterminé (contrôlé à l'aide d'un débitmètre) est relâché, relativement au débit du courant de turbidité. Le volume d'eau et de sédiments évacués sont finalement déversés dans un bassin aval. Des mesures de débit et de concentration en sédiments sont effectuées dans le réservoir amont et le bassin aval. De même, des mesures de déposition et de profils de vitesses sont prises dans le canal principal tout au long des tests.

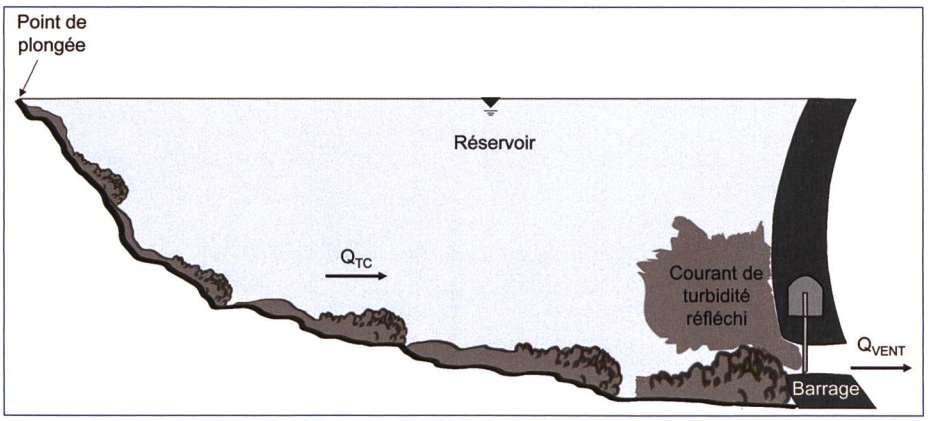

Figure 2. Courant de turbidité en progression sur le fond du réservoir et projection de son transit à travers la vidange de fond.

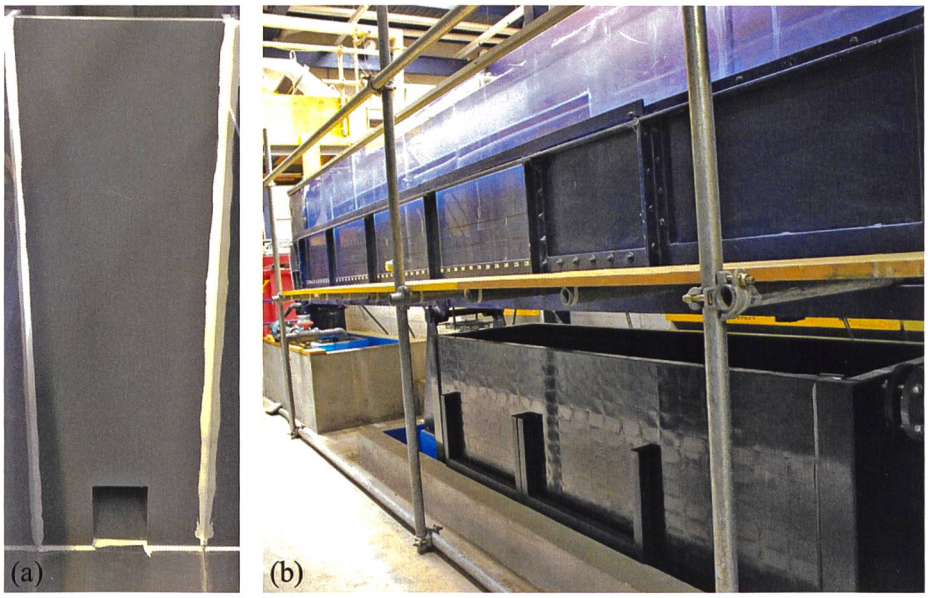

Figure 3. (a) le mur aval et l'orifice rectangulaire ; (b) l'intégralité du canal (photo prise du côté amont) et le bac utilisé pour le mélange.

5. Optimisation de l'évacuation des sédiments

Sur la base des résultats expérimentaux et numériques, les conditions optimales retenues sont celles qui mènent à la maximisation de la masse de sédiments évacuées tout en limitant les pertes d'eau claire du réservoir.

5.1 Débit de sortie et pente du lit

Le débit de sortie de la vidange Q_{VENT} est normalisé par le débit du courant de turbidité Q_{TC} et le rapport $\phi = Q_{VENT}/Q_{TC}$ est appelé le degré de transit. Dans le cas où la sédimentation du réservoir a déjà débuté, le volume mort du réservoir se remplit progressivement. Ainsi, le fond auprès du barrage devient de plus en plus horizontal. Par conséquent, un lit horizontal a été testé en premier lieu. Il s'est avéré qu'une évacuation optimale à travers la vidange de fond des sédiments entraînés par les courants de turbidité est obtenue avec un degré de transit de 100 % pour le lit horizontal. De plus, des pentes de 2.4 % et de 5.0 % ont été testées, couvrant ainsi les valeurs potentielles de pentes auprès des barrages. L'augmentation de la pente du lit résulte en un degré de transit optimal de 135 %. Cela est dû au fait que le courant de turbidité se réfléchit moins sur les pentes plus raides et est «emprisonné» près du barrage. Le nuage de sédiments en suspension est donc plus concentré et les pertes d'eau sont réduites.

De plus, les valeurs d'efficacité augmentent avec la pente du lit. Par exemple, pour un degré de transit de ϕ = 50 %, la valeur de l'efficacité passe de 7.0 % à 8.4 % et 11.2 % *(Figure 4)* en

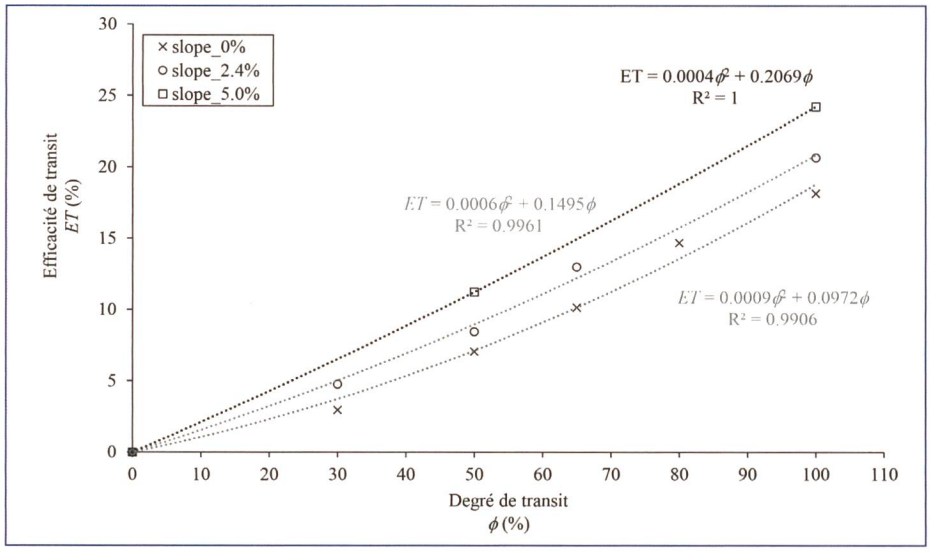

Figure 4. Efficacité du transit des sédiments des courants de turbidité en fonction du degré de transit pour les trois différentes pentes testées.

augmentant la pente de 0 % à 2.4 % et 5.0 % respectivement. La *Figure 4* montre la variation de l'efficacité du transit *ET* des sédiments en fonction du degré de transit. A titre représentatif, ce dernier est limité à 100 % (dans la *Figure 4*) vu que pour les réservoirs alpins Suisses, le débit des vidanges de fond utilisé pour l'évacuation des sédiments dépasse rarement les débits potentiels des courants de turbidité à évacuer (*Chamoun et al.*, 2016b). *ET* est définie par le rapport entre la masse des sédiments évacués et celle entraînée par le courant de turbidité. De même, les sédiments qui se déposent avant et pendant le transit des courants de turbidité sont difficilement érodés et sont par conséquent soustraits de la masse des sédiments entraînés par le courant.

Cette section répond aux questions (a) et (b). Le degré de transit des courants de turbidité s'est avéré être optimal pour 100 % $< \phi <$ 135 % lorsque des pentes du réservoir auprès du barrage sont dans la marge 0% $< S <$ 5.0 %. Vu que les pentes plus grandes engendrent des efficacités plus élevées, il est conseillé de garder la pente la plus raide possible auprès du barrage. Par conséquent, le transit des courants de turbidité doit être effectué fréquemment et dès le début de l'exploitation du barrage. Cela garantira la formation d'un cône en amont de la vidange de fond et évitera le remplissage du volume mort situé en dessous ainsi que le développement d'un lit horizontal. Cela permet de même de garder les vidanges de fond libres des sédiments et réduit les dommages potentiels dus à l'abrasion.

5.2 Début et durée de l'ouverture des vannes

Le début de l'opération de transit du courant doit se faire idéalement à l'arrivée du courant à la vidange de fond. Le temps nécessaire pour l'ouverture des vannes étant de plus ou moins 5–10 minutes et les vitesses typiques des courants de turbidité étant autour de 30 cm/s à 100 cm/s (*De Cesare et al.*, 2001; *Khripounoff et al.*, 2003; *Lambert* et *Giovanoli*, 1988; *Xu*, 2010), l'ouverture des vannes doit être prévue lorsque le courant atteint une distance de 200–300 m en amont du barrage (question [c]). Cela laisse suffisamment de temps pour que le champ d'écoulement s'établisse devant la prise et par conséquent permet une meilleure aspiration du courant de turbidité. La présence d'une station de mesure de vitesse et/ou de concentration est donc recommandée aux alentours de 200–300 m en amont du barrage.

Toutefois, vu les difficultés rencontrées généralement pendant la mise en place d'instruments et la mesure sur site dans les conditions de crues pendant lesquels les courants de turbidité se forment, il est souvent compliqué d'estimer le moment d'arrivée du courant auprès du barrage. Pour cette raison, une ouverture anticipée (i. e., avant que le courant n'atteigne 300 m en amont du barrage) et une ouverture tardive (i. e., 20 à 50 minutes [en prototype] après l'arrivée du courant au barrage) ont été également testées. Il s'est avéré que l'ouverture anticipée, malgré les pertes d'eau claire qu'elle implique, mène à une évacuation de sédiments plus efficace qu'une ouverture tardive. En effet, lorsque les vannes sont ouvertes après l'arrivée du courant et sa réflexion, une zone de circulation se forme par le champ d'écoulement du courant de turbidité arrivant et celui du courant réfléchi. Ce qui rend plus difficile l'établissement du champ d'écoulement propre à la vidange de fond, une fois ouverte. De plus, une partie des sédiments du courant se déposent avant l'ouverture des vannes, et sont difficilement érodés et transités vers l'aval lors de l'opération. Ainsi, dans le cas où les mesures sur site ne sont pas disponibles, il est fort intéressant d'estimer, à la base d'un calcul théorique (*Fan*, 1986) ou de simulation numérique, le moment d'arrivée du courant de turbidité afin d'éviter une ouverture tardive des prises/vidanges de fond.

En outre, l'efficacité dans le temps a atteint, pour tous les cas testés, une valeur quasi-stable qui dépend du débit de sortie. Vu que le débit du courant de turbidité dépend du débit de crue, l'ouverture des vannes doit durer au moins pendant la durée de la crue (e.g., autour de 36 h pour un évènement de crue étudié à Grimsel [*Schleiss* et *Oehy*, 2002] et plus ou moins 6 h pour un évènement de crue au réservoir de Luzzone [*De Cesare*, 1998]). A la fin de l'évènement de crue, le courant de turbidité dans le réservoir se dissipe et le flux de sédiment est coupé. Néanmoins, le nuage de sédiments en suspension formé proche du barrage persiste dû à la faible vitesse de décantation des sédiments fins qui le forment. Pour cette raison, afin d'éviter le colmatage des structures hydrauliques et leur érosion, l'ouverture des vannes doit être maintenue après la fin de la crue et la concentration avale mesurée en continu. Malgré les pertes d'eau possible, il est conseillé d'atteindre de basse concentration dans la rivière avale afin de la rincer et de libérer les interstices du lit colmatés par les sédiments fins (question [d]). Cela peut être jugé visuellement par un lit aval plus clair (*De Cesare et al.*, 2015).

5.3 Dimensions et position des vidanges de fond

Les résultats suivants sont basés sur le modèle numérique validé par les données expérimentales. Seul le lit horizontal a été testé numériquement. Trois positions verticales de l'orifice ont été testées (*Figure 5*). L'emplacement au fond a induit la plus grande efficacité d'évacuation des sédiments. Plus l'orifice est élevé, plus basse est l'efficacité d'évacuation. En fait, lorsque l'orifice est placé plus haut que le fond, le courant se réfléchit davantage par la structure du barrage en-dessous de l'orifice (*Figure 5*). De plus, l'orifice en opération a une zone d'aspiration ayant

une limite supérieure et une inférieure. Plus l'orifice est loin du fond, plus la limite inférieure de l'aspiration est élevée et moins le courant de turbidité peut atteindre cette zone.

De plus, différentes dimensions (hauteurs et largeurs) ont été testées et démontrent que l'évacuation optimale se fait en assurant que la zone d'évacuation, qui dépend des dimensions de la prise, le débit de sortie et la différence de densité entre le courant de turbidité et l'eau claire du réservoir, englobe le corps du courant de turbidité (question [e]). Si la zone d'aspiration formée est plus large que le corps du courant, plus d'eau claire du réservoir sera comprise dans le volume évacué, ce qui engendre plus de pertes. Si la zone d'aspiration atteint partiellement le courant de turbidité, les sédiments non atteints se déposeront, diminuant ainsi l'efficacité de l'évacuation. Afin d'estimer les limites de la zone d'aspiration, des formules théoriques ont été proposées par *Gariel* (1949) et *Craya* (1949) (basés sur des courants salins) et adaptées par *Fan* (1960) pour les courants de turbidité.

L'analyse précédente convient à des barrages en cours de conception. Toutefois, dans la plupart des réservoirs opérationnels en Suisse, les sédiments ont atteints la hauteur de la vidange de fond et un lit horizontal s'est formé auprès du barrage. Il est important d'éviter que les structures de vidange déjà existantes soient bloquées par des sédiments. Si la structure de vidange est complètement bloquée, cela met en péril la sécurité du barrage et la construction d'une nouvelle prise plus élevée devient nécessaire comme c'était le cas dans le réservoir de Mauvoisin (*Durand*, 2001; *Schleiss et al.*, 1996). Cela engendre évidemment des coûts de construction conséquents par rapport au coût de gestion des sédiments en avance. Si la structure de vidange est partiellement bloquée, une ouverture fréquente des vannes doit être immédiatement appliquée.

6. Conclusions

La sédimentation des réservoirs est une problématique qui engendre des dégâts et des pertes aux niveaux économique, environnemental et énergétique. Ainsi, elle doit être adressée le plus tôt possible, préférablement avant ou pendant la conception du barrage. Les sédiments en suspension constituent souvent 80 % à 90 % de la totalité des sédiments transportés par les rivières (*Schleiss et al.*, 2016). Les courants de turbidité sont la source principale des sédiments en suspension dans les réservoirs. Pour cette raison, il est fondamental de mettre en place des lignes directrices qui permettraient la maîtrise de ces courants et de leur transit à travers la vidange de fond.

Cette recherche propose des modes d'opération capables d'augmenter l'efficacité du transit des sédiments des courants de turbidité. Le débit de sortie, qui dépend de l'ouverture des vannes de fond et du niveau de la retenue doit être fixé par rapport au débit estimé du courant de turbidité. Des fonctions applicables pour le cas particulier des réservoirs Suisses ont été données, où le débit des vidanges de fond doit être restreint aux débits des courants de turbidité. L'ouverture optimale doit correspondre à un débit de 100 % du débit du courant de turbidité pour un lit horizontal auprès du barrage. Ce débit peut aller jusqu'à 135 % pour des pentes plus grandes, atteignant 5.0 %. D'un autre côté, l'ouverture des vannes doit être effectuée idéalement lorsque le courant de turbidité se trouve à une distance de 200 à 300 m de la vidange de fond. De même, le transit des courants de turbidité ne doit pas s'arrêter immédiatement après la fin de la crue (et donc la fin du flux du courant de turbidité) mais doit durer pour assurer le rinçage de la rivière avale et éviter le colmatage du lit de la rivière. Il est également envisageable de combiner cette opération avec les crues artificielles (i.e., barrage de Rossens [*Battisacco*, 2016]) générées pour la revitalisation des rivières à l'aval des barrages. Dans le cas de nouvelles structures de vidange, le dimensionnement doit assurer la formation d'un cône d'aspiration pouvant atteindre le plus possible la dimension du courant. Si cela ne s'avère pas possible, l'augmentation du nombre de vidanges, verticalement ou horizontalement, serait une solution.

La surveillance et le contrôle des courants de turbidité restent la clé d'une opération efficace. En d'autres termes, les réservoirs ayant un grand potentiel de formation de courant de turbidité doivent être munis d'un système de mesure, en particulier des turbidimètres auprès du fond du résevoir ainsi qu'à l'aval du barrage, afin de maîtriser les conditions de transit tels que le timing du début de l'opération, la durée et le débit de sortie.

Remerciements : La présente recherche a été financée par Swisselectric Research et le Comité suisse des barrages.

Bibliographie

Amini, A., Venuleo, S., Chamoun, S., De Cesare, G., & Schleiss, A. (2017). Investigation of venting turbidity currents in the Rudbar-Lorestan reservoir in Iran. In Annual Meeting of International Commission on Large Dams (p. 77). Prague, Czech Republic.

Annandale, G. W. (2005). Reservoir sedimentation. Encyclopedia of Hydrological Sciences. Chichester, U.K.: Wiley.

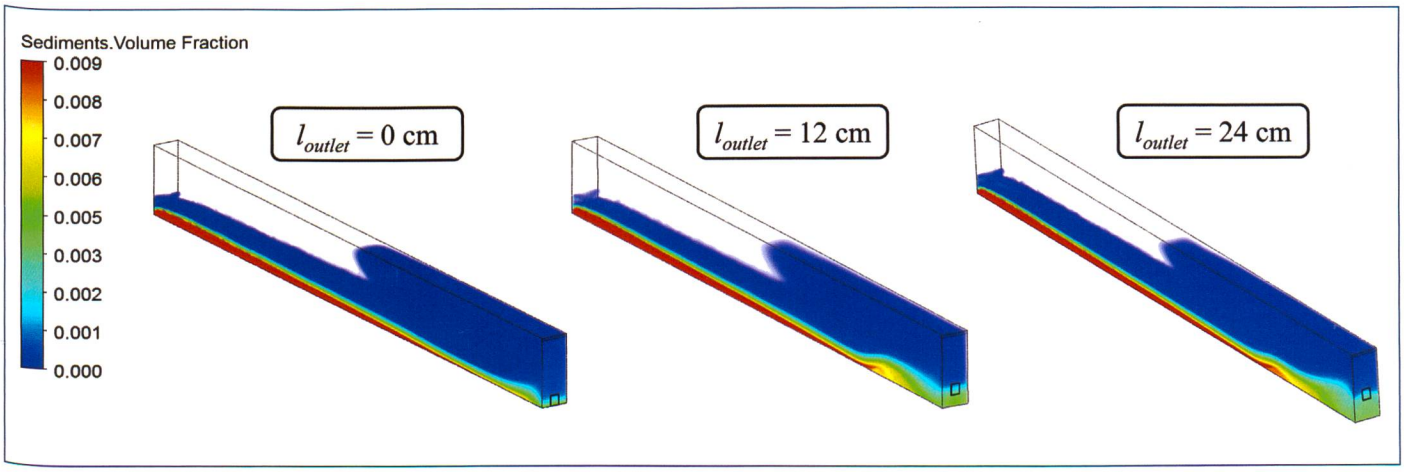

Figure 5. Les contours de concentrations obtenus avec l'orifice placé à différents niveaux verticaux après t = 225 s du début du transit (correspondant à plus ou moins 3 heures en prototype).

Basson, G., & Rooseboom, A. (1999). Dealing with reservoir sedimentation - Dredging. Water Research Commission, South Africa.

Battisacco, E. (2016). Replenishment of sediment downstream of dams: erosion and transport processes. PhD thesis No. 7239, Communication 67, Laboratory of Hydraulic Constructions (LCH), Ed. A. Schleiss, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL, Switzerland.

Batuca, D., & Jordaan, J. (2000). Silting and desilting of reservoirs. Rotterdam: A.A.Balkema.

Bell, H. S. (1942). Density currents as agents for transporting sediments. The Journal of Geology, 50(5), 512–547.

Brandt, S. A. (2000). A review of reservoir desiltation. International Journal of Sediment Research, 15(3), 321–342.

Chamoun, S., De Cesare, G., & Schleiss, A. J. (2016a). Managing reservoir sedimentation by venting turbidity currents: a review. International Journal of Sediment Research, 31(3), 195–204.

Chamoun, S., De Cesare, G., & Schleiss, A. J. (2016b). Venting turbidity currents for the sustainable use of reservoirs. International Journal on Hydropower and Dams, 23(5), 64–69.

Chamoun, S., De Cesare, G., & Schleiss, A. J. (2017a). Management of turbidity current venting in reservoirs under different bed slopes. Journal of Environmental Management, 204, 519–530.

Chamoun, S., De Cesare, G., & Schleiss, A. J. (2017b). Venting of turbidity currents approaching a rectangular opening on a horizontal bed. Journal of Hydraulic Research.

Chen, J., & Zhao, K. (1992). Sediment Management in Nanqin Reservoir. International Journal of Sediment Research, 7(3), 71–84.

Craya, A. (1949). Recherches théoriques sur l'écoulement de couches superposées de fluides de densités différentes. La Houille Blanche, 35(1), 44–55.

De Cesare, G. (1998). Alluvionnement des retenues par courants de turbidité. PhD thesis No. 1820 and Communication 7, Laboratory of Hydraulic Constructions (LCH), Ed. A. Schleiss, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL, Switzerland (in French).

De Cesare, G., Altenkirch, N., Schleiss, A., Roth, M., Molinari, P., & Michel, M. (2015). Störfall vom 30. März 2013 bei der Staumauer Punt dal Gall. Wasser Energie Luft - Eau Energie Air, 140, 1–8.

De Cesare, G., Oehy, C., & Schleiss, A. J. (2008). Experiments on turbidity currents influenced by solid and permeable obstacles and water jet screens. In 6th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering (pp. 41–44).

De Cesare, G., Schleiss, A. J., & Hermann, F. (2001). Impact of turbidity currents on reservoir sedimentation. Journal of Hydraulic Engineering, 127(1), 6–16.

Durand, P. (2001). Barrage de Mauvoisin. Projet de surélévation de la prise d'eau et vidange, impacts sur l'environnement. Houille Blanche, (6–7), 44–48.

Fan, J. (1960). Experimental studies on density currents. Scientia Sinica, 4(2), 275–303.

Fan, J. (1986). Turbid density currents in reservoirs. Water International, 11(3), 107–116.

Fan, J. (2008). Stratified flow through outlets. Journal of Hydro-Environment Research, 2(1), 3–18.

Gariel, P. (1949). Recherches expérimentales sur l'écoulement de couches superposées de fluides de densités différentes. La Houille Blanche, 35(1), 56–64.

Khripounoff, A., Vangriesheim, A., Babonneau, N., Crassous, P., Dennielou, B., & Savoye, B. (2003). Direct observation of intense turbidity current activity in the Zaire submarine valley at 4000 m water depth. Marine Geology, 194(3), 151–158.

Lambert, A., & Giovanoli, F. (1988). Records of riverborne turbidity currents and indications of slope failures in the Rhone Delta of Lake Geneva. Limnology and Oceanography, 33(3), 458–468.

Lee, F. Z., Lai, J. S., Tan, Y. C., & Sung, C. C. (2014). Turbid density current venting through reservoir outlets. KSCE Journal of Civil Engineering, 18(2), 694–705.

Morris, G., & Fan, J. (1997). Reservoir sedimentation handbook: Design and management of dams, reservoirs and watersheds for sustainable use. McGraw-Hill, New York.

Müller, M., De Cesare, G., & Schleiss, A. J. (2013). Einfluss von Pumpspeichersequenzen auf die Strömungsverhältnisse und das Absetzverhalten von Feinsedimenten in Stauseen. Wasser Energie Luft – Eau Energie Air, 105(3), 181–190.

Müller, P. J., & De Cesare, G. (2009). Sedimentation problems in the reservoirs of the Kraftwerke Sarganserland – Venting of turbidity currents as the essential part of the solution. General Report Q.89-R.21. In Proc. of the 23rd Congress of the Int. Commission on Large Dams CIGB-ICOLD. Brasilia: Vol. 2, Brasilia, Brazil, Q.89-R.21.

Oehy, C., De Cesare, G., & Schleiss, A. J. (2010). Effects of inclined jet screen on turbidity currents. Journal of Hydraulic Research, 48(1), 81–90.

Oehy, C., & Schleiss, A. (2007). Control of turbidity currents in reservoirs by solid and permeable obstacles. Journal of Hydraulic Engineering, 133(6), 637–648.

Oehy, C., & Schleiss, A. J. (2001). Numerical modelling of a turbidity current passing over an obstacle – practical application in the Lake Grimsel, Switzerland. In Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics (p. 6).

Palmieri, A., Shah, F., & Dinar, A. (2001). Economics of reservoir sedimentation and sustainable management of dams. Journal of Environmental Management, 61(2), 149–163.

Ren, Z., & Ning, Q. (1985). Lecture notes of the training course on reservoir sedimentation. Beijing, China: IRTCES.

Schleiss, A., De Cesare, G., & Althaus, J. J. (2010). Verlandung der Stauseen gefährdet die nachhaltige Nutzung der Wasserkraft. Wasser, Energie, Luft – Eau, Energie, Air, 102(1), 31–40.

Schleiss, A., Feuz, B., Aemmer, M., Zünd, B. Verlandungsprobleme im Stausee Mauvoisin. Ausmass, Auswirkungen und mögliche Massnahmen. Int. Symposium «Verlandung von Stauseen und Stauhaltungen», Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) Nr. 141, ETH Zürich, 1996, p. 37–58.

Schleiss, A. J., Franca, M. J., Juez, C., & De Cesare, G. (2016). Reservoir sedimentation. Vision paper. Journal of Hydraulic Research, 54(6), 595–614.

Schleiss, A., & Oehy, C. (2002). Verlandung von Stauseen und Nachhaltigkeit. Wasser, Energie, Luft – Eau, Energie, Air, 94(7/8), 227–234.

Sloff, K., Commandeur, A., & Yang, J.-C. (2016). Models for effective sluicing of turbidity-currents in resevoirs. In G. Constantinescu, M. Gracia & D. Hanes (Eds.), River Flow Proceedings (pp. 868–874). CRC Press.

Vanoni, V. A. (2006). Sedimentation engineering. American Society of Civil Engineers.

Wang, Z., & Lin, B. (2004). Sediment studies and management strategies in China. International Journal of River Basin Management, 2(1), 39–50.

Wen Shen, H. (1999). Flushing sediment through reservoirs. Journal of Hydraulic Research, 37(6), 743–757.

Xu, J. P. (2010). Normalized velocity profiles of field-measured turbidity currents. Geology, 38(6), 563–566.

Adresse des auteurs

Sabine Chamoun, Giovanni De Cesare, Anton Schleiss

Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Station 18, CH-1015 Lausanne, Switzerland

sabine.chamoun@epfl.ch

giovanni.decesare@epfl.ch

anton.schleiss@epfl.ch